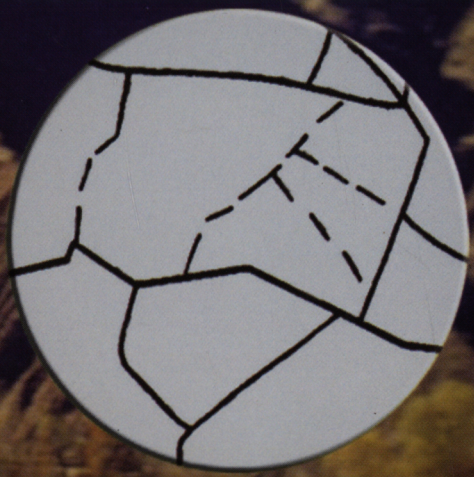
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ТРУДЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

ISSN 0002-3272

В.С. Пономарев

Энергонасыщенность геологической среды



TRANSACTIONS OF THE GEOLOGICAL INSTITUTE

Founded in 1932
Vol. 582

V.S. Ponomaryov

Energy saturation of geological medium

MOSCOW NAUKA 2008

ТРУДЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Основаны в 1932 году
Вып. 582

В. С. Пономарев

Энергонасыщенность геологической среды

МОСКВА НАУКА 2008

УДК 551.24
ББК 26.3
Т78

Ответственный редактор
академик *Ю.Г. Леонов*

Редакционная коллегия:
М.Г. Леонов (главный редактор), *Ю.О. Гаврилов*, *Ю.В. Карякин*, *М.А. Ахметьев*, *К.Е. Дегтярев*, *Ю.Г. Леонов*, *М.А. Семихатов*, *С.Д. Соколов*, *М.Д. Хуторской*

Рецензенты:
доктор геолого-минералогических наук *М.А. Гончаров*,
доктор геолого-минералогических наук *В.Г. Трифонов*

Труды Геологического института / Геол. ин-т РАН. – М. : Изд-во АН СССР, 1932–1964. – М. : Наука, 1964. – ISSN 0002-3272.
Вып. 582 : Энергонасыщенность геологической среды / В.С. Пономарев; [отв. ред. Ю.Г. Леонов]. – 2008. – 379 с. – ISBN 978-5-02-036642-8 (в пер.).

Геологическая среда способна преобразовывать различные виды энергии в потенциальную энергию упругих деформаций и формировать за счет этого собственный энергетический потенциал, – вплоть до перехода среды в сильно неравновесное, энергонасыщенное состояние. Изучение механики энергонасыщенных сред обусловило возникновение системы качественно новых понятий, а именно: фиксированные упругие деформации, зонная релаксация, хрупкое последействие, зависимость характера разрушения от вида энергоснабжения и др. Состояние геологической среды по содержанию накопленной упругой энергии является ее важнейшей, но почти не изученной фундаментальной характеристикой. Концепция энергонасыщенности геологической среды, развиваемая в данной работе, приводит к принципиально новой точке зрения на природу сейсмических и тектонических процессов, и имеет отношение к широкому кругу явлений и практических проблем, рассматриваемых в науках о Земле.

Для геологов, геофизиков и горняков широкого профиля.

По сети «Академкнига»

ISBN 978-5-02-036642-8

© Геологический институт РАН, 2008
© Пономарев В.С., 2008
© Российская академия наук и издательство «Наука», продолжающееся издание «Труды Геологического института РАН» (разработка, оформление), 1932 (год основания), 2008
© Редакционно-издательское оформление. Издательство «Наука», 2008

ПРЕДИСЛОВИЕ

Деформации в телах горных пород различного масштаба – от земной коры до отдельных массивов – описываются, как правило, с позиций физики (механики) сплошной среды, в первом приближении однородной и деформируемой за счет приложения внешних сил. Справедливость данного подхода редко ставилась под сомнение, и такое отношение к геологической среде в целом сохраняется до настоящего времени.

Все же заметные сдвиги в последние десятилетия произошли. Благодаря работам некоторых исследователей в тектонике пришло осознание того, что геологическая среда и происходящие в ней процессы деформации обладают рядом особенностей, которые не вполне адекватно, во всяком случае, не всегда и не во всем, укладываются в классические представления. Вводятся новые понятия, формулируются нетрадиционные подходы. Из числа новаторских работ такого рода назову работы А.В. Николаева, С.В. Гольдина, касающиеся иерархического устройства геологической среды и действия в ней законов мезомеханики, М.А. Гончарова, В.Г. Талицкого, развивающих представления о структурированной геологической среде, и пр. Приведенными именами не исчерпывается перечень ученых, внесших новые мотивы в понимание фундаментальных свойств геологической среды, но их работы чрезвычайно важны и хорошо характеризуют новые тенденции в изучении деформаций в геологических объектах. В этот ряд следует, на мой взгляд, поместить и предлагаемую книгу В.С. Пономарева, посвященную проблемам энергонасыщенности геологической среды. Работа В.С. Пономарева выделяется тем, что в ней, что бывает нечасто, предлагается новый подход, правильнее даже сказать – новая идеология решения проблемы энергетики тектонических процессов и многих вытекающих из этого следствий.

Хотелось бы в предисловии обратить внимание на некоторые моменты, что, возможно, окажется полезным для правильного восприятия идей автора. Прежде всего, это относится к двум положениям, касающимся источников сил и энергии. Во-первых,

следует иметь в виду, что автор, акцентируя роль латентной энергии, не исключает и не преуменьшает значение также внешних по отношению к рассматриваемому объекту сил эндогенной природы, обусловленных вращением Земли и т.д. Просто они в основном остаются за рамками анализа. Во-вторых, не все реально наблюдаемые процессы деформации приписываются действию латентной энергии. Даже, скажем, сейсмичность, проблемы которой автору наиболее близки, не следует (и автор это отмечает) полностью и во всех геодинамических ситуациях относить на счет реализации только латентной энергии.

Не советовал бы слишком придирчиво относиться к геологическим разделам книги. Здесь автор (геофизик, сейсмолог, механик) играет не на своем поле, и кое-что, безусловно, может показаться немного наивным или недостаточно глубоким (хотя по большей части обращение с геологическими данными вполне корректное). В таких случаях критическое отношение окажется правомерным, но хотелось бы, что несогласие с некоторыми решениями не привело к отторжению главного – идейного наполнения книги. Но это не беда: главное состоит в том, что указывается путь для обдумывания. А развить и скорректировать позиции и мысли автора в предлагаемых им ракурсах – дело специалистов-геологов.

Еще одно. В.С. Пономарев ограничивается рассмотрением геологической среды как «твердотельного» объекта. Такого рода ограничения естественны – объять необъятное невозможно. Но надо отдавать себе отчет в том, что это, конечно, выводит из поля зрения многие явления и факторы деформации и геодинамики. Например, за кадром остаются такие сложные и важные аспекты, как влияние на деформацию флюидной фазы. Но это, по-видимому, была бы уже детализация картины, обсуждаемой и нарисованной здесь более крупными мазками.

Возможно, не приходится рассчитывать на то, что книга В.С. Пономарева, нарушающая традиционные подходы, будет встречена аплодисментами со стороны специалистов-механиков. Но уверен, что она найдет понимание, во всяком случае, заинтересует геологов и геофизиков, которыми накоплен большой арсенал данных, не укладывающихся в классические схемы и требующих новых решений.

Хочу дать еще один совет читателю: знакомясь с главами и разделами, непосредственно его интересующими, не пренебречь вводными и вообще общими разделами, где рассматривается суть и идеология развиваемых положений, которые позволяют вникнуть в логику автора. Это важно потому, что вынесенные на суд

читателей представления, как уже было сказано выше, нетривиальны; они во многом разрушают привычные стереотипы и без проникновения в исходные предпосылки и логику автора могут вызвать незаслуженное отторжение.

В заключение замечу следующее. В предлагаемой книге рассматриваются проблемы механики геологической среды. Изложенные теоретические аспекты и приложения теории к решению некоторых геологических задач, чаще в виде контуров того пути, который ведет к решению тех или иных задач (тектонических, геодинамических). Решившись выступить в качестве ответственного редактора книги, я отдаю себе отчет в том, что, не будучи специалистом в области механики, не могу претендовать на роль компетентного судьи в этих компонентах работы. Но все же геологическая среда – это объект моей профессиональной научной деятельности, и я достаточно знаком с проблемами, трудностями исследования и понимания причин и механизмов происходящих в ней деформаций, реконструкции кинематических обстановок и определения действующих сил. Поэтому мне, думается, по силам оценить значение выполненного В.С. Пономаревым исследования в этом направлении и ценность его общей концепции. К тому же можно полагаться и на мнения рецензентов, внимательно просмотревших рукопись. В части физики, механики это относится, прежде всего, к М.А. Гончарову, который высказал ряд серьезных замечаний и соображений, способствовавших улучшению работы, но не поставил под сомнение состоятельность концепции.

Ю.Г. Леонов

ВВЕДЕНИЕ

Каждый этап развития того или иного научного направления или нескольких идеологически сблокированных между собой направлений характеризуют общие фундаментальные начала, в поле которых формируются и выбор объектов исследования, и методические подходы к их исследованию.

Во взгляде на природу сил, действующих в земной коре, существуют две противоположные точки зрения, ознаменованные именами двух выдающихся отечественных геологов – В.И. Вернадского и М.М. Тетяева. Позиция первого: земная кора является самодовлеющим целым, обладает определенной организованностью, автаркией; процессы в ней начинаются и в ней кончаются [Вернадский, 1983]. Концептуальная установка второго, высказанная тогда же, в 30-е гг., прямо противоположна. М.М. Тетяев не признавал активности земной коры, рассматривал ее как пассивный субстрат, подверженный действию внешних по отношению к ней механических сил [Тетяев, 1934].

Опыт развития науки – геологии в особенности – свидетельствует о том, что научная истина гораздо чаще проявляется в симбиозе крайностей, чем в их противостоянии. Тем не менее, разветвляясь множеством рукавов по обширнейшему тальвегу фактов, главное русло развития геологии как бы меандрирует между берегами полярных точек зрения. Используя эту метафору, можно сказать, что в течение нескольких последних десятилетий главное русло представлений о природе тектонических сил протекало вплотную у коренного берега, очерченного М.М. Тетяевым.

В контексте традиционных понятий земная кора представляется субстратом, который способен лишь пассивно воспринимать и передавать усилия, приложенные к нему извне. Представление об энергетической пассивности геологической среды доминировало в качестве организующего центра соответствующих научных исследований, проводимых в этой области. Однако в последнее время здесь наметилось движение к принципиально другой установке: частью исследователей геологическая среда стала рассматриваться как энергетически активная, т.е. и как энергетический носитель, и как энергетический преобразователь.

Взгляд на геологическую среду как на энергетически активную без употребления именно этого определения не является принципиально новым. Интерес к проблематике энергонасыщенности геологической среды в ретроспекции волнообразно то возрастал, то убывал, причем на этом фоне случались спорадические всплески. На различные проявления феномена энергонасыщенности в разное время указывали многие исследователи и исследовательские группы, равно как ими предпринимались и попытки к изучению этого феномена. Однако такие взгляды отклика в современном им научном сообществе не находили.

Особенность новых веяний времени в том, что взгляд на геологическую среду как на энергетически активную стал принимать характер прогрессирующего развития. В научном сообществе возник и необратимо развивается процесс, который, видимо, со временем приведет к становлению нового организующего центра – нового научного направления, нацеленного именно на изучение энергетической активности геологической среды.

Автор не отстаивает полную оригинальность развиваемого им представления об энергонасыщенности геологической среды. Зачатки такого подхода в той или иной форме можно найти в работах множества авторов, что и обсуждается далее в соответствующих разделах текста. Разные исследователи, заинтересованно относившиеся к феномену энергонасыщенности, исходили из личного профессионального опыта и выношенных ими научных взглядов, а также из тех исследовательских возможностей, какими они располагали. Работы эти, однако, оставаясь в стороне от основного русла развития геомеханики, в отношении проблемы энергонасыщенности как целого имеют частный и разрозненный характер. Единой теоретической платформы во взгляде на природу энергетического ресурса, на механизмы его накопления и высвобождения пока нет. Настоящая работа и представляет собой попытку придать этому разрозненному материалу системное единство.

Что касается автора настоящей работы, то он пришел к пониманию важнейшей роли собственных энергетических ресурсов реальной геологической среды в их влиянии на ее механическое поведение в процессе попыток уяснить физику сейсмических явлений. Однако со временем становилось все ясней, что диапазон явлений, прямо или косвенно обусловленных энергонасыщенностью среды, гораздо более широк.

Интерес к явлению энергетической активности геологической среды и средствам ее изучения был центральным стержнем научных интересов автора на протяжении нескольких десятков лет. Впервые свое видение проблемы он выразил в форме *прин-*

ципа активности горных пород. Формулировка принципа активности была опубликована в 1969 г. в материалах I Всесоюзного симпозиума по сейсмическому режиму, состоявшегося 12–17 декабря 1966 г. в г. Душанбе. Само понятие «энергонасыщенность геологической среды», вынесенное в заглавие настоящей книги, стало употребляться автором с конца 80-х – начала 90-х гг. минувшего века (см., например, [Пономарев, 1991б]).

Представление об энергонасыщенности геологической среды создаёт предпосылку для принципиальных подвижек в решении таких насущных проблем практики, как прогноз землетрясений, качественное сейсмическое районирование, предотвращение горных ударов в шахтах и мн. др. Оно позволяет сформировать принципиально новый взгляд на структурную эволюцию, строение и геодинамику земной коры со многими вытекающими из этого практическими последствиями. Этой тропой можно быстрей взойти на перевал, с которого станет видна черта совершенно нового горизонта. Наконец, это просто интересно.

В настоящей работе затронуты мысли, факты, натурные наблюдения и результаты эксперимента – плоды интереснейшей, захватывающей поисковой работы, длившейся несколько десятилетий. Она рассчитана на широкий круг читателей, естествоиспытателей по духу, в первую очередь, на геологов, горняков и геофизиков. Автору думается, что они найдут в ней материал для творческих созвучий с их опытом.

Ряд экспериментальных результатов, использованных в работе, был получен исследовательскими группами, поименный состав которых отражен в соответствующих ссылках. Разработке отдельных положений способствовали отчасти соавторство, отчасти активное и плодотворное обсуждение с С.Д. Виноградовым, В.К. Кучаем, В.И. Макаровым, А.В. Николаевым, А.Я. Повзнером, Г.С. Подъяпольским, А.Н. Ромашовым, В.Г. Трифоновым. Всем этим лицам автор глубоко благодарен уже за одно удовольствие творческого общения с ними. Автор искренне благодарен за продуктивные замечания М.А. Гончарову, внимательно прочитавшему рукопись. Особую благодарность автор испытывает к акад. АН СССР М.А. Садовскому, чл.-кор. РАН А.В. Николаеву и акад. РАН Ю.Г. Леонову. Без их всесторонней поддержки на разных этапах научной деятельности автора невозможна была бы сама эта деятельность.

Автор выражает также признательность Е.В. Архиповой и Б.Б. Архипову, оказавших большую помощь в процессе работы над рукописью.

ВВОДНЫЕ СВЕДЕНИЯ

1-1. ОБЩЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Под *геологической средой* в настоящей работе понимается вещество, из которого состоит наша планета, по крайней мере, в той её части, где заметны признаки его вовлечения в геологическую деятельность.

Чем оправдано употребление этого понятия?

Вещество Земли многоэтажно, иерархически структурировано. При переходе с одного уровня структурной организации на другой, помимо каких-то общих, трансмасштабных свойств и особенностей, на каждом уровне наблюдается своя специфика. В случае надобности подчеркнуть эту специфику мы и станем указывать на соответствующий уровень, говоря о минералах, горной породе или земной коре. В частности, термин «горная порода» будет применяться преимущественно к обозначению вещества верхнего слоя земной коры, доступного для прямого техногенного внедрения горными выработками или буровыми скважинами. Если же акцента на специфике не требуется, то удобнее употреблять общий термин – геологическая среда.

Геологическая среда включает в себя твердую, жидкую и газообразную составляющие. Однако мы будем рассматривать только те аспекты ее механического поведения, в которых она ведет себя как твердое тело, или, говоря языком представлений термодинамики, как *твердотельная система*. Это не означает, что мы отрицаем влияние газовой и жидкой составляющих на механические свойства геологической среды. С одной стороны, этой проблеме посвящены многочисленные работы и охват ее в должной мере занял бы слишком много места. С другой стороны, автор непосредственными исследованиями в этой области не занимался и ограничился указанным частным аспектом.

Под словом «энергия» понимают меру движения вещества и способность производить работу. Различают разные виды энер-

гии – химическую, электрическую, механическую, ядерную, тепловую, солнечную и т.д. Кроме таких общеупотребительных определений разных видов энергии, применительно к специфическим объектам, иногда виртуальным, вводятся и другие определения. Говоря об «энергонасыщенности», мы будем в дальнейшем иметь в виду один и тот же вид энергии, содержащейся в деформированных твердых телах, – *потенциальную энергию упругих деформаций*, или, коротко, *упругую энергию*.

При этом под *энергонасыщенной геологической средой* далее понимаются ее объемы, в которых плотность упругой энергии превышает некоторое *пороговое* значение. Предварительно заметим, что механическое поведение геологической среды в энергонасыщенном состоянии резко отличается от ее поведения в состоянии не энергонасыщенном.

В термодинамике, ныне представляющей собой общую теорию процессов, твердые тела называют *твердотельными системами*. Соответственно, энергонасыщенные твердые тела или объемы геологической среды мы будем называть *энергонасыщенными системами (ЭНС)*. Различным особенностям механического поведения ЭНС и посвящена настоящая работа.

Запас упругой энергии теоретически вплоть до значений, которые переводят материал в энергонасыщенное состояние, может быть создан в упругих телах действием внешних сил, приложенных к телу. При снятии же внешних сил упругая энергия, запасенная телом, тотчас высвобождается, следуя за изменениями внешней нагрузки.

Довести горную породу до энергонасыщенного состояния действием внешних сил затруднительно: обычно нагружаемое тело разрушается раньше, чем его субстрат достигает энергонасыщенного состояния.

Природа реализует другой путь достижения энергонасыщенного состояния – более эффективный. Он состоит в способности горных пород и твердых тел вообще механически связывать, накапливать и длительно хранить запасы упругой энергии. Такую связанную веществом упругую энергию называют *скрытой, собственной,* или *латентной, энергией*. Она может длительно сохраняться в теле и после того, как факторы, сообщившие её телу, больше на него не действуют. В этом отношении твердое тело можно сравнить с электрическим аккумулятором, который способен длительно хранить электрическую энергию в автономном режиме при его полном отключении от внешней системы энергоснабжения.

Чтобы подчеркнуть различия между упругой энергией, наличие которой в теле обеспечивает непосредственное действие внешних сил, и латентной энергией, обратимся к такой аналогии.

Когда мы взвешиваем груз на обычных пружинных весах, пружина растягивается и запасает этим упругую энергию. Когда мы снимаем груз, пружина тотчас, практически мгновенно (со скоростью распространения упругих волн), возвращается в исходное недеформированное состояние. Этот вид энергии традиционно имеется в виду в работах, касающихся деформирования геологической среды.

В качестве сравнения, которое иллюстрирует способность твердотельных систем связывать упругие деформации, могут служить обычные механические часы. После того как их «завели» – сообщили их пружине запас упругой энергии – энергия, запасенная пружиной, сохраняется в часовом механизме и после того, как его отключили от внешнего источника энергоснабжения. Другими словами, когда фактор, вызвавший в системе появление упругой энергии, больше на систему не действует. Часовой механизм далее работает в автономном режиме, «самопроизвольно», без дальнейшей «закачки» энергии, постепенно расходуя собственный энергетический потенциал на приведение часового механизма в движение – система «релаксирует». Сообщенный некогда часам собственный энергетический ресурс затем дозировано во времени расходуется на работу против внешних сил.

Способность твердых тел запасать упругую энергию обусловлена упругими деформациями, которые фиксируются их субстратом. Латентная энергия – это и есть упругая энергия, запасенная за счёт *фиксированных упругих деформаций*. Образно говоря, она как бы «застревает» в твердом теле. В дальнейшем, говоря об энергонасыщенности твердых тел, мы, по умолчанию, и будем иметь в виду, что это состояние достигается за счет фиксированных упругих деформаций, т.е. что среда располагает *собственным энергетическим потенциалом*, запасенным ею в форме латентной энергии.

Иногда в понятие «латентная энергия» включают и другие виды внутренней энергии твердотельных систем. В настоящей работе это понятие применяется исключительно в отношении упругой энергии, содержание которой обеспечивают фиксированные упругие деформации.

1-2. БЛИЗКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Среди исследователей последнего времени становится все более распространенной мысль о необходимости смены теоретических парадигм, курирующих развитие наук о Земле. В работе [Володин, 2003, с. 5] отмечается, например: «Для понимания геофизических процессов нужно создать новую парадигму, которая существенно бы приблизила к природе модели геосреды и геодинамических процессов. Пожалуй, это должно стать главной проблемой развития геофизики XXI века». По выражению А.В. Николаева, «дух обновления, возникшего в 70-х–80-х годах, ощущается с каждым днем все сильнее» [Николаев, 2003, с. 7]. В цитируемых работах намечены и эскизные контуры будущей парадигмы.

Кроме такого рода работ общего плана, в последнее время возникли новые и более конкретные направления во взгляде на процессы, влияющие на механическое поведение геологической среды. К таковым, например, можно отнести положения мезомеханики; положения механохимии, в которых обращается внимание на резкое изменение механических свойств пород, связанное с химической природой преобразований, протекающих в геологической среде; разработки, в которых подчеркивается важная роль флюидов и порового давления в механических процессах, протекающих в недрах Земли; представление об ударном сжатии и сопряженных с ним процессах, равно как и другие частные направления, среди которых, возможно, содержатся уже те зерна, которые в своем развитии составят ядро будущей всеохватывающей парадигмы.

Настоящая работа выполнена в рамках одного из таких частных направлений, в которых предпринимаются попытки «нащупать» новые пути к пониманию того, что происходит в недрах нашей планеты и далеко за эти рамки не выходит. Главной мыслью этого направления является положение, согласно которому геологическая среда может обладать собственным энергетическим потенциалом, представленным накопленной ею упругой энергией. Обзоры, помещенные в настоящей работе, посвящены только тем исследованиям, которые в той или иной форме явно или неявно допускают это основное положение.

В оперативный словарь современного исследователя в области наук о Земле как знамение нового времени вошел ряд таких терминов и связанных с ними комплексов представлений и методических подходов, как «нелинейность», «синергетика», «фрактальность». В этом ряду стоит и термин «энергонасыщенность».

Нередко разные исследователи вкладывают в такие терминологические новообразования своё понимание, подчас весьма отличающееся от того смысла, какой вкладывают в эти термины другие исследователи. Это касается и термина «энергонасыщенность». В данном употреблении наблюдается та же общая тенденция к его неоднозначному пониманию. С другой стороны, ряд исследователей по существу касались феномена энергонасыщенности в том смысле, в каком он освещен в настоящей работе, но использовали для этого другую понятийную базу.

Подчеркнем еще раз: в ряду различных смыслов, вкладываемых в термин «энергонасыщенность», в настоящей работе речь идет лишь о том виде энергонасыщенности, который обеспечивает наличие в твердых телах потенциальной энергии упругих деформаций выше некоторого порогового значения. Термин «энергонасыщенность» используется нами как краткая форма выражения, обозначающего высокую концентрацию энергии *только этого вида.*

В науках о Земле среди подходов, оказывающих ныне наиболее значительное влияние на становление представления об энергетической активности среды, следует указать на представление о *геофизической среде,* развитое творческой группой, которую возглавлял академик М.А. Садовский. В его понимании, в отличие от традиционных континуальных представлений, геофизическая среда структурирована.

Первоначально под геофизической средой понимали ту же геологическую среду, но отраженную в ее геофизических характеристиках. Однако в представлениях М.А. Садовского этот исходный смысл был трансформирован. В его понимании геофизическая среда – это, прежде всего, структурный ансамбль блоков различного масштаба. По М.А. Садовскому, отдельные блоки, образующие систему, в разной степени энергонасыщены теплом, движением и энергией физико-химических связей. Энергия, поступающая извне, может способствовать тому, что некоторые из них достигнут неустойчивости и сбросят излишек энергии в виде упругих волн. В процессе непрерывной подпитки энергией эта система самоорганизуется в диссипативную структуру, имеющую самоподобный иерархический характер [Садовский и др., 1987].

Как видно из приведенной выдержки, основным моментом представления о геофизической среде является допущение о ее системной структурной организации. Хотя геофизическая среда представляется энергонасыщенной, источники, снабжающие ее энергией, в духе существующей традиции, по-прежнему полага-

ются внешними. Многочисленными учениками и последователями М.А. Садовского рассматриваются преимущественно различные кинематические схемы переорганизации ансамблей блоков среды в поле внешних сил, выражающейся в своеобразном пульсировании среды, которое отражает накопление энергии и ее диссипацию. В частности, при этом широко используются известные положения механики грунтов, или положения нового направления в механике – мезомеханики. Представление о направленности в развитии идей М.А. Садовского можно получить из публикаций в журнале «Физика Земли» № 4 за 2004 г. Материалы посвящены 100-летию со дня рождения этого выдающегося геофизика.

Весьма близки нашим построениям представления, развиваемые в химии кластеров. Химия кластеров – в том числе и в ее геохимических приложениях – быстро развивающееся научно продуктивное новое направление.

Кластеры – включения скоплений частиц, инородных относительно вещества несущей матрицы. Они, в частности, играют значительную роль в процессе минералообразования, флюидного переноса, экстракции металлов из горных пород. Кластер является ярко выраженным энергоносителем, а форма и структура в матрице носят неравновесный характер. В.В. Федоров и И.В. Тананаев [1987] выделяют кластерные агрегаты в особенный класс энергонасыщенных систем (ЭНС).

Особый интерес представляют линейные тектонические зоны, в которых проявлен стресс. В этом случае в слагающих породы минералах возникают и длительно существуют ансамбли дефектных структур – дислокаций, дисклинаций, вакансий, микротрещин и микропор, которые эволюционируют и переходят друг в друга. Всегда это энергонасыщенные неравновесные состояния, локально уравновешенные с окружающей их матрицей и характеризуемые значительным временем релаксации [Летников, 1992].

Термин «энергонасыщенность», или «энергонасыщенные системы», используется в химии кластеров в том же смысле, что и нами – для обозначения сильно неравновесных объемов среды. Следует, однако, иметь в виду: в химии кластеры рассматриваются на субмикроскопическом уровне – на уровне трансформаций химических связей. Рассматриваемые же нами *механические ЭНС* образуют иерархический ряд, который, начинаясь на уровне дефектов кристаллических решеток, последовательно достигает уровня геологических структур регионального и глобального масштабов.

Ряд исследователей в своих взглядах на существо процессов, происходящих в геологической среде, исходили из допущения, согласно которому объемы геологической среды располагают собственным энергетическим потенциалом. Это допущение иногда выражено явно, иногда его можно вывести из контекста развиваемых положений. Таковы представления об автокаталитическом распаде поля напряжений, о самопроизвольном разрушении, нелинейных эффектах при структурообразовании, «бескорневой» тектонике, структурной самоорганизации среды и др. Некоторые из таких представлений будут особо рассмотрены в различных разделах настоящей работы. Здесь же в качестве примера сошлемся на обстоятельный обзор представлений о самоорганизации геологической среды, составленный А.В. Лукьяновым [2002].

В основе обзора лежит мысль А.В. Пейве о том, что упорядоченность геологических структур во многих случаях обязана не только организующему влиянию внешних воздействий, а отражает самоорганизацию геологической среды в процессе структурообразования.

А.В. Пейве не употреблял слова «самоорганизация», но уже в 1961 г. сформулировал положение, из которого следует неизбежность самоорганизации геологической среды. «Именно в наблюдающейся известной самостоятельности перемещения по крайней мере крупных структурно обособленных однородных блоков земной коры и заключается главная особенность тектонических движений. Все тектонические теории до сих пор не знали такого механизма движений земной коры, т.е. не считались с тем, что каждый блок обладает как бы самостоятельной «движущей силой», заключенной в нем самом» [Пейве, 1961. С. 42].

Из работ, близких, если не букве, то духу, представления об энергонасыщенности геологической среды, прежде всего следует отметить работы А.В. Лукьянова [1999], в которых рассмотрены нелинейные эффекты в моделях структурообразования.

В сводке [Гончаров и др., 2005] дан обзор развитого авторами представления о структурных парагенезах как результате процессов самоорганизации в деформируемой геологической среде.

В работе Б.Н. Достовалова [1965а] на материале закономерностей образования трещин в вечной мерзлоте развито представление об объемно-градиентных напряжениях и заложены основы анализа самопроизвольного структурирования геологической среды (впоследствии развитие этого направления привело к созданию представления об образовании систем трещин вследствие разгрузки собственного энергетического потенциала среды, выраженного потенциальными функциями [Зимов, 1993]).

Наконец, в обзоре А.В. Лукьянова упомянут и В.С. Пономарев как исследователь, сформулировавший принцип активности горных пород, рассматривающий геологическую среду как энергетический носитель и энергетический преобразователь. Более детальное освещение представлений упомянутых исследователей можно найти далее в соответствующих разделах текста.

1-3. ПРОБЛЕМАТИКА

Очертим круг основных проблем механического поведения энергонасыщенной геологической среды.

В качестве наглядной иллюстрации проявления энергонасыщенности приведем один выразительный факт. Его в числе других примеров энергетической активности пород привел К.И. Богданович [1909].

Глыбы горной породы, добытые при проходке Симплонского туннеля в Альпах, извлекались на дневную поверхность. Спустя какое-то время они начинали самопроизвольно взрываться уже в отвалах без всякой видимой причины. При этом осколки пород разлетались с такой силой, что во избежание несчастных случаев среди публики, из любопытства посещавшей отвал, вокруг него было поставлено ограждение.

Отметим на примере этого случая ряд самоочевидных проявлений энергонасыщенности, которые, вместе с тем, определяют круг вопросов, касающихся механической стороны этих проявлений.

Первое. Глыбы горной породы были полностью изолированы от вмещающего их массива. Тем не менее, они обладали *собственным энергетическим ресурсом, собственным энергетическим потенциалом,* достаточным для того, чтобы процесс *энергетической разгрузки* глыб смог приобрести лавинообразный, взрывоподобный характер.

Заметим, что нагрузить образец горной породы внешней нагрузкой настолько, чтобы разрушение его приняло характер взрыва, возможно только в отношении прочнейших пород, главным образом из-за того, что прочность реальных пород вследствие имеющихся в них дефектов по отношению к их «теоретической» прочности резко снижена. По этой причине образцы обычно разрушаются в процессе нагрузки внешними силами до того, как их субстрат перейдет в энергонасыщенное состояние. Каким образом реальные породы, насыщенные дефектами, в состоянии накапливать столь значительный энергетический потенциал,

достаточный для их взрывоподобного разрушения? Какова его природа?

Второе. Само существование собственного энергетического потенциала, независимого от внешних сил, действующих в данный момент времени на данное тело, говорит о том, что существует какой-то механизм связывания, *фиксации упругих деформаций* субстратом горной породы. Что это за механизм?

Третье. Процесс разрушения *самопроизволен.* Он протекает за счет запасенной энергии, без значимого ее притока уже в процессе разрушения. Другими словами, он имеет ярко выраженный релаксационный характер. Заметим, что в традиционной геомеханике рассматривается главным образом только *принудительное* разрушение, обусловленное действием внешних сил, энергетические источники которых находятся вне разрушаемого субстрата. Поскольку в традиционных представлениях процесс релаксации полагают протекающим без разрывов сплошности, само сочетание понятий «разрушение» и «релаксация» в рамках традиции звучит как нонсенс. Процесс релаксационного разрушения практически не изучен. Какова структурная выраженность процесса *самопроизвольного, релаксационного* разрушения? Каковы его особенности?

Четвертое. В процессе разрушения тело расчленяется трещинами хрупкого отрыва на отдельные *фрагменты* – на *отдельности.* Другими словами, разрушение протекает по *сценарию фрагментации.* Этот сценарий резко отличается от сценариев разрушения, рассматриваемых в рамках существующей традиции. Каковы причины расчленения материала на обособленные фрагменты в процессе разрушения, каковы закономерности разрушения, следующего сценарию фрагментации?

Пятое. Разрушение протекает *динамично:* процесс образования трещин отдельности принимает характер взрыва и сопровождается излучением упругих волн, т.е. оно имеет сейсмический характер. Какова кинетика и динамика высвобождения собственного энергетического потенциала геологической среды? Какова возможная выраженность этого процесса в сейсмичности как природной, так и наведенной техногенными воздействиями?

Шестое. Глыбы породы взрывались не тотчас после выемки. Их разрушению предшествовал некоторый *инкубационный период,* длительность которого мы будем называть *временем задержки.* Какова природа этого явления? Какова возможная выраженность этого явления в сейсмическом режиме самопроизвольно разрушающегося тела?

Хотя перечисленные задачи исследования сформулированы на уровне очевидности, каждая из них представляет собой достаточно сложную научную проблему, требующую значительных исследовательских усилий. Но главное в другом: приведенные исследовательские задачи не существуют в постановке даже в отношении энергонасыщенных тел, изолированных от породного массива. Если же такие тела находятся во вмещающем пространстве, представляя собой энергонасыщенные включения, слои или зоны, то поставленные вопросы, не теряя в своем существе, резко теряют в своей очевидности.

Обычно эффекты, обусловленные энергонасыщенностью среды, рассматривают как малосущественные экзотические особенности, не имеющие большого значения ни в качестве характеристики состояния геологической среды, ни в качестве фактора, принимающего заметное участие в сейсмической и тектонической жизни Земли. Общая цель этой работы – показать, что энергонасыщенность является одной из основных характеристик физико-механического состояния геологической среды, имеющая в геологическом развитии Земли фундаментальное значение.

1-4. НОВОВВЕДЕНИЯ

Поскольку изучение энергонасыщенности геологической среды находится на зачаточном уровне, решение проблем, связанных с ее механическим поведением, потребовало ряда терминологических нововведений. Первым в их ряду является представление о фиксированных упругих деформациях.

Механизмы фиксации упругих деформаций подробно будут рассмотрены далее. В общих же чертах смысл этого термина в следующем.

Помимо упругих деформаций, которые немедленно возникают под действием внешней силы и немедленно исчезают по прекращении ее действия, твердые тела способны фиксировать упругие деформации и длительно в себе их сохранять, в том числе и в случае, если причины, вызвавшие их появление, больше не действуют. *Фиксированные упругие деформации* могут возникать как под действием внешних сил, так и в результате структурно-вещественных преобразований немеханической природы, протекающих непосредственно в субстрате твердотельных систем. Обусловленная ими потенциальная энергия *(латентная энергия)* составляет *собственный энергетический потенциал*

этих систем. По достижении латентной энергией некоторого порогового значения тела переходят в сильно неравновесное, метастабильное, энергонасыщенное состояние.

Механическое поведение среды в ее энергонасыщенном состоянии отличается резким своеобразием, наиболее характерными чертами которого является динамический характер разрушения и фрагментация разрушаемого субстрата. В процессе изучения проявлений энергонасыщенности, помимо представления о фиксированных упругих деформациях, был разработан ряд системно между собой связанных качественно новых представлений: *о зонной релаксации, хрупком последействии, структурном стереотипе зон разгрузки, зависимости характера разрушения от вида энергоснабжения,* разрушении, протекающем по сценарию *фрагментации.*

Бегло о смысле указанных нововведений.

Энергонасыщенные системы – сильно неравновесные системы. Переход системы к равновесию осуществляется в результате ее *энергетической разгрузки* – самопроизвольно развивающегося процесса релаксации (высвобождения) латентной энергии, который может возникнуть самопроизвольно, в процессе энергетически-структурной эволюции системы, но может быть возбужден и внешним воздействием. Этот процесс начинается не одновременно во всех точках релаксирующего тела. Вначале он локализован в сравнительно узкой *зоне разгрузки (зоне релаксации),* вблизи разгружаемой поверхности, и лишь затем фронт релаксации, постепенно замедляясь, перемещается в глубину разгружаемого тела. Вследствие этого *время релаксации системы зависит от ее размеров,* а полная релаксация системы достигается на отрезках времени, продолжительность которых *на порядки* превосходит количественные экспериментально обоснованные оценки времени релаксации, принятые в науках о Земле.

В механике деформируемого твердого тела известно явление *упругого последействия.* Оно состоит в способности *вязко-упругих* тел фиксировать упругие деформации, которые после снятия нагрузки релаксируют, вследствие чего деформированное тело с течением времени восстанавливает свою исходную форму. В *хрупких* горных породах этот процесс протекает не вязко, без разрывов сплошности, а сопровождается их разрушением, растрескиванием, структурной дезинтеграцией. Это явление в параллель упругому последействию определено нами как *хрупкое последействие.* Процесс хрупкого последействия сосредоточен в зонах разгрузки, вследствие чего геологические тела вблизи поверхностей разгрузки окаймлены оболочками дезинтегрированного материала.

Процесс релаксации имеет определенную и специфическую структурную выраженность, одной из наиболее распространенных форм которой является расчленение релаксирующей среды на определенным образом организованную систему фрагментов. Структура трещиноватости в зонах релаксации однотипна и формируется во времени. Трещины первых генераций огрубленно повторяют форму поверхности разгрузки и образуют системы трещин, расстояния между которыми убывают по мере удаления от поверхности разгрузки примерно по экспоненте. Трещины последующих генераций расчленяют образовавшиеся породные пластины на отдельные блоки или фрагменты иной формы. Вследствие этого степень раздробленности пород в зоне разгрузки наиболее высока вблизи поверхности разгрузки, где материал переработан трещинами всего спектра их генераций. По мере удаления от зоны интенсивной переработки длина трещин в среднем возрастает, а их ориентировка становится более упорядоченной. Указанный *структурный стереотип* может быть в большей или меньшей мере искажен другими сопутствующими процессами, но он прослеживается в самых различных натурных и техногенных ситуациях на всех масштабных уровнях геологической среды.

Экспериментальными исследованиями установлено, что характер разрушения зависит от вида энергоснабжения элементов разрушаемых систем. Четко различаются по влиянию на характер разрушения два вида энергоснабжения: *зависимое* и *независимое*. К системам с зависимым энергоснабжением относятся системы с *последовательным энергоснабжением* (одноосное растяжение, изгиб и др.). Именно разрушение систем этого вида использовалось в качестве экспериментальных прототипов традиционных сценариев разрушения, в том числе и сценариев разрушения геологической среды.

К системам с независимым энергоснабжением относятся системы с *параллельным* и *автономным энергоснабжениями*. Примером первых являются композитные и двухслойные системы. Энергонасыщенные среды относятся к системам с автономным энергоснабжением. Разрушение подобных систем протекает в соответствии со сценарием фрагментации, который по основным своим особенностям резко, качественно отличается от общепринятых сценариев. По результатам наших исследований, именно этот сценарий реализуется в процессе структурной дезинтеграции геологической среды.

1-5. ФИКСИРОВАННЫЕ УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ

1-5.1. Определения

Хотя представление об упругих фиксированных деформациях твердотельных систем в терминологическом отношении является нашим нововведением, способность твердых тел фиксировать, механически в себе связывать упругие деформации известно давно.

Уточним положение термина в контексте существующих представлений.

Под влиянием сил, приложенных к твердому телу, расстояния между его точками меняются. Вследствие этого тело изменяет свой объем и форму – деформируется. Если по прекращении действия силы смещенные точки тела возвращаются в исходное положение, то говорят об *упругих деформациях* тела, если же точки остаются в смещенном положении – об *остаточных деформациях*. Деформации, которые после снятия нагрузки не исчезают, называют также *пластическими*. В общем случае деформирование твердого тела сопровождается возникновением как упругих, так и пластических деформаций, т.е.

$$e = e_{ост} + \varepsilon, \qquad (1)$$

где e – суммарная деформация, а $e_{ост}$ и ε, соответственно, пластическая и упругая деформации.

Однако поведение реальных материалов указывает на то, что следует различать упругие деформации двух видов. В одних случаях смещенные точки тела по прекращении действия силы возвращаются в исходное положение практически мгновенно (со скоростью распространения упругих волн), в других же случаях – с достаточно большой задержкой времени.

Явление затянутого во времени высвобождения упругих деформаций получило название *запаздывающей упругости*, или *последействия* [Работнов, 1979]. «Материалы, обладающие свойством последействия, называют *наследственно-упругими*, или вязкоупругими. Первый термин связан с тем, что поведение таких материалов определяется не только тем воздействием, которое образец испытывает в данный момент, но также историей тех воздействий, которым материал подвергался ранее, в течение всей истории своего существования». Второй термин вытекает из механической модели, содержащей упругие и вязкие элементы. Эта модель используется для описания механического поведения тел со свойствами наследственной упругости.

В дальнейшем будем различать два вида упругих деформаций – деформацию ε_0, немедленно возникающую в теле под действием внешних сил и немедленно исчезающую после прекращения их действия (по Ю.Н. Работнову – *мгновенную деформацию*), и упругие деформации ε_Φ, фиксированные субстратом тела, т.е.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_\Phi. \qquad (2)$$

Механизмы фиксации упругих деформаций в твердых телах будут рассмотрены позже. В классической геомеханике принимают во внимание только упругие деформации, представляющие собой прямой отклик среды на действие внешних сил, т.е. рассматривают частный случай, при котором

$$\varepsilon = \varepsilon_0,\ \varepsilon_\Phi = 0. \qquad (3)$$

Эту деформацию иногда называют «гуковской», т.е. следующей закону Гука. В настоящей же работе внимание будет сфокусировано на фиксированных упругих деформациях и на тех особенностях механического поведения твердых тел, которые наличием этого вида деформаций обусловлены, т.е. на другом частном случае, при котором

$$\varepsilon = \varepsilon_\Phi,\ \varepsilon_0 = 0. \qquad (4)$$

Соответственно, под *латентной энергией* далее будет подразумеваться упругая энергия, запасенная телом за счет упругих фиксированных деформаций. Напряжения, которые обусловлены упругими фиксированными деформациями, мы далее будем называть *латентными напряжениями*

Возвращаемся к вопросу о терминологии.

Определение «вязко-упругий» связано с механической моделью, которая качественно описывает поведение материалов со свойством упругого последействия. Модель близка к модели Максвелла, в которой последовательно соединены упругий и вязкий элементы. В ней лишь вместо вязкого элемента включен элемент, в котором параллельно соединены вязкий и упругий элементы (модель Кельвина).

Для описания поведения материалов со свойствами упругого последействия мы и ввели представление о фиксированных упругих деформациях. Возникает вопрос: поскольку в механике деформируемого твердого тела уже существует представление о запаздывающей упругости, зачем нужны еще какие-то другие терминологические нововведения, дублирующие смысл терминов, уже находящихся в обращении?

Общий ответ на этот вопрос в следующем. Принятый способ рассмотрения явления запаздывающей упругости в рамках модели упруго-вязкого тела правомерен лишь в применении к частному случаю, когда тело запасает упругую энергию под действием внешних сил. Но оно может запасать ее и непосредственно за счет энергетических преобразований, происходящих в самом субстрате твердого тела. Кроме того, в хрупких телах процесс высвобождения их упругого потенциала сопровождается их структурной дезинтеграцией (явление «хрупкого последействия»), что в рамках модели упруго-вязкого тела вообще не рассматривается. При этом с течением времени тело не только восстанавливает свой исходный объем: за счет образования трещин его объем по отношению к исходному возрастает, т.е. тело *разуплотняется*. Введение понятия фиксированных упругих деформаций позволяет судить о физической сущности процесса накопления упругой энергии в твердых телах и его деформировании в процессе ее высвобождения гораздо более адекватно.

Система представлений, основанных на понятии фиксированных упругих деформаций, включает в себя представление об упругом последействии как частное в общее. Используя традиционную терминологию в обновленном смысле, автору пришлось бы снабдить ее столь обширным комментарием, который читатель в процессе чтения просто не смог бы удержать в своей памяти и в понимании дела неизбежно соскользнул на рельсы традиции. Особую важность имеет то, что при использовании принятых нами нововведений физическое существо исследуемых явлений становится более понятным, а методы их описания – проще.

1-5.2. «Силовой» и «энергетический» подходы

Наличие упругих деформаций проявляется в двух формах – в «энергетической» и «силовой» («векторной»). В первом случае оперируют *упругой энергией* (u), во втором – *силами* (F) и *напряжениями* (σ). Соответственно, энергетической функцией фиксированных упругих деформаций является латентная энергия U_Φ, а силовой – латентные напряжения σ_Φ.

Напряжения и упругая энергия – следствие одного и того же явления – упругой деформации. Нет упругой деформации тела в целом или каких-либо его структурных составляющих – в нем нет ни напряжений, ни упругой энергии. «Упругие напряжения» – тавтология, «неупругие напряжения» – нонсенс. И то, и другое – лишь разные эквиваленты того количества работы, которое было

затрачено на упругое деформирование подобно тому, как количество труда, затраченное на изготовление какой-либо вещи, может быть измерено в разных денежных эквивалентах. Упругую энергию путем соответствующих математических преобразований можно выразить посредством напряжений и обратно. Это две разные формы – *силовая* и *энергетическая* – одной и той же физической сущности.

В приложениях механики сплошной среды к механике деформируемого твердого тела по преимуществу развит «силовой» подход. В ней оперируют главным образом «напряжениями». В настоящей же работе наряду с традиционным «силовым» подходом будет применяться и «энергетический», поскольку в рамках тех проблем геомеханики, которые мы будем рассматривать, энергетический подход удобнее: физически нагляднее и аналитически проще.

Говоря об упругой энергии, мы в дальнейшем, за исключением особо оговоренных случаев, будем иметь в виду ее плотность, т.е. ее количество, отнесенное к единице объема тела, и обозначать ее как u.

В общем случае, соответственно выражению (2),

$$u = u_0 + u_\Phi. \tag{5}$$

Здесь u_0 – плотность упругой энергии, обусловленной действием внешних сил. Упругую энергию u_Φ, соответствующую фиксированным упругим деформациям, мы в дальнейшем и будем называть *собственной, скрытой, или латентной, энергией*. Эта энергия может сохраняться в теле и после того, как факторы, сообщившие её телу, больше на него не действуют.

В механике деформируемого твердого тела существует понятие *упругого потенциала U*. Ему соответствует потенциальная энергия упругой деформации, накопленная в теле [Работнов, 1979]. Латентная энергия, таким образом, представляет собой одну из составляющих упругого потенциала. Если «мгновенная» составляющая упругой деформации снимается тотчас по прекращении действия внешней нагрузки, то фиксированные деформации длительно сохраняются в теле. Поэтому среды, содержащие латентную энергию, независимо от действия внешних сил в дальнейшем будут рассматриваться как *энергосодержащие*. Количество латентной энергии в твердотельной системе и определяет ее собственный энергетический потенциал. Он сохраняется в теле и после того, как факторы, вызвавшие ее появление, больше не действуют.

Запас латентной энергии может быть создан в теле действием внешних сил. Но он может быть создан и при полном отсутствии внешних механических воздействий за счет тех или иных энергетических преобразований, которые происходят непосредственно в субстрате данной твердотельной системы.

В качестве иллюстрации этого положения можно привести биметаллические термостаты – двухслойные системы, состоящие из двух прочно скрепленных между собой металлических пластинок с разными модулями теплового расширения. Такие пластинки используются в качестве рабочих элементов тепловых реле. В частности, применяются в бытовых холодильниках. При отклонении температуры от номинальной, той, при которой были соединены пластинки, в их двухслойной системе возникают напряжения, которые и ведут к изгибу системы, тем самым замыкая или размыкая контакты электрической цепи, в которую они встроены. В данном случае причиной появления механических напряжений в двухслойной системе является отклонение ее термодинамического состояния от равновесного.

Подобным образом ведут себя любые другие композитные твердотельные системы, если в них протекают процессы, которые ведут к неодинаковым изменениям метрики составляющих их структурных элементов, т.е. их линейных размеров, площадей контакта или их объемов. Эта тема будет обсуждаться подробно далее. Пока же заметим, что смысл принятых в механике определений – «наследственная», или «запаздывающая», упругость, как и сам термин «последействие», в том, что эти явления рассматриваются как реакция тела на внешние механические воздействия. Вводя термин «фиксированные упругие деформации», мы имеем в виду, что причиной их появления могут стать не только механические воздействия, но и другие – физические или химические – процессы, протекающих в рассматриваемых системах. С этой точки зрения твердотельные структурированные системы представляют собой энергетические преобразователи, в которых энергия различных видов преобразуется в энергию упругих деформаций.

Согласно (3), в традиционной геомеханике рассматривается частный случай, при котором

$$u = u_0,\ u_\Phi = 0. \tag{6}$$

В настоящей же работе основное внимание будет уделено другому частному случаю, при котором

$$u = u_\Phi,\ u_0 = 0. \tag{7}$$

В силовой форме наличию фиксированных упругих деформаций соответствуют латентные напряжения $\sigma_Ф$. Согласно (3),

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_Ф. \quad (8)$$

В классической геомеханике рассматривается случай, при котором

$$\sigma = \sigma_0, \ \sigma_Ф = 0. \quad (9)$$

В настоящей работе основное внимание уделено случаю, при котором

$$\sigma = \sigma_Ф, \ \sigma_0 = 0. \quad (10)$$

Латентные напряжения, как и латентная энергия, определяются фиксированными упругими деформациями. При $\sigma_Ф \neq 0$ или $u_Ф \neq 0$ система термодинамически неравновесна. Наличие латентных напряжений в системе (или латентной энергии) свидетельствует о ее отклонении от состояния термодинамического равновесия. При $\sigma_Ф \gg 0$ или $u_Ф \gg 0$ система сильно неравновесна. Такие системы, находящиеся вдали от состояния равновесия, в дальнейшем мы и называем *энергонасыщенными*.

1-6. ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОСТЬ И МЕХАНИКА СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

У читателя возникнет вопрос: если энергонасыщенность геологической среды является фактом вполне ординарным, то почему изучению этого факта, имеющего статус одной из основных физико-механических характеристик состояния среды, со стороны научного сообщества не уделялось и не уделяется должного внимания. Этот вопрос настолько важен, что мы здесь уделим ему особое внимание. По-своему он не менее важен остальных содержательных моментов этой работы.

Мы уже говорили о том, что определение энергонасыщенности геологического тела in situ само по себе представляет собой достаточно сложную проблему. Очевидный характер явление энергонасыщенности обретает только в телах, полностью изолированных от вмещающего массива. Однако главная причина игнорирования научным сообществом этого явления в другом. Указывая причину этого, мы вынуждены высказать весьма непопулярную точку зрения, которая подчас вызывает резко отрицательную реакцию на нее даже у специалистов, которые полагают изучение явления энергонасыщенности нужным и важным. Но, кроме прямого и ясно выраженного указания на причину сло-

жившегося порядка вещей, мы не видим другой возможности освободить научное видение проблемы энергонасыщенности от гипнотического влияния одной из фундаментальных концептуальных установок – механики сплошной среды. Автор сам обрел эту свободу далеко не сразу, так сказать, в режиме постепенного прозрения.

В общих чертах суть сложившегося порядка вещей в следующем. Механика в ее теоретическом аспекте изучает не реальные среды, а их теоретические модели. В настоящем механику деформируемого твердого тела – геомеханику, в частности, – в теоретическом отношении курирует мощная научная парадигма – *механика сплошной среды* (МСС).

Модели МСС при их почти неисчислимом многообразии основаны на двух фундаментальных гипотезах [Безухов, 1953] – *гипотезе сплошности* и *гипотезе отсутствия начальных напряжений*.

Попутное замечание: при изложении материала мы вынуждены довольно часто прибегать к ссылкам на давние работы. Причина этого в том, что в пору становления современных представлений вопросам обоснования концептуальных установок уделялось больше внимания. В более поздних работах определившиеся в своей основе установки часто подаются как само собой разумеющаяся, удостоверенная данность, обсуждение которой лишено конструктивного смысла.

Согласно гипотезе сплошности, среда предполагается непрерывной. Отрасль механики, использующую в качестве модели среды «континуум», – идеализированную бесструктурную среду без разрывов сплошности (с бесконечным числом степеней свободы любой из мысленно выделенных в ней точек) – называют *континуальной механикой*.

Континуальные модели получили широкое признание прежде всего по той причине, что их описание доступно сравнительно простым средствам дифференциального исчисления. Но их применение к описанию геологической среды, заведомо структурированной, притом на любом масштабном уровне, привело ряд исследователей к мысли, что в рамках континуальных представлений их использование не всегда корректно, что структурированность реальной среды все же надо каким-то образом учитывать. В последнее время в науках о Земле определилось и стало активно развиваться направление, в котором во главе угла теоретических построений принят именно факт структурированности геологической среды – *тектонофизика структурированной среды* [Гончаров и др., 2005]. Большую роль в переоценке приме-

нимости континуальных представлений к описанию реальной геологической среды сыграли также представления о ее делимости («кусковатости»), развитые в трудах М.А. Садовского и его учеников.

В целом, характеризуя состояние исследований, учитывающих дискретное строение среды, можно утверждать, что в наше время установки первого постулата МСС свой жестко конститутивный статус потеряли. Чего нельзя сказать о втором постулате.

«Второй гипотезой, в некотором смысле примыкающей к первой, является гипотеза о естественном ненапряженном состоянии тела; согласно ей, начальные напряжения в теле, существующие до приложения поверхностных нагрузок, характер и величина которых зависят от истории возникновения тела, полагаются равными нулю. Иначе говоря, определяемые в теории упругости напряжения не являются фактическими напряжениями в теле, а составляют лишь прирост напряжений в рассматриваемых точках над начальными (неизвестными) напряжениями в тех же точках» [Безухов, 1953. С. 23].

Начальные напряжения, или латентные напряжения, по принятому нами их обозначению, представляют собой ансамбль множества дискретных элементарных полей напряжений, уравновешенных в пределах зон динамического влияния структурных элементов тела, фиксирующих упругие деформации.

Как и в химии кластеров, элементарные энергоносители дискретны. Также дискретны и возбуждаемые ими элементарные поля латентных напряжений. Как мы это далее увидим, напряжения континуальной механики и элементарные поля латентных напряжений – сущности по своему физическому смыслу принципиально разные, и если мы в их обозначении употребляем одно и то же слово «напряжения», то только в силу сложившейся традиции и стремлением по возможности избегать терминологических нововведений.

Важное обстоятельство: гипотеза об отсутствии начальных напряжений по существу утверждает, что ненагруженные внешними силами тела находятся в состоянии термодинамического равновесия. Другими словами, МСС, по существу заложенных в ней постулатов, является механикой не только сплошной, но и *механикой термодинамически равновесной среды.*

Между тем в физике состояние термодинамического равновесия рассматривается как некоторое идеализированное состояние, неограниченно стремясь к которому как к теоретическому пределу реальные твердые тела никогда его вполне не достигают

[Сейдж, 1962]. Это означает, что без латентной энергии и латентных напряжений реальных твердых тел не бывает. Их наличие является фундаментальным свойством реальных твердых тел.

Создатели основ МСС вовсе не имели в виду, что в природе не существуют реальные твердые тела с наличием начальных напряжений. Просто такие тела они не рассматривали, а создавали теорию применительно к телам, в которых таких напряжений нет или они пренебрежимо малы. Однако в процессе экспансии теории их последователи, игнорируя элементарную очевидность, перешли к более жестким утверждениям.

Таким образом, явление энергонасыщенности среды по своей природе противоречит обеим фундаментальным гипотезам МСС, что и обусловило исключительные трудности в изучении проявлений энергонасыщенности и формирования системы соответствующих представлений. В результате столь резкого различия исходных посылок попытки изучения энергонасыщенных сред многими десятилетиями находились и продолжают находиться в поле тормозящего противодействия со стороны господствующей парадигмы. При всей внутренней согласованности и сильной развитости аппарата механики сплошной среды, при всех успехах ее приложений в самых разных отраслях практики этот метод в приложении к описанию реальной геологической среды требует более взвешенного подхода. По существу он применим к описанию деформируемых твердых тел только в ограниченной области, когда структурой рассматриваемых геологических объектов и их неравновесным состоянием можно пренебречь. При этом по умолчанию предполагается, что среда не располагает собственным энергетическим потенциалом и деформируется только под действием сил, приложенных к рассматриваемому объему среды извне («принцип пассивности горных пород»).

Представления об энергонасыщенности геологической среды используют совершенно иной по своим исходным теоретическим посылкам базис, положения которого дают возможность описывать динамическое поведение и структурирование энергонасыщенной геологической среды, что невозможно в рамках канонических представлений механики сплошной среды, причем в ряде распространенных случаев – не во второстепенных частностях, а в главных, самых существенных чертах.

Одно важное замечание. Представления об энергонасыщенности геологической среды не являются отрицанием установок МСС. Просто в рамках МСС и в рамках развиваемых нами представлений рассматриваются разные стороны явлений, разные

объекты. Но сторонники традиционного подхода рассматривают попытки исследования механики энергонасыщенных сред – физической энергомеханики, как ее можно было бы назвать, как неоправданное и нежелательное вторжение в сферу их профессиональных интересов.

«Парадигма» – одно из ключевых понятий современного науковедения, введенное в обиход Т. Куном. Оно обозначает развитое научное направление со всей его организационной, материально-технической и экономической инфраструктурами. Вместе с тем парадигма – это отнюдь не застывшая, лишенная развития форма знания, как это нередко воспринимается с подачи Т. Куна. На деле – это подвижная, живая, динамично устремленная познавательная система, в которой неизменными сохраняются лишь ее основополагающие принципы.

Установки парадигмы предопределяют стратегию научного поиска, используемые методы и выбор объектов исследования, а также контролируют деятельность отдельных исследователей или исследовательских групп. Попытки нарушить канон – применить в исследовательской работе принципиально иной метод или заняться исследованием явления, которое не входит в утвержденный перечень объектов, – встречает жесткое массированное противодействие со стороны специалистов, составляющих активное, представительное и полномочное научно-организационное ядро сообщества, сгруппированного под эгидой канона. Такого рода попытки, если они предпринимаются членами научного сообщества, воспринимаются как прецеденты нарушения корпоративной этики. Яркие примеры борьбы парадигмы линейной теории упругости – одной из основных ветвей МСС – против «нелинейности», – борьбы весьма жесткой, длившейся без переменного успеха почти триста лет, – читатель может найти в фундаментальном обзоре [Белл, 1984].

Сказанного достаточно, чтобы понять причину того, что плотность информационного поля в разных разделах наук о Земле очень неравномерна. В одних направлениях исследования продвинуты далеко вперед, в других, притом важнейших для практики, они едва начаты или, что еще хуже, сильно искажены неадекватными теоретическими посылками. Наряду с этим существуют целые области, которые подвергнуты весьма эффективной информационной блокаде.

Факты энергонасыщенности реальных твердых тел, равно как и представления, основанные на этих фактах, по своей научной идеологии несовместимы с установками МСС в их традиционной форме. Поэтому научные исследования в этой области

развивались и, к сожалению, продолжают развиваться в крайне неблагоприятном теоретическом и научно-организационном климате. Изучение естественной энергонасыщенности, несмотря на всю важность и универсальность этого состояния геологической среды, протекало и протекает медленно и трудно. Ему противостоит одна из самых мощных парадигм в науке – механика сплошной среды.

Завершая экскурс, сделаем еще одно общее замечание. Из теории эволюции известно, что если в системе, состоящей из подсистем, в одной из подсистем происходят изменения, начинается процесс согласования с возникшими изменениями в других подсистемах, так что в конечном счете радикальным образом может измениться и вся система в целом. В системе наук о Земле механика сплошной среды – одна из ее важнейших подсистем и постепенно к внутреннему согласованию с ней пришли другие подсистемы, например структурная геология, механика горных пород, механика землетрясений или построения тектоники плит. Так что корни механики сплошной среды проникли в структуру наук о Земле весьма глубоко, ее преобразующее влияние сказалось на самом их облике. В свою очередь, это обеспечило исключительную устойчивость системы сложившихся представлений и настороженное отношение к инновациям, затрагивающим основания этой системы. В этом состоит основная причина того, что изучение энергонасыщенности геологической среды в науках о Земле все еще остается на зачаточном уровне.

Опыт дискуссий по проблеме применимости МСС к описанию механического поведения геологической среды показывает следующее. Оппоненты часто склонны приписывать автору ту крайнюю точку зрения, что он заведомо отрицает возможность приложения МСС к описанию механического поведения геологической среды. Это в корне неверно. Автор просто не ставил целью исследование таких возможностей. До него это делали сотни других исследователей и продолжают это делать сейчас, причем автор не собирается ставить под сомнение полученные ими результаты. Он допускает, что в конечном счете методы МСС, соответствующим образом учитывающие энергонасыщенность среды, в будущем позволят получить блестящие результаты. Автор стоит лишь на том, что модели МСС в их «классическом» виде заняли в геомеханике господствующее положение, не вполне соответствующее их нынешним возможностям. Вместе с тем, в силу их тотального распространения в геомеханике, они по существу налагают запрет на попытки взглянуть на дело как-нибудь иначе.

История науки свидетельствует о том, что как бы мы ни относились к влиянию установившихся парадигм, отрицательно сказывающемся на развитии инноваций, – это факт, форма и диалектика научного развития. Опыт истории науки говорит и о том, что если попытки отхода от канона имеют под собой веские основания, рано или поздно они получают признание научного сообщества, а вместе с тем и должное развитие.

В качестве примера сошлемся на учебник по тектонофизике [Гончаров и др., 2005]. В нем мирно уживаются рядом такие разделы, как «Тектонофизика сплошной (неструктурированной) среды» (часть первая) и «Тектонофизика структурированной среды» (часть вторая), что еще совсем недавно было бы немыслимо. Это яркое доказательство синтетического «примирения» подходов, казалось бы, теоретически непримиримых – континуальных моделей МСС и структурных моделей реальной натуры. Автор уверен, что в будущем так же мирно будут уживаться главы, например «Тектонофизика сплошной равновесной среды» и «Тектонофизика энергонасыщенной среды».

1-7. ГЕНЕАЛОГИЯ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОСТИ

1-7.1. Состояние механики деформируемой неравновесной среды

Характеризуя развитие механики деформируемого твердого тела в ее приложениях к изучению геологической среды в целом, можно сказать, что сейчас оно находится примерно в той стадии, в какой находилась классическая термодинамика в канун становления неравновесной термодинамики.

В классической термодинамике рассматривались свойства систем лишь вблизи состояния их равновесия. Рассматривались и неравновесные состояния, но средствами термодинамики равновесной, например в неравновесной термодинамике Л. Онсагера. По существу же классическая термодинамика представляла собой термостатику.

Изучение поведения неравновесных систем средствами новой неравновесной механики показало, что в этом поведении существуют стороны, рассматривать которые с точки зрения традиционных представлений невозможно в принципе. Хотя объекты с такими свойствами были, что называется, у всех перед глазами, в рамках теории их существование просто игнорировалось.

Использование неравновесной термодинамики не только позволило описывать неравновесные системы проще и эффективнее. Оно открыло для научного изучения целый ряд важнейших, как выяснилось, сторон действительности. В качестве примеров можно указать на ветвление, бифуркации в эволюции неравновесных систем, необратимость «стрелы времени» или на способность систем, находящихся вдали от равновесия, к самопроизвольному структурированию.

Ситуация взаимоотношения классической и неравновесной термодинамики повторяется во взаимоотношении между механикой сплошной среды, изучающей среды в их равновесном состоянии, и механикой неравновесной среды с тем, однако, отличием, что последняя в качестве узаконенного научного направления пока не существует. Мы это направление в рабочем порядке пока назвали *физической энергомеханикой*.

В технике изучение механического поведения термодинамически неравновесных сред интенсивно изучалось и изучается, так сказать, преимущественно на «ведомственном» уровне: оно здесь нацелено, как правило, на решение частных технологических проблем. В технике изучение особенностей механического поведения энергонасыщенных материалов, изделий и конструкций получило статус фундаментальной научной проблемы только к настоящему времени. Изучение же естественной энергонасыщенности геологической среды, обусловленной ее неравновесным состоянием, едва начато.

В литературе накоплен огромный наблюдательный материал, так или иначе касающийся проблемы естественной энергонасыщенности геологической среды. Отдельными исследователями время от времени предпринимались целенаправленные попытки изучения энергонасыщенности геологической среды in situ и в эксперименте. В целом, однако, исследования в этой области были спорадическими, разрозненными. В науках о Земле они не достигли той «критической массы», которая придает полноценному научному направлению черты саморазвивающейся системы. Заметного влияния на формирование представлений о механическом поведении геологической среды в целом, в частности о причинах сейсмичности или о формировании таких специфических структур, как блоковая делимость земной коры, тектоническая расслоенность и приразломные зоны деструкции, они не оказали.

1-7.2. Проблема терминологии

Обсудим проблему выбора термина, удобного для обозначения напряжений, вызванных фиксированными упругими деформациями. Мы, как сказано выше, избрали для этого термин «латентные напряжения». Однако наряду с этим термином разными авторами и применительно к разным случаям, но в сходном смысле, употреблялось не менее двух десятков различных наименований. Чаще всего – два термина: «внутренние напряжения» и «остаточные напряжения». Тем не менее, употребление этих терминов нельзя считать удачным.

Системы напряжений, которые могут существовать в равновесии внутри твердого тела, когда к его поверхности не приложены ни нормальные, ни касательные напряжения, Ф. Надаи [1969] определил как *внутренние напряжения*. Этот термин широко примерно в том же смысле использовался и до него. Вместе с тем в механике сплошных сред используют совершенно иное по смыслу омоформное определение, когда внутренние напряжения рассматриваются как реакция сопротивления материала действию краевых поверхностных и объемных сил [Ильюшин, 1978]. Механики, придерживающиеся традиционных взглядов, этот смысл в название «внутренние напряжения» и вкладывают.

Широко употребляющийся в технике и горном деле термин *«остаточные напряжения»* нельзя считать физически корректным применительно к тем случаям, когда напряжения такого рода возникают в твердотельных системах при нарушении их термодинамического равновесия, поскольку до нарушения равновесия их в системе *не было*. В этом смысле они не *остались* в системе после изменения ее состояния, а *возникли* в ней в результате этого изменения.

В понятие «остаточные напряжения» вложен тот смысл, что оно обозначает напряжения, которые сохраняются в теле как своего рода «память» о тех процессах, которые протекали в нем в прошлом. Среды такого рода иногда так и называют «среды с памятью» (см., например, [Дэй, 1974]). Еще один созвучный по смыслу термин – «prestress medium», – т.е. «предварительно напряженная среда».

Термин «остаточные напряжения» приложим ко многим ситуациям, например к напряжениям, которые сохраняются в стальных изделиях после их шлифовки. Другой пример: в горных породах обнаруживают напряжения, которые можно объяснить только процессами, протекавшими в них в весьма отдаленном геологическом прошлом и к настоящему времени давно прекра-

тившимися. Такие напряжения называют иногда «реликтовыми», или «замороженными».

Однако такого рода напряжения могут не только «оставаться» как память о процессах, которым среда подвергалась в прошлом, но и «возникать» в результате тех процессов, которые протекают в ней в настоящем. В этом смысле последние следовало бы называть не «остаточными», а «возникающими». В результате действия таких напряжений, например, возникают системы трещин в усыхающих обводненных глинистых корках, асфальтовых покрытиях, остывающей вулканической лаве или остывающих интрузиях, трещины, возникающие при разгрузке горных пород выемкой котлованов, карьеров, проходкой горных выработок, эрозионным срезом положительных форм рельефа и т.д. Латентные напряжения могут сохраняться от нарушения равновесного состояния, произошедшего в прошлом, и возникать вследствие нарушения равновесного состояния, протекающего в настоящем.

Из практики материаловедения известно, что системы напряжений, уравновешенных внутри тела, возникают при любых процессах – механических, физических или химических, которые влекут за собой остаточные изменения формы элементов твердых тел, если этим изменениям препятствуют соседние участки вмещающего объема. Обычно связанные с этим неоднородные пластические деформации ведут к упругой несовместимости во взаимном сопряжении соседних структурных элементов тела и как следствие этого – к появлению напряжений, которые по механизму их образования иногда называют *структурными напряжениями*. Однако, как показал опыт употребления этого понятия, механики, придерживающиеся традиционных взглядов, вкладывают в него совсем иной смысл. Под структурными напряжениями они часто понимают локальную концентрацию напряжений, обусловленную перераспределением общего поля напряжений на структурных неоднородностях среды.

В литературе для обозначения систем напряжений, уравновешенных внутри тела, употребляется целый ряд других общих названий, таких как «дисперсные», «поляризационные», «собственные», «начальные», «скрытые», «объемно-градиентные», «латентные» напряжения. Кроме того, для обозначения этих напряжений в технике и материаловедении им нередко присваивают наименования, в которых отражены технологии, которым они обязаны своим появлением: «сварочные», «усадочные», «деформационные», «сборочные», «технологические» напряжения.

кристаллами, первого рода – на уровне связей одного порядка с размерами деталей машин и конструкций [Витман, 1933]. Достижения этих исследований подробно осветил в обзорных публикациях А. Комар [1932]. В целом представление об уровне понимания физической сущности латентных напряжений и особенностей их проявления, достигнутом к началу 30-х гг., уровне, который существенно не превзойден и в наши дни, дает работа Ф.Ф. Витмана [1933].

Импульсами к изучению латентных напряжений и служили остро назревшие технические проблемы. Так, в конце 20-х – начале 30-х гг. XX в. таким импульсом стало вначале необъяснимое охрупчивание брони, а затем, в 40-е гг., создание больших «цельносварных» конструкций. Латентные напряжения в последних явились причиной ряда крупных аварий. Так, из 2500 кораблей типа «Либерти», построенных во время второй мировой войны, 145 разломились пополам и около 700 потерпели серьезные разрушения. Латентные напряжения стали причиной гибели трети кораблей этого типа. Нанесенный ими урон оказался больше, чем урон от военных действий противника. Известны и многие другие примеры разрушения кораблей, мостов и химических реакторов. По выяснении причин этих разрушений обнаруживалось, что главную роль в провоцировании аварийных событий играли латентные напряжения.

Характеризуя состояние исследований в области латентных напряжений в технике, можно выделить два этапа.

На первом, историческом этапе, их существование «большой наукой» игнорировалось. Исследования в этой области осуществлялись главным образом инженерами и технологами, в рамках отдельных фирм и производств, когда вставала очередная производственная проблема, связанная с вредным влиянием этого вида напряжений. Отношение к проблеме их изучения еще в 70-е гг. XX в. характеризует название одной из работ того времени: «До каких пор можно игнорировать остаточные напряжения?» [Irving, 1978]. Второй этап – современный – отличается более системным и более масштабным подходом к решению этой проблемы. Следует, однако, заметить, что масштабного прорыва в область физики энергонасыщенных сред пока не произошло. Значительная часть работ общего теоретического плана ориентирована не на уяснение проблем физики латентных напряжений, а на разработку способов их описания в рамках существующей в механике теоретической традиции.

1-7.4. Феномен естественной энергонасыщенности геологической среды в науках о Земле

Если напряжения обнаруживаются в ненагруженном техническом изделии или в образце породы, извлеченной из ранее вмещавшего его массива, то их природа очевидна. Однако в геологической натуре всякий диагностируемый объем среды составляет одно целое с вмещающим его массивом. В этом случае их природа может быть истолкована различно. Они могут быть обусловлены собственным энергетическим потенциалом выделенного объема, но их могут обусловить и те внешние силовые воздействия, которым массив подвержен. Это, например, могут быть силы гравитации или тектонические силы. Проблема идентификации напряжений в породах совместно с «идеологическим» отторжением фактов энергонасыщенности и обусловила почти непреодолимые трудности в изучении явления энергонасыщенности. Одна из целей настоящей работы и состоит в поиске критериев, по которым можно было бы судить о том, с какого рода «силами» имеет дело исследователь в каждой конкретной геологической ситуации.

Сведения о различных проявлениях энергонасыщенности геологической среды в разных подразделениях наук о Земле разрознены, притом далеко не всегда наблюденные факты рассматривают как следствие энергонасыщенности. У горняков, в частности, они попадают в категорию «аномальных» явлений. К обсуждению тех или иных «аномалий» мы будем обращаться по ходу изложения. Частичный перечень аномальных проявлений горного давления можно найти в работе [Айтматов и др., 1987].

Под «аномальными» понимают те проявления горного давления, какие не находят объяснения в рамках общепринятой теоретической традиции. В среде механиков, работающих в русле традиции, примерно в 70-е гг. XX в. появилось ощущение того, что ситуация с приложениями традиционных методов в науках о Земле складывается не совсем благополучно. В качестве характерной и вместе с тем авторитетной констатации ситуации, сложившейся в горном деле, можно привести слова академика Н.В. Мельникова: «К сожалению, мы вынуждены признать, что напряженное состояние горного массива постигается пока только практикой» [Напряженное..., 1973. С. 6]. Не вдаваясь в детали, можно сказать, что существенным образом ситуация не изменилась и в наши дни. Горные удары, внезапные выбросы газа, пыли и

другие динамические явления продолжают создавать впечатление чего-то по своей природе весьма парадоксального в том смысле, что эти явления в рамки существующих теоретических представлений не вписываются.

В прикладных направлениях геологии и геофизики дело обстоит не лучше. Так, время ни одного из землетрясений, возникших за последние десятилетия на территории бывшего СССР, не было предсказано. Все они произошли внезапно. Более того, начиная с Дагестанского землетрясения 1970 г., почти все наиболее значительные из них (Газлийские, Спитакское, Сусамырское, Нефтегорское, Корякское) возникли в местах, где, согласно нормативным картам сейсмического районирования, появление столь значительных сейсмических событий полагалось невозможным.

Если исключить суждения предположительного характера, до сих пор нет критериев, согласно которым можно было бы сказать, будет ли данное техногенное воздействие сопровождаться явлениями наведенной сейсмичности или нет. Во всяком случае, сколь бы правдоподобны ни были объяснения задним числом, плотинные землетрясения, наведенная сейсмичность месторождений нефти или горные удары в шахтах на практике возникают непредсказуемо.

Лишь один пример: все наиболее значительные землетрясения, наведенные крупными гидротехническими сооружениями (Койна в Индии, Ассамское в Египте, Бразильские плотинные), возникли, вопреки теоретически обоснованным ожиданиям, в областях платформенного типа с относительно спокойным тектоническим режимом. И наведенных землетрясений такой силы не бывало там, где они, казалось, должны были бы быть – в районах с особо высокой тектонической активностью.

По совокупности важнейших и до сих пор нерешенных задач, поставленных запросами практики, нынешнее состояние геомеханики можно охарактеризовать как кризисное.

В общем плане причины кризисной ситуации видятся в несоответствии теоретических моделей и объектов описания. В геомеханике и ее частных подразделениях, нацеленных на приложения в горном деле, сейсмологии, геодинамике и структурной геологии, влияние подходов, определяемых положениями механики сплошной среды, было до самого последнего времени безраздельным. Но причины того, что модели, разработанные на ее основаниях, «не срабатывают», обычно видят в недостаточной разработанности метода, широком разбросе значений физических

констант, недостатке достаточно мощных вычислительных средств и т.д. Время от времени появляются новые модификации метода на прежнем традиционном основании, на которые и возлагаются новые надежды на успех их применения. Некоторое время сохраняются надежды на их эффективность, после чего они уходят в тень, а на их место выдвигаются еще более новые. В целом считается, что подход в своей основе верен, но ему не достает корректных исходных данных.

В 30–40-е гг., например, в геомеханике широко применялась механика грунтов – одно из подразделений механики сплошной среды. Впоследствии, подводя итог опыту ее применения, В. Пэк подчеркивал настолько большую степень различия между идеализированными телами, исследуемыми геологическими науками, и реальной геологической средой, что нередко «геологическое строение и геологические процессы полностью противоречат выводам механики грунтов» (цит. по [Панюков,1978. С. 7]). В 80-е гг. большие надежды применительно к описанию напряженного состояния массивов пород возлагались на метод конечных элементов. Сейчас ясно, что для этого требуются столь детальные данные о структуре массивов, получить которые на практике невозможно. И еще вопрос: будет ли «срабатывать» этот метод в том случае, если такие данные будут предоставлены, и т.д.

Почти до 70-х гг. XX в. горняки полагали, что напряженное состояние горных массивов полностью определяется весом пород. Инерция этого подхода сказывается поныне. В рамках этой теоретической традиции и формировалось представление об «аномалиях». Гравитационная модель напряженного состояния горных массивов была поколеблена лишь после того, как в практику был внедрен метод прямых измерений напряжений в горных массивах (метод разгрузки), разработанный Н. Хастом, Т. Нильсоном [1967]. Массовые замеры в шахтах показали, что в горных массивах часто обнаруживаются горизонтальные напряжения, которые во много раз превосходят по модулю те напряжения, которые мог бы обусловить вес налегающих толщ. Эти напряжения были отнесены к «тектоническим». На их счет и были «списаны» наблюдавшиеся аномалии в поведении горных пород (см., например, [Айтматов и др., 1987]). Однако при ближайшем рассмотрении «объяснить» аномалии тектоническими напряжениями оказывается ничуть не легче, чем силами гравитации.

Нет сомнения в том, что природа разных аномалий может оказаться самой разной. Но нет сомнения и в том, что многие из

этих аномалий обусловлены энергонасыщенностью геологической среды.

Эта мысль не нова. Наоборот, ее вновь повторяют и наполняют дополнительным смыслом и фактическим материалом многочисленные исследователи, работающие в области наук о Земле. Так, различные проявления повышенной напряженности горных пород активно обсуждались уже на рубеже XIX–XX вв. Более того, в то время этому явлению уделялось гораздо больше внимания, чем в наши дни. Чтобы охарактеризовать направление исследовательской мысли того времени, приведем выдержку из книги К. Богдановича [1909].

«Для правильного понимания сейсмических явлений имеют большое значение наблюдения над горными породами в состоянии напряжения. Если такая порода, например в туннелях, подземных выработках, даже на горных склонах, освобождается от высокого внутреннего напряжения, вследствие какой-нибудь искусственной или естественной причины (выемка, размывание), в ней возбуждаются разрывы. Уменьшение напряжения может происходить не постепенно, а внезапно, рядом последовательных ударов или толчков. Иногда такие явления происходят в больших каменоломнях, когда добытые большие глыбы камня растрескиваются и разламываются в куски, причем маленькие обломки отбрасываются как взрывом... Герлянд остроумно замечает, что, может быть, в этих ничтожных проявлениях напряженного состояния внутри горных масс мы имеем «демона землетрясений, пойманного с поличным».

Заметим, что идея возбуждения сейсмичности аномально высокой напряженностью геологического субстрата в дальнейшем развития не получила. Более поздние работы ограничиваются констатацией явления без каких-либо широкомасштабных обобщений или конкретных исследований (см., например, [Слесарев,1948; Белоусов,1962]).

Более широкий взгляд на роль энергонасыщенности в разрушении горных пород время от времени высказывали специалисты с опытом исследовательской работы в области технологии металлов и материаловедения. Примером может служить работа [Фридман, 1960], в которой рассмотрены закономерности разрушения энергонасыщенных твердых тел применительно к задачам тектонофизики.

Способностью к непредвзятым выводам из наблюденных фактов и определенной независимостью от существующих парадигм отличаются работы инженерных геологов. Ими время от времени публиковались работы, в которых отмечалось влияние

латентных напряжений на образование систем трещин разгрузки и делались попытки оценить их возможное влияние на устойчивость проектируемых инженерных сооружений.

В качестве примера попыток воспроизвести трещины разгрузки в эксперименте можно привести работу [Reik,Vardar, 1974]. Одно время активный интерес к остаточным напряжениям в горных породах проявляли ряд зарубежных исследователей. Их наработки отражены в статье [Friedeman, 1972]. В качестве примера отечественных работ, в которых осуществлялись попытки систематизировать фактический материал, относящийся к проявлениям остаточных напряжений применительно к задачам инженерной геологии, можно привести работы [Кутепов, 1973; Прочухан, 1964; Булин, 1971; Несмеянов, 2004]. В особенности подчеркнем работы Б.Н. Достовалова и его соавтора [Достовалов, 1965б; Достовалов, Кудрявцев, 1967]. В них заложены основы представлений, которые, помимо их непосредственной значимости, получают все большее значение по мере последующего развития. Б.Н. Достовалов ввел представление об объемно-градиентных напряжениях в земной коре и рассмотрел их возможное влияние на основные физические и геологические процессы. Метод, разработанный им применительно к уяснению механизма образования систем морозобойных решеток, позволяет распространить его на широкий круг задач, связанных с образованием систем трещин в земной коре. Этот подход позволил применить к решению задач такого рода теорию структурирования при разгрузке порогово-потенциальных функций. Методы этой теории представляют собой эффективную теоретическую альтернативу методам, восходящим к МСС.

Известное внимание в работах 60–80-х гг. XX в. спорадически уделялось изучению остаточных напряжений в горных породах. Напряжения этого вида, в частности, рассматривались как возможная причина самопроизвольного разрушения кернов, добытых при бурении скальных пород, на диски (см., например, [Ефремов, 1970; Забигайло, Белый, 1981]). В МГИ проводились исследования микроостаточных напряжений, возникающих на уровне минерального строения [Дмитриев и др., 1981]. Н.П. Влох и А.Д. Сашурин [1970] разработали метод изменения остаточных напряжений в массивах крепких горных пород. В последнее время попытки привлечь внимание к вкладу остаточных напряжений в естественное напряженное состояние горных массивов предпринимали И.Т. Айтматов и его сотрудники (см., например, [Айтматов, 2003]).

И все же изучение остаточных (т.е. латентных – *В.П.*) напряжений в целях применения результатов этого изучения к проблемам ведения горных работ в общем объеме исследовательских усилий занимают долю ничтожную. В свое время известный инженерный геолог Л. Мюллер по этому поводу писал: «Интересно, что именно горняки наиболее часто отрицают существование скрытых тектонических напряжений или остаточных напряжений в земной коре, хотя именно они больше и чаще всего испытывают на себе действие таких напряжений» [Мюллер, 1971. С. 120]. Игнорирование фактов энергонасыщенности геологической среды – характерный пример того, как влияние парадигмальных установок может достигать силы гипнотического внушения – до утраты способности делать выводы из очевидных фактов.

Касаясь того внимания, которое уделяют латентным напряжениям геологи, отметим следующее. С одной стороны, указания на существование латентных напряжений или в более широком контексте на факты энергонасыщенности геологической среды многочисленны и разнообразны. Но с другой стороны, эти указания должным образом, во-первых, не систематизированы, а во-вторых, не получили должного теоретического обобщения. В подавляющем большинстве обобщающих сводок нового времени об энергонасыщенности геологической среды в рассматриваемом нами смысле в любом смысловом эквиваленте, в том числе и «силовом», не упоминается ни одним словом. В качестве примера можно указать на фундаментальный двухтомный обзор [Теркот, Шуберт, 1985].

Тем не менее, время от времени появлялись работы, стоящие вне общих традиций. Обзор проблемы латентных напряжений в геологической среде приведен в работе [Земля..., 1974]. В таких работах образование геологических структур рассматривается как следствие сил, порождаемых процессами, которые происходят непосредственно в толщах пород в стадии их структурирования. Общую идеологию такого подхода сформулировал в виде принципа автаркии В.В. Вернадский. Согласно этому принципу «все процессы начинаются в земной коре и в ней кончаются» [Вернадский, 1983, с. 80]. Более конкретные построения в рамках такого подхода отражены в ряде гипотез, в которых складкообразование рассматривается как результат изменения объемов геологической среды за счет процессов, происходящих непосредственно в этих же объемах. Обзор развития представлений этого направления приведен в работе [Резанов, 1987]. В качестве характерных примеров такого подхода укажем на работы [Захаров, 1965, 1979; Гаврилов и др., 2000].

Перечень исследователей, которых в той или иной мере интересовали идеи о возникновении внутренних энергетических ресурсов геологических образований в процессе их преобразования, можно найти в работе [Булин,1971]. Приведенный в ней перечень может быть продолжен. Однако мы здесь не ставили целью составление достаточно полного обзора исследований и осмыслений в упомянутой области. Те же из них, которые имеют отношение к темам, обсуждаемым в нашей работе, будут рассмотрены в соответствующих местах текста с должным вниманием.

Кризисное состояние механики геологической среды можно объяснять сложностью натуры, недостатком средств на проведение соответствующих исследований и т.д. Все это так. Но попытка теоретически непредвзятого анализа фактического материала приводит к выводу, что, игнорируя энергонасыщенность геологической среды, преодолеть тупиковую, кризисную ситуацию, в которой пока почти безрезультатно пробуксовывает теоретическая геомеханика, невозможно.

ОСНОВАНИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОСТИ

Геомеханика рассматривает положения механики деформируемой среды в ее приложениях к описанию механических процессов в геологической среде. В теоретическом плане она формировалась в русле механики сплошной среды. Соответственно, в процессе создания парадигмальных теоретических конструкций ряд общеизвестных физических положений, важных для понимания механического поведения энергонасыщенной геологической среды, оказался вне рамок традиционных представлений. Некоторые же из этих положений подверглись значительным деформациям. В каких-то достаточно важных частностях они приобрели узкоспециальный смысл и отошли от их исходного физического контекста, как это, например, произошло с представлениями о релаксации. Что касается латентных напряжений, то они, как уже отмечалось, представляют собой сущности, которые по своему физическому смыслу принципиально отличаются от принятых представлений о механических напряжениях. Цель настоящей главы – отчетливо обозначить те базовые физические представления, на платформе которых и развита концепция энергонасыщенности геологической среды.

2-1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ

Содержание термодинамики давно вышло за границы, определяемые ее исторически сложившимся названием. В нынешнем виде термодинамика представляет собой общую теорию не только тепловых, но и самых различных механических, физических и химических процессов во всем их многообразии.

В настоящей главе будут рассмотрены те положения из общей теории процессов, которые легли в основу развиваемого нами представления об энергонасыщенности геологической среды и особенностях ее механического поведения.

Излагаемые далее сведения представляют собой компиляцию сведений общеизвестных. Их можно найти в справочных пособиях, вузовских учебниках по термодинамике и статистической физике.

2-1.1. Термодинамическое равновесие

В статистической физике и термодинамике любые физические тела независимо от их размеров, вещественного состава и агрегатного состояния рассматриваются как системы, состояние которых определяется набором *термодинамических параметров*, или *параметров состояния* (температура, плотность, давление, химический потенциал и т.д.).

Различают *внешние* и *внутренние* параметры состояния. Соответственно, обозначим их как x_i и q_i. Здесь индекс $i = 1, 2, 3...$ указывает природу параметра. Различают также два вида параметров состояния: экстенсивные и интенсивные. Экстенсивные параметры пропорциональны количеству вещества системы (например, масса, объем). Интенсивные параметры не зависят от количества вещества (температура, давление, концентрация, плотность упругой энергии).

Согласно основному постулату статистической физики, система, поставленная во внешние фиксированные условия ($x_i = \text{const}$), с течением времени самопроизвольно стремится к такому состоянию, когда параметры системы принимают постоянные значения и далее от времени не зависят. Такое состояние получило название *термодинамического* (*статистического*) *равновесия*. В дальнейшем для краткости, говоря о равновесии, мы будем понимать равновесие в термодинамическом смысле.

Свойства системы, находящейся в равновесии, не изменяются во времени. В ней затухают все движения макроскопических частей друг относительно друга, исчезают разности температур, прекращаются процессы диффузии и теплопроводности, химические реакции, фазовые переходы и т.п. Другими словами, потоки вещества и энергии в равновесной системе отсутствуют.

В системах, находящихся в поле внешних сил (электрических, центробежных, гравитационных и т.д.), интенсивные свойства при равновесии могут изменяться от точки к точке. Таково, например, возрастание *геостатического* (*литостатического*) *давления* в породах земной коры, которое возрастает с глубиной пропорционально произведению глубины на объемный вес налегающих горных пород. В этом случае, как правило, рассматриваются такие системы (или части систем), в которых этими изменениями можно пренебречь. Неравновесная в целом система может содержать отдельные части, находящиеся в равновесии. Состояние этих частей называют *локально равновесным*.

Статистическому равновесию соответствует гидростатическое (изотропное, литостатическое) напряженное состояние.

В общем случае поле плотности упругой энергии системы определяется выражением

$$u = u_v + u_f, \tag{11}$$

где u_v, u_f – плотность потенциальной энергии упругих деформаций объема и формы, соответственно. При гидростатическом равновесии $u = u_v$, $u_f = 0$. В силовой форме общий случай напряженного состояния описывает выражение

$$T = T_v + D, \tag{12}$$

где T_v – изотропная, D – девиаторная составляющие тензора напряжений T. Условие гидростатического равновесия – $T = T_v$, $D = 0$.

При гидростатическом равновесии все физические тела – газообразные, жидкие или твердые – ведут себя как идеально упругие. Все разнообразие неупругого и реологического поведения деформируемых твердых тел проявляется при отклонении их напряженного состояния от гидростатического равновесия [Рейнер, 1965].

В состоянии гидростатического равновесия потенциальная энергия u_v, соответствующая упругой деформации объема, будет сохраняться в системе сколь угодно долго – до тех пор, пока будет сохраняться гидростатическое равновесие. Другими словами, потенциальная энергия упругих деформаций объема не может быть высвобождена в принципе.

Наглядной демонстрацией справедливости высказанного утверждения может служить такой мысленный эксперимент. Манометр, датчик которого погружен в воду на определенную глубину от ее уровенной поверхности, указывает величину гидростатического давления на этой глубине. Оно не зависит от времени и будет оставаться таким до тех пор, пока неизменным остается уровень воды, хотя время релаксации воды исчисляется ничтожными долями секунды. Напряженное состояние геологической среды, математически эквивалентное гидростатическому, называют также литостатическим или, если оно предопределяется весом налегающих толщ пород, геостатическим давлением. Иногда этим подчеркивается, что при равномерном всестороннем (равнокомпонентном) давлении, приложенном к телу извне, его внутреннее состояние может не вполне соответствовать гидростатическому. Последнее достигается лишь в процессе объемного течения – внутренних смещений, постепенно выравнивающих, нивелирующих локальные неоднородности напряженного состояния внутри тела.

Из сказанного, в частности, следует, что если массивом пород пусть в отдаленном геологическом прошлом была накоплена упругая энергия, то она будет сохраняться до тех пор, пока в силу тех или иных причин гидростатическое равновесие не будет нарушено. Если же в последующем внешние условия изменятся, то эта энергия может быть превращена в работу против внешних сил, как если бы среда обладала собственным энергетическим потенциалом.

Энергия упругого изменения объема может быть высвобождена только посредством ее перехода в потенциальную энергию изменения формы ($u_v \rightarrow u_f$) и если существуют условия для такого перехода, т.е. если будет нарушено равновесное состояние системы. Как будет показано далее, это физическое положение послужило основанием разработанной нами модели зонной релаксации.

2-1.2. Неравновесное состояние реальных твердых тел

Представление о термодинамическом равновесии вещества является идеализированным. Равновесное состояние представляет собой теоретический предел, к которому стремится система в процессе ее самопроизвольной эволюции. Реальные системы, стремясь к состоянию равновесия, в действительности его никогда не достигают. Они всегда в какой-то мере неравновесны [Сейдж, 1962].

Можно было бы полагать, что состояние твердых тел, на которые не действуют внешние силы, является равновесным. Однако это справедливо лишь по отношению к идеализированным моделям среды, таким, например, как однородная изотропная идеально упругая среда, рассматриваемая в линейной теории упругости.

Отличие реальной среды от идеальной по ее реакции на внешние воздействия выражается в следующем.

Во-первых, упругая энергия, сообщенная реальному твердому телу внешними силами, по прекращении их действия не высвобождается из тела полностью. Некоторое ее количество сохраняется в нем в механически связанном состоянии и после прекращения действия внешних сил. Твердые тела, обладающие способностью фиксировать в себе упругие деформации, в механике деформируемого твердого тела известны как *наследственно-упругие*, или *вязко-упругие* [Работнов, 1979].

Во-вторых, появление и сохранение такой механически связанной (скрытой, латентной) упругой энергии в реальном твердом теле возможно не только в результате силовых воздействий на данное тело, но и в результате энергетических преобразований, происходящих в данном теле (в результате тепловых, химических, радиоактивных, электрических, магнитных и иных процессов).

По указанным причинам реальные твердые тела практически всегда содержат в себе более или менее значительное количество потенциальной энергии фиксированных упругих деформаций, т.е. они располагают упругой энергией, избыточной по отношению к той, которую обеспечивают телу их «мгновенные» упругие деформации, исчезающие после прекращения действия внешних сил. В строгом смысле это означает, что реальные твердые тела в той или иной мере всегда термодинамически неравновесны. Неравновесное состояние твердых тел является универсальной, фундаментальной особенностью их реального существования. Вопрос состоит лишь в том, как далеко реальное состояние данной твердотельной системы отклоняется от состояния термодинамического равновесия.

2-1.3. Взаимосвязь элементарных процессов

Процессом называется всякое изменение параметров состояния.

Значение внутренних параметров зависит от значений внешних параметров, и если изменяются значения первых, то изменяются и значения вторых. Всю совокупность элементарных процессов, мыслимых в системе при изменении ее внешних параметров, можно представить в виде матрицы $| x_i \, q_i |$, или в развернутом виде как следующую таблицу:

$$
\begin{array}{l}
x_1 \, q_1 \; x_1 \, q_2 \; x_1 \, q_3 \; \ldots \; x_1 \, q_n \\
x_2 \, q_1 \; x_2 \, q_2 \; x_2 \, q_3 \; \ldots \; x_2 \, q_n \\
x_3 \, q_1 \; x_3 \, q_2 \; x_3 \, q_3 \; \ldots \; x_3 \, q_n \\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
x_n \, q_1 \; x_n \, q_2 \; x_n \, q_3 \; \ldots \; x_n \, q_n
\end{array}
\qquad (13)
$$

Каждый элемент таблицы выражает сочетание индексов внутренних и внешних параметров системы и символизирует соответствующий элементарный процесс.

Взаимосвязь между параметрами системы отражает существование уравнений состояния и других уравнений, связывающих

различные свойства системы. В силу этого, например для однозначной характеристики состояния системы, достаточным оказывается знание не всех свойств, а лишь нескольких из них. Так, в случае газа для определения состояния системы могут быть выбраны любые две пары из трех свойств: давления, температуры, объема.

Вследствие взаимосвязи и взаимообусловленности внешних и внутренних параметров, находящей выражение в существовании уравнений состояния, изменение хотя бы одного из них влечет за собой сложную совокупность сцепленных между собой процессов. По этой причине даже простейшие физические законы (закон Шарля, закон Бойля-Мариотта, закон Гей-Люссака), выведенные для описания состояния идеального газа, представляют собой теоретическую условность. На практике они дают приближенные результаты, т.е. строго не выполняются. Приведенная таблица в формализованном виде иллюстрирует положение, согласно которому изменение какой-либо одной подсистемы данной системы ведет к изменениям во всех остальных ее подсистемах, а в конечном счете – к изменению системы в целом.

В твердых телах количественные связи между изменениями параметров установить еще более сложно, но общий принцип – взаимосвязь изменений, сцепление элементарных процессов, протекающих в системе, – остается в силе. Взаимосвязь процессов в геологической среде, в частности, выражает известный принцип тормозящего противодействия (принцип Ле Шателье–Брауна). Согласно этому принципу, внешнее воздействие, выводящее систему из равновесия, стимулирует в ней совокупность процессов, стремящихся ослабить результат этого воздействия [Ландау, Лившиц, 1976].

Изменение хотя бы одного внешнего параметра твердотельной системы влечет за собой согласованное и направленное возбуждение всех ее физических подсистем, всех возможных в ней процессов.

Приведенная матрица иллюстрирует: какой бы параметр системы ни изменился, в реальной системе неизбежно возникнут изменения ее объема, а, значит, изменится и метрика структурных элементов системы – их объем, ограничивающие их поверхности, линейные и угловые размеры. В общем случае такие изменения не согласованы, вследствие чего в пространстве субстрата системы из-за «нестыковки» ее смежных структурных элементов возникнут фиксированные упругие деформации и обусловленные ими латентная энергия и латентные напряжения.

Из сказанного следует принципиально важное заключение: причиной появления собственного энергетического потенциала

системы могут служить не только внешние механические воздействия на систему, но и самые различные механические и немеханические процессы, протекающие в системе. В этом отношении твердые среды и геологическая среда в том числе представляют собой энергетические преобразователи, способные превращать энергию любых физических, химических или механических процессов, протекающих в их субстрате, в энергию упругих деформаций.

Существует обширная литература, в которой изложены общие физические основания термодинамики, развитые применительно к геологическим системам. Примером может служить книга Ф.А. Летникова [1992]. Но хотя геохимические и механические процессы теснейшим образом между собой увязаны, в своей сущности, являясь разными выражениями одного и того же термодинамического процесса, аспекты геомеханики в таких работах, как правило, не рассматриваются. Вопрос о роли различных немеханических процессов в создании собственного энергетического ресурса геологической среды по существу остается обширным «белым пятном».

Движение системы к равновесию или стационарному состоянию может рассматриваться в целом или по какому-либо из ее параметров состояния. Впредь мы рассмотрим те твердотельные системы, неравновесное состояние которых обеспечивает собственный энергетический потенциал, обусловленный содержащимися в них фиксированными упругими деформациями.

2-2. РЕЛАКСАЦИЯ

В физике понятие «релаксация» прилагается к широкому кругу физически разнородных явлений. Этим термином определяют процесс движения систем к равновесию. Так, если маятник приведен в движение, а затем предоставлен сам себе, говорят о релаксации колебаний мятника, т.е. об их постепенном затухании. Точно так под релаксационными понимают процессы самопроизвольного движения термодинамической системы, выведенной из равновесия, к новому равновесию. При этом можно говорить о движении к равновесию всей системы в целом и по ее отдельным параметрам. В этом смысле можно говорить о релаксации ее температуры, химического потенциала, напряжений или упругой энергии, структурной релаксации и т.д. В общем случае времена релаксации различных процессов различны и для их определения вводятся свои специфические критерии.

2-2.1. Представления о релаксации в механике

В механике деформируемого твердого тела явление релаксации изучают в двух формах: в форме релаксации деформаций («ползучесть») и в форме релаксации напряжений. При описании этих форм используется обычный в математическом анализе прием, когда значения одной переменной рассматривают при фиксированных значениях остальных переменных. Процесс возрастания остаточной деформации при постоянном напряжении получил название *ползучести*, а процесс уменьшения напряжений при фиксированной общей деформации системы – *релаксации напряжений*. Время, в течение которого напряжение в процессе релаксации убывает до 1/e от своей исходной величины, определено как *время релаксации напряжений*.

Истоки такого подхода в исследовании явлений релаксации восходят к Максвеллу. Для формального описания сред, сочетающих упругие и вязкие свойства, он предложил модель среды («тело Максвелла»), механическая схема которой представляет собой систему из двух последовательно соединенных элементов – упругого (пружина) и вязкого (поршень в цилиндре, заполненном вязкой жидкостью). Если нагрузить такую систему растягивающей силой, то она в первый момент нагружения (при $t \ll \tau$, где τ – время релаксации напряжений) удлинится только за счет упругого растяжения пружины. Если затем снять нагрузку, то исходная длина системы будет восстановлена без остаточных явлений. При более продолжительном действии нагрузки (при $t \geq \tau$) в системе появится остаточная деформация за счет перемещения поршня в вязкой жидкости. Если воздействие очень длительное, то тело Максвелла течет подобно жидкости, хотя в любой стадии процесса течения упругий элемент растянут, и, следовательно, тело в целом обладает некоторой постоянной упругой деформацией, не зависящей от времени.

С физической точки зрения приведенные определения имеют только формальный смысл: ползучесть и релаксация напряжений – не различные физические процессы, а различные стороны одного и того же процесса, который понимается как переход упругих деформаций в остаточные деформации.

Физический смысл приведенного представления о релаксации основан на точке зрения, согласно которой на отрезках времени, превышающих время релаксации, твердые тела начинают «течь» подобно вязкой жидкости. Если на сравнительно коротких промежутках времени устойчивость твердых тел – их способность сохранять свою форму – характеризует прочность, то на

больших отрезках времени эту способность характеризует вязкость. Поскольку «текучесть» твердых тел рассматривается как их фундаментальное свойство, проявляющееся на больших отрезках времени, теоретические исследования явления релаксации, в том числе и применительно к различным прикладным задачам, рассматриваются в рамках реологии. Основным методическим приемом при этом является конструирование более или менее сложных механических моделей, в число основных структурных составляющих которых входят вязкие и упругие элементы (см., например, [Рейнер, 1965]).

Элементарные сведения, касающиеся связи между временем релаксации напряжений и вязкостью, сводятся к следующему.

В общем виде вязкость можно определить как отношение напряжения к соответствующей ему скорости деформации: $\sigma = \eta \cdot de/dt$. Соотношение между напряжением и деформацией определяет выражение $\sigma = \mu e$, где μ – модуль сдвига (жесткость). Отсюда $\eta \approx \mu\tau$, где τ – время релаксации.

Практический аспект приложения представлений о релаксации, сопряженный с выработкой соответствующей системы понятий, которая затем была использована и в науках о Земле, изначально был осуществлен применительно к задаче устранения ползучести лопаток паровых турбин. В своём смысле он несёт ограничения его генетической специфики. Применение сложившихся представлений к более широкому кругу задач без соответствующей их коррекции стало причиной случаев их некорректного использования. Подчеркнем некоторые основные моменты несоответствия традиционного понимания комплекса представлений, связанных с понятием релаксации, реальным поведением релаксирующих твердотельных систем.

Во-первых, в идеализированных моделях среды механики рассматривается процесс релаксации лишь по одному параметру – *релаксации напряжений*, под которой понимают убыль напряжений, обусловленных внешними силами. В реальных же системах развитие процесса релаксации может отслеживаться по любому из термодинамических параметров.

Во-вторых, в моделях механики процесс релаксации рассматривается как протекающий без разрывов сплошности, на макроскопическом уровне структурно не выраженный. В реальных системах вследствие релаксации может происходить макроскопически выраженное структурирование релаксирующих систем с образованием парагенетических структурных комплексов, а также самопроизвольная деструкция субстрата этих систем, выраженная, в частности, появлением определенным образом организо-

ванных систем трещин хрупкого отрыва. Позже мы рассмотрим это явление как эффект хрупкого последействия.

В-третьих, в существующих оценках времени релаксации не учитывается масштабный фактор. Это послужило предпосылкой разработки представления о зонной релаксации, рассмотренного далее.

В-четвертых, в механике релаксация рассматривается как пассивный процесс уменьшения напряжений, возбуждаемых внешними силами, приложенными к телу. Реальные системы способны запасать упругую энергию до критических значений, намного превышающих ту, которая может быть сообщена им действующими силами в данный момент времени. В таких энергонасыщенных системах процесс релаксации способен протекать активно, динамично вплоть до лавинообразного, динамического его развития.

2-2.2. Представления о релаксации в науках о Земле

Примером некорректного использования узкоспециальных представлений о релаксации, принятых в механике, может служить их применение к такому специфическому объекту, как геологическая среда.

Заметим, что осуществление «чистых» случаев, которые бы соответствовали приведенному выше формальному определению релаксации напряжений, в реальных ситуациях мало вероятно. Достаточно сказать, что условие постоянства деформации, необходимое для прямой оценки времени релаксации из опыта, трудно осуществить даже в лаборатории [Работнов, 1979]. В системах же с нефиксированной деформацией напряжения могут с течением времени не только не уменьшаться, но даже возрастать. Простейший пример такой системы – висящий вертикально упруговязкий стержень с подвешенным к нему грузом. В таком стержне с течением времени появится все возрастающая остаточная деформация (ползучесть), но упругая деформация и соответствующие ей напряжения будут поддерживаться на том же уровне и даже возрастать, поскольку поперечное сечение стержня при его последовательном удлинении становится меньше.

В литературе, касающейся оценок существования напряжений в геологической среде, случаи некорректного использования понятия релаксации напряжений по отношениям к системам с нефиксированной деформацией вполне обычны. Однако в науках о

Земле в понятие времени релаксации напряжений чаще вкладывается и другой, более употребительный на практике смысл. Время релаксации рассматривают не как характеристику уменьшения напряжений во времени, а как меру характеристического времени, по истечении которого вязкое поведение материала начинает преобладать над его упругим поведением (см., например, [Земля, 1974]). В таком понимании оно вполне может характеризовать и системы с нефиксированной деформацией. В этом случае время релаксации напряжений рассматривают как фундаментальную количественную характеристику реологического поведения вещества Земли.

Термин «релаксация» употребляется широко, но при одинаковом словоупотреблении смысл использования этого слова, а также связанные с ним оценки времени релаксации могут быть очень разными. Так, Д. Теркот и Дж. Шуберт [1985] полагают, что упругие напряжения в верхней части литосферы не релаксируют за интервалы времени порядка 1 млрд лет. В работе [Гзовский, 1975] оценка времени релаксации для консолидированных пород земной коры была определена величиной, не превосходящей 20-30 тыс. лет. Горняки-практики оценивают время релаксации горных пород величиной порядка от нескольких недель до полутора месяцев.

Причина столь большого разброса оценок времени релаксации в том, что в каждую оценку их авторами заложено свое понимание термина «релаксация», нередко сугубо прагматичное, наилучшим образом согласующееся с применяемыми методами и целями разработок. В соответствующих группах исследователей такие оценки часто имеют значение «договорных истин», установленных по соглашению.

О первой оценке. В тектонике плит последние рассматриваются как своего рода проводники напряжений. Способность плит передавать напряжения на большие расстояния очень важна для эффективного действия движущего механизма тектоники плит [Гзовский, 1975]. Но для этого плиты должны оставаться исключительно жесткими в течение очень длительных геологических промежутков времени, а это, в свою очередь, требует, чтобы времена релаксации напряжений субстрата плит достигали приведенных значений. Приведенная оценка, таким образом, фактически постулирована. В этом определенную, если не главную, роль играет то, что она делает возможным применение методов и аппарата линейной теории упругости в построениях тектоники плит. Излишне говорить о том, что такая оценка применительно

к механическому поведению реальной геологической среды вызывает обоснованные сомнения в ее корректности. Вместе с тем, количество теоретических работ, в которых явно или по умолчанию заложена эта оценка, без преувеличения можно назвать огромным.

Вторая оценка получена в лабораторных условиях при изучении ползучести нагруженных образцов пород косвенным образом и без учета масштабного фактора. При этом были использованы те же методы, которые с этой целью применяются в техническом материаловедении.

На этой оценке, в частности, основывается распространенное мнение, что в геологической среде не могут долее 20 тыс. лет сохраняться латентные напряжения, возникающие в ней при различных вещественных преобразованиях, и что они, таким образом, при медленном течении этих преобразований практически успевают «рассасываться» по мере появления.

Это утверждение равносильно тезису об отсутствии начальных напряжений в геологической среде, что, как о том уже говорилось, важно для того, чтобы к анализу механического поведения геологической среды можно было бы применить аппарат и методы механики сплошной среды.

Третья оценка получена горняками-практиками из непосредственных наблюдений в шахтах. Она соответствует промежутку времени, в течение которого устанавливается горное давление на крепь выработки. По существу эта оценка отражает время перехода массива горных пород, потревоженного горными работами, в новое неравновесное стационарное состояние. Со специалистом, который станет оперировать временами релаксации порядка тысячи лет и более, горняк разговаривать не станет.

Подробнее остановимся на второй оценке, поскольку в науках о Земле существует тенденция рассматривать ее как фундаментальную константу пород земной коры.

Трудно переоценить тот вред, который принесло некритическое использование этой оценки. Именно с ее применением связан недостаток внимания к релаксационным процессам в геологической среде. Обычно полагают, что из-за слишком большой медленности многих геологических процессов, ведущих к нарушению статистического (термодинамического) равновесия, последнее восстанавливается по мере его нарушения, вследствие чего взаимодействие этих встречных процессов является практически равновесным. Отсюда выводятся заключения, что локальные поля напряжений, например, даже если они и образуются вслед-

ствие, скажем, тех или иных геохимических процессов, успевают «рассасываться» за счет релаксации по мере их образования.

Пусть dp/dt – скорость изменения внешних сил, Δp – полная величина их изменения в данном процессе, τ – время релаксации. Тогда характер взаимодействия процессов обеих групп можно определить следующими условиями:

$$dp/dt \ll \Delta p/\tau, \tag{14}$$

$$dp/dt > \Delta p/\tau, \tag{15}$$

$$dp/dt \gg \Delta p/\tau. \tag{16}$$

Сравнительно со скоростями релаксации, определяемыми временем релаксации порядка 10 тыс. лет, внешние силы в большинстве естественных процессов изменяются слишком медленно. Так, скорости вертикальных движений в среднем редко превышают 1см/год и, как правило, они меньше. Используя приведенные выражения, нетрудно убедиться, что эти скорости недостаточны для компенсации вязкого течения вследствие релаксационных процессов. Напряжения, возникающие из-за нарушения равновесия масс горных пород в поле гравитации, согласно (2-4.1), должны релаксировать по мере их появления, т.е. взаимодействие встречных процессов должно протекать при несущественных отклонениях от равновесного состояния.

Приведем примеры использования этой оценки в обсуждаемом смысле.

В работе [Турчанинов и др., 1973. С. 55] в результате проведенного анализа динамических явлений на рудниках Хибинского массива ее авторы приходят к следующему: «Можно было бы предположить, что большие горизонтальные напряжения возникли в период формирования массива либо на последних стадиях тектонической деятельности и являются так называемыми остаточными напряжениями. Однако такое предположение приходится отвергнуть, поскольку максимальный период релаксации напряжений в тектонофизике определен в 30 тыс. лет, а возраст Хибинской интрузии (самой молодой на Кольском полуострове) составляет 300–400 млн лет».

П.Н. Кропокин [1973. С. 23]: «Избыточные» горизонтальные напряжения, значительно превышающие геостатическое давление, по-видимому, имеют тектоническое происхождение и связаны как с особенностями позднекайнозойских деформаций соответствующего участка земной коры, так и с глобальным полем напряжений, которое может соответствовать, например, общему

сокращению радиуса Земли в современную геологическую эпоху. Считать эти напряжения сохранившимися от более отдаленных, чем поздний кайнозой, геологических эпох у нас нет оснований, так как время релаксации упругих напряжений в верхних слоях консолидированной земной коры составляет величину порядка 20 000 лет. Это соответствует естественному уменьшению напряжений в миллион раз за 300 000 лет – время, которое в пять раз меньше продолжительности новейшего, самого короткого из геологических периодов – четвертичного периода. Даже приняв время релаксации равным 100 000 лет, мы найдем, что за четвертичный период напряжения должны уменьшиться в миллион раз».

Приведенные примеры типичны. Указанная оценка в качестве решающего авторитетного аргумента дамокловым мечом висит над построениями авторов, которые пытаются так или иначе учесть в своих построениях наличие остаточных (т.е. латентных – *В.П.*) напряжений в геологической среде или просто допустить их существование.

Оценка времен релаксации напряжений в геологической среде – проблема сложная и в целом, и в частностях. Мы не претендуем на ее исчерпывающее разрешение. Но наше внимание к этой проблеме выразилось в точке зрения, в соответствии с которой, помимо частностей, традиционно используемую оценку времени релаксации напряжений следует считать грубо некорректной в двух основных отношениях.

Во-первых, при оценке времени релаксации напряжений было упущено одно из хорошо известных положений статистической физики, согласно которому время релаксации зависит от размеров релаксирующих систем («масштабный фактор»): оно тем больше, чем больше размеры системы (см., например, [Ландау, Лифшиц, 1976]).

Во-вторых, переход систем в состояние вязкого течения без разрывов сплошности на больших отрезках времени является частным случаем. Наряду с деформациями, обусловленными вязким течением, широчайшее распространение в геологической натуре имеют структуры хрупкого последействия. Проблема же оценки времени релаксации для случая релаксационной дезинтеграции геологической среды вообще не рассматривалась.

В дальнейшем развитии содержания настоящей работы мы, в частности, ориентировались на разработку этих двух положений.

2-2.3. Масштабный эффект

Процессы релаксации сложны для аналитического описания даже в простейших системах. Так, в одноатомном газе равновесие устанавливается не одновременно во всем объеме, а вначале в небольших локальных объемах. Эти объемы взаимодействуют с окружением лишь на своей поверхности и поэтому являются как бы частично изолированными, процесс достижения общего равновесия постепенно замедляется. Влияние размеров такой системы на время релаксации отражает выражение $T \sim \tau\,(L/l)^2$, где l – характерный размер локального объема, L – размер всей системы, τ – время установления локального равновесия, T – время установления равновесия во всей системе. Сходную форму имеет и выражение для оценки времени релаксации в жидкости (см., например, [Яворский, Детлаф, 1963]). В этом и состоит смысл одного из основных утверждений статистической физики о зависимости времени релаксации от размеров релаксирующих систем.

Обычно в экспериментальных оценках времен релаксации, принятых в материаловедении, а затем и применительно к горным породам, неявно предполагается, что процесс релаксации происходит одновременно с одинаковой интенсивностью во всех точках релаксирующего тела. Но если в материаловедении пренебрежение учетом размеров релаксирующих тел не вносит в оценки времени релаксации значимые для практики погрешности, поскольку в технике имеют дело со сравнительно небольшими объектами, то в отношении больших геологических тел это влечет погрешности огромные.

Мы разработали модель зонной релаксации, в которой этот фактор учитывается. С его учетом оценки времени релаксации больших геологических тел возрастают на порядки. Но значение модели зонной релаксации выходит за рамки оценки времен релаксации. Как будет показано ниже, она вскрывает принцип организации структурных композиций, которые образуются в процессе релаксации, и дает представление о закономерностях развития этих структурных образований в пространстве–времени.

2-3. СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЛАТЕНТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В силу взаимосвязи между термодинамическими параметрами, латентные напряжения в реальных структурированных телах возникают практически при их любых структурных изменениях, происходящих на любом из масштабных уровней, на которых эти

тела все еще имеют характер целого, состоящего из частей. Системы, в которых возбуждаются латентные напряжения, с известной долей условности можно подразделить на *матричные, композитные* и *реактивные.*

2-3.1. Элементарные системы латентных напряжений

Повторим высказанный ранее тезис: термины «напряжения» в классической механике деформируемого твердого тела и «латентные напряжения» по своему физическому смыслу представляют собой сущности совершенно разные.

Сохранение формы тела, подверженного действию внешней силы, обеспечивают внутренние силы сопротивления этому действию. Силы сопротивления, отнесенные к единице площади поверхности, на которую действует внешняя сила, в механике деформируемого твердого тела называют *внутренними напряжениями*, или, кратко, *напряжениями*. В классической теории предполагается, что силы взаимодействия распределены достаточно равномерно и непрерывно, что и дает возможность описывать законы их изменения с помощью дифференциальных уравнений.

Что касается латентных напряжений, то их поле представляет собой ансамбль дискретных образований – единичных (элементарных) систем напряжений, в каждой из которых напряжения одного знака уравновешиваются напряжениями противоположного знака, причем уравновешивание локализовано в пространственной области, соизмеримой с масштабом соответствующей упруго деформированной области (с масштабом структурной связи между взаимно деформированными элементами структуры тела). Каждая из таких элементарных систем представляет собой по сути квант упругой энергии, а суммарная энергия множества элементарных систем и составляет собственный энергетический потенциал тела.

Внутренние напряжения возникают в теле как его реакция на внешнее силовое воздействие. В классической теории рассматриваются лишь «мгновенные» упругие деформации, которые немедленно исчезает после прекращения силы, обусловившей их появление. Что касается латентных напряжений, то участие внешних сил в их появлении представляет собой частный случай, притом возбужденные внешними силами фиксированные упругие деформации длительное время сохраняются в теле и после прекращения действия этих сил. Более того. Латентные напряжения вплоть до их критических значений могут возникать в

твердотельных системах и при полном отсутствии внешних силовых воздействий.

Возможность непосредственно наблюдать элементарные системы латентных напряжений была осуществлена в опытах Дж. Галлафера [Gallagher, 1971]. Он предложил рассматривать латентные напряжения как состоящие из двух компонент: «замкнутых» и «замыкающих» напряжений, причем сумма сил, создающих эти напряжения, должна быть равна нулю. Системы таких напряжений исследовались им на двумерной фотоупругой модели, состоящей из «зерен», беспорядочно упакованных на двумерном листе и нагруженных сначала по одной оси в жесткой раме. Напряжения внутри зерен, несущих нагрузку, уравновешиваются внешней нагрузкой, и вся система находится в равновесии. Далее «зерна» цементируются эпоксидной смолой при сохранении нагрузки. После затвердевания смолы приложенная нагрузка снимается. При этом образец в какой-то мере упруго восстанавливается. Часть нагрузки внутри зерен передается на цемент.

В этой модели «замкнутые» напряжения сосредоточены главным образом в «зернах», а «замыкающие» напряжения – в цементе, окружающем зерна. Поле же латентных напряжений в целом представляет собой ансамбль элементарных уравновешенных систем напряжений, размеры которых соизмеримы с размером «зерен».

Фиксация упругих деформаций пластической составляющей тела – распространенный случай, но, в принципе, их фиксация может быть обусловлена и другими причинами. Наглядным примером может служить стальная упругая пластина, согнутая в кольцо, а затем склеенная своими краями. Распределение напряжений в любом сечении кольца такое же, как в изогнутой балке: материал ближе к наружной части кольца растянут, ближе к внутренней части – сжат. В целом напряжения растяжения и сжатия образуют замкнутую уравновешенную систему.

Представим себе, что множество таких напряженных колец заливают цементирующим веществом. После его затвердевания образовавшийся блок модельного материала и будет представлять собой модель среды, содержащей множество элементарных систем латентных напряжений.

Представим далее, что со временем клей, которым упругие пластины скреплены в кольца, перестает держать нагрузку. В этом случае упругому восстановлению формы пластин, согнутых в кольцо, будет уже препятствовать не склейка, а цемент. Напряженное состояние такой умозрительной модели в целом будет сходно с тем, какое имеет место в рассмотренной выше модели Дж. Галлафера.

2-3.2. Матричные системы

Матричную систему можно представить как матрицу, содержащую инородные включения, дисперсно рассеянные в пространстве материала матрицы. Механизм возникновения латентных напряжений в такой системе состоит в несогласованных изменениях субстрата матрицы и ее включений.

В качестве примера матричной системы рассмотрим модель Бинза. Модель была получена горячим прессованием стеклянной матрицы с включениями частиц циркония или окиси алюминия. Латентные напряжения возникали при остывании матрицы за счет различия коэффициентов теплового расширения матрицы и включений. Чем большими были эти различия, тем ниже была прочность и меньше упругие модули модельного материала. Снижение прочности в первую очередь обусловливалось микротрещинами и разрывами, возникающими вследствие действия латентных напряжений. Трещины вдоль границ включений образовывали систему разрывов, доступную наблюдению под микроскопом [Binns, 1962].

Еще один пример – модель Райка–Вардара. В этой модели, основанной на принципе разгрузки, исследовалось разрушение модельного материала за счет латентных напряжений [Reik, Vardar, 1974]. Результаты опытов были ориентированы на изучение механизма образования трещин разгрузки в горных породах. Схема опытов была следующей.

Перфорированная круглыми отверстиями матрица из плексигласа подвергалась одноосному сжатию. В этом состоянии деформированные отверстия заливались эпоксидной смолой, после ее затвердевания нагрузка на матрицу снималась. При этом застывшая смола препятствовала упругому восстановлению формы отверстий, вследствие чего в смоле и материале матрицы возникали латентные напряжения. Если предварительное сжатие матрицы было достаточно велико, в модели системы возникали системы субпараллельных трещин отрыва, нормальных к направлению сжатия и последующей разгрузки.

Одна из наиболее изученных матричных систем, генерирующих латентные напряжения, – мартенситные превращения при охлаждении стали.

Процесс затвердевания стали из расплава не заканчивается ее переходом из жидкого состояния в твердое. Агрегатное состояние стали продолжает изменяться и в ее твердом состоянии, по мере дальнейшего охлаждения. Аустенит, образующийся при застывании расплава, последовательно переходит в перлит, бейнит

и, наконец, мартенсит. Именно особенности фазовых превращений в твердом состоянии определяют структуру стали и ее конечные свойства.

Вначале под мартенситным превращением подразумевался только процесс, приводящий к образованию мартенсита в сталях. Однако впоследствии было установлено, что характерные особенности этого процесса наблюдаются не только в сталях, но и в других металлических сплавах и даже в полупроводниках. «В настоящее время под мартенситным превращением понимается особый вид фазового превращения в твердом теле, протекающего по бездифузионному, сдвиговому механизму, называемому мартенситным, а под мартенситом – продукт такого превращения» [Гуляев, 1986. С. 229]. Поэтому фаза, из которой образуется мартенсит, называется, не по частному случаю, аустенитной, а более общо – *исходной, матричной или высокотемпературной*. При этом в мартенсит превращается не все вещество исходной фазы. Мартенситное превращение начинается с образования «зародышей», рассеянных хаотически в исходной фазе, и сопровождается возрастанием их объема. Вмещающий материал препятствует свободному расширению зародышевых частиц мартенсита, вследствие чего и возникают элементарные системы латентных напряжений, рассеянные в веществе исходной матрицы.

Особенности мартенситных превращений вызывают особый интерес по той причине, что превращения такого же рода весьма вероятны в породах средней земной коры в процессе охлаждения при их вертикальной эскалации. Диапазон температур здесь примерно тот же, при котором происходят и мартенситные превращения в стали. В высокотемпературной исходной матрице по мере ее охлаждения возникают фазовые превращения (например, переход кварца из альфа-формы в бета-форму), в результате чего в зоне, где осуществляется этот переход, могут возникать латентные напряжения. Далее мы покажем, что в земной коре существуют слои, которые отличаются повышенной энергонасыщенностью по отношению к выше- и нижележащим слоям. Не исключено, что природа их энергонасыщенности, в частности слоя пониженных скоростей, обусловлена фазовыми превращениями по типу мартенситных.

Особенности мартенситных превращений изучены весьма основательно. Они дают материал для конструктивных аналогий и в отношении фазовых превращений в земной коре, физическая сущность которых в общих чертах представляется сходной. Тем не менее, в обсуждение этой возможности мы здесь входить не будем. Бегло отметим лишь некоторые из подробностей, кото-

рые представляются нам исключительно интересными. Каждая из них чревата комплексами идей в отношении их приложений к различным сторонам процессов структурирования геологической среды, а в особенности – к деталям формирования слоев пониженной скорости.

Типичная форма мартенситного кристалла – пластина или линза с малым отношением толщины к другим линейным размерам. По существу это как бы трещина, заполненная мартенситом. Время образования одного кристалла мартенсита менее одной миллионной доли секунды, а скорость его роста близка к скорости звука в твердом теле. Если температура исходной матрицы достигает значения, при котором возможно мартенситное превращение, мартенсит образуется с громадной скоростью, но только определенное его количество. Для возобновления превращения субстрат следует охладить до более низкой температуры. Следовательно, в целом скорость процесса фазового превращения в блоке материала контролируется скоростью его охлаждения.

Из предыдущего следует, что при градиентном изменении температуры область, в которой происходит мартенситное превращение, должна представлять собой зону определенной мощности («слой»). Обращает на себя внимание то, что при этом происходят и структурные изменения. Мартенситные пластины, образовавшиеся в первую очередь, – пластины первой генерации – могут «пройти» через все зерно аустенита, а образовавшиеся при более низкой температуре – пластины высших генераций – располагаются между ними. Образование мартенситных пластин протекает в соответствии со сценарием фрагментации, свойственным разрушению энергонасыщенных твердых тел.

Приложение внешних сил или упругих деформаций увеличивает количество образованного мартенсита и повышает температуру начала его образования.

В процессе мартенситного превращения атомы смещаются относительно друг друга на расстояния, не превышающие межатомные. Но, несмотря на то, что относительные перемещения атомов малы, абсолютные смещения атомов могут достигать макроскопических значений, что, в частности, отражается в искажении формы зерен аустенита. Выделенное нами положение важно в том отношении, что по той же схеме возможен переход накопленных упругих деформаций в смещения.

В качестве примеров матричных систем могут быть упомянуты также: пластическое деформирование металла, при котором его более упругие частицы оказываются запрессованными в бо-

лее податливую пластичную матрицу остального материала; имплантация примесных атомов в чужеродные кристаллические решетки, что ведет к упругой деформации в близкой окрестности внедрившихся атомов и появлению соответствующих элементарных систем латентных напряжений. Эти и другие примеры матричных систем также изобилуют интересными деталями, но их освещение требует слишком больших отклонений от основного содержания настоящей работы. Некоторые из этих примеров будут рассмотрены ниже, в контексте дальнейшего изложения.

Представление об упруго-вязком поведении тел, на котором основано изучение механических свойств тел с наследственной упругостью, восходит к матричной модели, когда упругие элементы тела запрессованы в матрицу, состоящую из вязкого материала. Упруго деформированное включение воздействует на свою вязкую периферию. Она начинает течь, упругие деформации высвобождаются, и тело с течением времени восстанавливает свою форму до исходной.

Следует, однако, иметь в виду, что, во-первых, фиксация упругих деформаций вязким субстратом – не единственная форма их фиксации (например, в случае имплантации примесных атомов), а во-вторых, – это в особенности важно – освобождение фиксированных упругих деформаций сопровождается появлением трещин даже в таких пластичных материалах, как сталь. Что касается горных пород, то явление их растрескивания в процессе высвобождения фиксированных деформаций, в особенности пород, содержащих кварц, выражено наиболее ярко. Это явление в параллель термину «упругое последействие», определено нами как явление «хрупкого последействия». Оно практически не изучено. В дальнейшем мы это явление, важнейшее для понимания механического поведения энергонасыщенных горных пород, рассмотрим специально.

Другое важное замечание: матричные системы, содержащие фиксированные упругие деформации, представляют собой системы с автономными источниками энергии, рассредоточенными в материале матрицы. Как будет показано далее, характер разрушения твердотельных систем в своих основных чертах предопределяется видом их энергоснабжения. Предваряя дальнейшее содержание работы, укажем, что одной из широко распространенных в геологической среде форм разрушения, обусловленных автономным энергоснабжением, является появление систем трещин отдельности, расчленяющих субстрат на отдельные фраг-

менты, причем во всех трех измерениях. Примером структур, образующихся в результате этого, могут служить системы трещин отдельности и блоковая делимость земной коры.

2-3.3. Контактные системы

Под контактными системами возбуждения латентных напряжений будем понимать такие системы, в которых напряжения возникают вследствие несовместных деформаций поверхностей контакта структурных составляющих этих систем.

Одними из широчайше распространенных контактных систем, природных и искусственных, являются слоистые системы, в их простейшем выражении предстающие как двухслойные.

Двухслойность является наиболее ярко выраженным структурным элементом геологической среды. Это и смежные слои осадочных пород, и тектоническая расслоенность земной коры. Сама Земля состоит из сферических оболочек, вложенных одна в другую. Каждая пара смежных слоев, или «сфер», представляет собой двухслойную систему, в которой возможна передача механических усилий от слоя к слою по поверхности их контакта. К формированию двухслойности ведет излияние внутренних расплавов на земную поверхность. Расплав при застывании стремится к сокращению своего объема, чему сопротивляются подстилающие (вмещающие) породы. В результате возникает соседство двух слоев, один из которых накапливает растягивающие напряжения, а другой – сжимающие. Да и просто соседство двух контактирующих слоев, блоков или даже отдельных минералов с разными физическими параметрами в процессе общего изменения термодинамической обстановки приводит к разному сокращению или увеличению их объемов и, следовательно, к формированию двухслойных систем. В качестве двухслойных систем могут рассматриваться зоны разрывных нарушений, имеющие широчайшее распространение в геологической натуре и часто выступающие как зоны повышенной концентрации напряжений. Одним из немногих геологических признаков локализации сейсмичности, имеющих универсальное значение, является приуроченность сейсмичности к зонам сочленения блоков земной коры с контрастными свойствами.

Рассмотрим принципы «работы» контактных систем на примерах.

Явление неравновесной кристаллизации твердого раствора при охлаждении стали заключается в том, что в процессе ее ох-

лаждения возможен распад твердого раствора на исходную и вторичную фазы. При медленном охлаждении можно добиться того, что высокотемпературная вторичная фаза в переохлажденном состоянии сохранится вплоть до комнатной температуры. Кристаллы новой фазы не только крупнее, но ориентационно не связаны с маточной фазой. Слой атомов, принадлежащий старой фазе, соседствует со слоем атомов новой фазы. «Подобное сочленение кристаллических решеток называется *когерентным*. На границе раздела при когерентной связи возникают и сохраняются напряжения тем большие, чем больше отличие в строении (в плоскости раздела) сопряженных решеток» [Гуляев, 1986. С. 230]. Процесс фиксирования неустойчивого состояния быстрым охлаждением и называется широко известным термином – *закалка*.

Латентные напряжения подобной природы В.И. Вернадский называл *ориентационными* напряжениями и указывал на то, что они могут существенно влиять на механическое поведение геологической среды.

Другой пример. Горная порода поликристаллична. Это агрегат сцементированных между собой зерен различных минералов. Элементарными структурными единицами горной породы являются минеральные ячейки, состоящие из двух сцементированных между собой минеральных зерен. Рассмотрим схему возникновения латентных напряжений на упрощенной модели, представляющей собой систему из двух сцементированных между собой зерен А и Б с упругими модулями $E_А$ и $E_Б$. Для простоты примем, что оба зерна имеют единичное сечение.

Предположим, что такая структурная ячейка сформировалась при давлении P и что в последующем она была подвергнута одноосной разгрузке, так что в конечном рассматриваемом состоянии величина давления по направлению одной из пространственных осей уменьшилась на величину ΔP. Рассматриваемая задача по типу сходна с задачами определения напряжений в статически неопределимых системах (см. [Дарков, Шапиро, 1969]). Решение этой задачи дает: $\sigma_А = \Delta P(E_А - E_Б)/(E_А + E_Б)$ и $\sigma_Б = \Delta P(E_Б - E_А)/(E_А + E_Б)$.

Из приведенного выражения ясно, что напряжения в разных зернах имеют разные знаки и что они тем больше, чем больше различия упругих модулей минеральных зерен. Одно из зерен их взаимным деформированием растянуто, другое сжато. Совместно же они образуют замкнутую самоуравновешенную локальную систему, размеры которой соизмеримы с размерами минеральной ячейки. Очевидно, что латентные напряжения появятся в двухэле-

ментных системах и при изменении температуры при том условии, конечно, что термоупругие модули ее элементов будут различны.

Наиболее распространенные горные породы земной коры – гранит, сиенит, гранодиорит, диорит, габбро, диабаз, дунит, перидотит, платобазальт–содержат 40–70% кварца. С другой стороны, упругие модули кварца в 5–7 раз меньше упругих модулей подавляющего большинства других минералов, входящих в состав указанных пород [Справочник..., 1969]. В сочетании с высокой упругостью столь резкое отличие упругих модулей кварца от упругих модулей других породообразующих минералов ставит этот широчайше распространенный минерал в особое положение. Он играет роль своего рода «рабочего тела», которое обеспечивает содержащим его породам исключительно большую энергоемкость. Именно породы, содержащие кварц, переходят в энергонасыщенное состояние легче всего и чаще всего в нем пребывают. Это, в частности, выражается в том, что породы с высоким содержанием кварца особенно благоприятны для развития в них различных динамических явлений, возникающих при ведении подземных работ (см., например, [Забигайло, Белый, 1981]).

В системе скрепленных между собой двух металлических пластинок с разными модулями температурного расширения в *биметаллических термостатах* при изменении температуры возникают тепловые напряжения – растягивающие в одной из пластинок и сжимающие в другой, так что в целом напряжения образуют самоуравновешенную систему (рис. 2-1). В результате действия этих напряжений пластинка изгибается.

Читатель, заинтересованный в более подробных сведениях о механическом поведении биметаллических термостатов, найдет соответствующие материалы в работе [Тимошенко, 1971]. Отметим некоторые сведения из этой работы, имеющие для излагаемой здесь темы особый интерес.

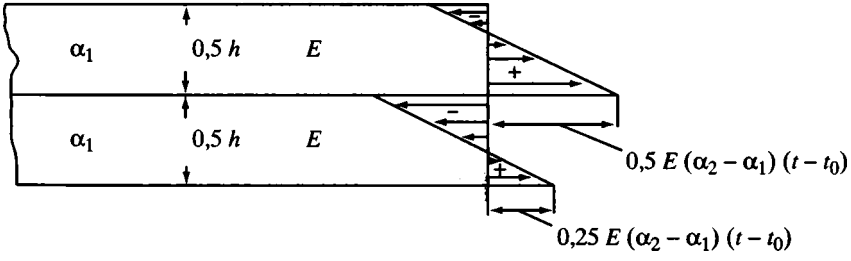


Рис. 2.1. Распределение нормальных напряжений по произвольному поперечному сечению биметаллической полосы при равномерном нагреве [Тимошенко, 1971]

Максимальное напряжение биметалла при нагревании p_{max} возникает в волокнах на поверхности соединения обоих металлов. Это напряжение состоит из напряжения, обусловленного осевой силой, и напряжений, вызванных изгибающим моментом. Произведя несложные вычисления, можно получить, что в одной полосе оно составляет $p_{max} = 0{,}5E\,(\alpha_2 - \alpha_1)(t - t_0)$, где E – модуль упругости, α_1, σ_2 – коэффициенты теплового расширения, $t - t_0$ – разность конечной и начальной температур термостата. В другой полосе напряжение p_{max} имеет ту же величину, взятую с обратным знаком. Распределение нормального напряжения в произвольном поперечном сечении полосы см. на рис. 2-1. Если принять $E = 1{,}9 \cdot 10^6$ кг/см^2, $\alpha_2 - \alpha_1 = 4 \cdot 10^{-6}$ 1 °C, $t - t_0 = 200$ °C, то $p_{max} = 759$ кг/см^2. Приведенное вычисление показывает, что при изменении температуры контактных систем в них могут развиваться весьма значительные напряжения.

Если создать систему, в которой вместо тонких пластинок будут взяты достаточно массивные блоки, то изменение температуры может вести не к изгибу, а к срыву блоков относительно друг друга – к явлению *расслоения* системы. В рассмотренном случае причиной появления латентных напряжений является физический процесс – изменение температуры. Но очевидно, что такие же следствия повлечет за собой не только изменение температуры, а любой термодинамический процесс, в котором возникнут несогласованные изменения метрики контактирующих блоков. Таким образом, двухслойные системы, в которых сочленены слои или блоки вещества с разными свойствами, отреагируют на изменение внешних условий появлением напряжений в зоне их контакта. Поскольку же двухслойные системы являются универсальным структурным элементом геологической среды, то они играют значительную, а в каких-то случаях и определяющую роль в специфике ее напряженного состояния.

В этой связи обращает на себя внимание тот факт, что зоны сочленения блоков пород с контрастными свойствами отличаются повышенной сейсмичностью, а опыт ведения горных работ показывает, что напряженность пород в удароопасных шахтах возрастает по мере приближения к зонам разрывных нарушений. Уместно здесь обратить внимание и на тот факт, что горный удар часто начинается с динамического образования щели между пластом полезного ископаемого и вмещающей его породой [Петухов и др., 1969]. Согласно той же логике, возможны ситуации, когда в тектоническом плане разрывы являются вторичными образованиями в пограничных зонах, разделяющих первично неоднородные массивы среды.

2-3.4. Реактивные системы

В процессе сварки прямоугольной стальной рамы возникают напряжения трех видов на трех масштабных уровнях [Остаточные..., 1957].

Во-первых, это напряжения на уровне кристаллических решеток стали. Они возникают вследствие растворения в расплаве молекул газов воздуха и флюса, используемого при сварке, – вследствие внедрения чужеродных атомов в кристаллическую решетку исходной матрицы.

Во-вторых, это напряжения вследствие несоразмерных изменений объема в зоне сварного шва в результате неравномерного нагрева и охлаждения в процессе сварки и в процессе последующего охлаждения.

В-третьих, изменения температуры, обусловленные нагревом и охлаждением металла, ведут к несоразмерным изменениям длины свариваемых деталей рамы. В результате в раме появляются напряжения, обусловленные реакцией материала на эти изменения. Такие напряжения получили название *реактивных*. Появление реактивных напряжений, в частности, может привести к деформации всей рамы – к ее *короблению*.

Ф. Кампю предложил следующую классификацию *сварочных напряжений* [Остаточные..., 1957].

Первичные (direkt) *сварочные напряжения* возникают всегда в любом случае сварки, даже в том случае, если свариваемый объект совершенно свободен от связей. Эти напряжения локализуются в непосредственной близости от сварного шва и быстро уменьшаются в обе стороны от него. Их поэтому можно назвать также *местными сварочными напряжениями*.

Если свариваемый объект не свободен, а стеснен в своих температурных деформациях, то сварка приводит к появлению *вторичных* (indirekt) *сварочных напряжений*, появляющихся во всем изделии, которые представляют собой частный случай *реактивных напряжений*. Местные напряжения вызывают растрескивание металла только в месте сварки. Что касается реактивных напряжений, то они могут вызвать возникновение трещины в любой наиболее ослабленной части изделия.

Если бы локальный нагрев происходил в системе стержней с их шарнирными сочленениями, то изменение длины стержней привело бы к изменению формы рамы, чем реактивные напряжения были бы в ней сняты. Реактивные напряжения, следовательно, могут возникать лишь в системах с жестко фиксированным

сопряжением их элементов. Такие системы называют *статически неопределимыми.*

В отличие от напряжений первых двух видов, локализованных в зоне сварного шва, реактивные напряжения в масштабе системы перманентны. За их появление ответственны дальнодействующие связи. Чтобы снять эти напряжения, достаточно разрезать раму в любом сечении. При этом в плоскости разрыва произойдет скачкообразное смещение его берегов.

Заметим, что появление реактивных напряжений при изменении температурного режима является частным случаем. Реактивные напряжения могут возникать в статически неопределимых системах при несогласованных изменениях метрики их структурных составляющих независимо от того, какой причиной вызваны эти изменения – изменением температуры или какой-либо другой причиной – например фазовым переходом. В технике такие ситуации редки и потому не рассматриваются. Но геологические тела с точки зрения механики представляет собой статически неопределимые системы и вместе с тем в них протекают самые разнообразные процессы, влекущие за собой изменение метрики их структурных составляющих. Вследствие жесткого сопряжения структурных элементов такие изменения должны неизбежно сопровождаться появлением латентных напряжений типа реактивных.

Пример сварной рамы показывает, что реактивные напряжения обладают свойством дальнодействия: хотя они возбуждаются в раме локальной причиной – разогревом металла в месте сварного шва, – они имеют место во всей раме, вследствие чего она, например, может покоробиться. Чтобы снять реактивные напряжения, достаточно разрезать раму в любом месте. Разумеется, они снимутся и в том случае, если рама в каком-либо из ослабленных сечений лопнет «сама». При этом на берегах возникшей трещины возникнут смещения, пропорциональные деформации, накопленной всей системой.

Подобные аналогии дают определенный эвристический материал для его приложения к попыткам понять эффекты коробления геологических структур, а также к уяснению механизма сочетания пликативных и дизъюнктивных нарушений в геологической среде, в частности к уяснению связи между накопленными деформациями среды и их высвобождением при развитии сейсмогенного разрыва.

В технике способность статически неопределимых систем возбуждать реактивные напряжения порождает проблемы самые разнообразные. Так, температурное удлинение железнодорож-

ных рельсов или длинных трубопроводов может привести к их макроскопическим деформациям. Чтобы это не произошло, при укладке рельсов между их торцами оставляют зазоры, а в трубопроводы через определенные расстояния встраивают компенсационные петли. В деревенских домах, для того чтобы избежать коробления стен из досок, доски крепятся не встык, а накладываются друг на друга, подобно чешуям. Другими словами, технические и строительные системы проектируются так, чтобы их элементы во избежание деформаций вследствие появления реактивных напряжений в сочленениях располагали бы некоторой свободой перемещения.

Что касается природных статически неопределимых систем, то сама идентификация таких систем, механизмы возбуждения в них реактивных напряжений и возбуждаемые ими деформации остаются нетронутым полем будущих исследований. По этому поводу сейчас можно сделать лишь некоторые предварительные замечания.

Согласно принципу Сен-Венана, напряжения убывают от места приложения силы (от «грузовой площадки») примерно по экспоненте. Этот принцип, по всей видимости, не распространяется на реактивные напряжения: они могут передаваться вследствие дальнодействующих связей на расстояния, многократно превышающие область их возбуждения без заметной убыли.

Другой момент. Рост реактивных напряжений может вести к различным видам деформации среды: не только к ее короблению, но и к компенсационному смещению ее отдельных частей относительно друг друга. В пластичных породах этот рост может вести к появлению вязкого течения, локализованного в относительно узких зонах, и, в конечном счете, к смещению геологических тел относительно друг друга, что, в частности, может быть интерпретировано как тектоническое расслоение. В хрупких породах компенсационные деформации могут выражаться срывами блоков пород или литопластин относительно друг друга с образованием разрывных нарушений.

Еще один момент. Геологическая среда не является идеальной статически неопределимой системой: она включает в себя структурные элементы, которые способны играть роль компенсирующих «устройств», возможность смещения по которым ослабляет жесткость конструкции системы. Такую «демпфирующую» роль могут играть разрывные нарушения или пластичные включения, а также свободные поверхности – дневная поверхность, прежде всего. Говоря языком математической теории поля, геологическая среда включает в себя зоны и области *стока*

деформаций. Мы будем пользоваться для обозначения таких областей и зон также названием *демпфирующее пространство*.

Тема механического поведения геологической среды как ансамбля структурных композиций, представляющих собой статически неопределимые системы, крайне интересна для обсуждения. Однако она требует дальнейшей разработки.

2-3.5. Системы с зависимым и независимым энергоснабжением

Энергоснабжение двухслойных систем может быть двояким. Оно может осуществляться за счет несовместного деформирования контактирующих слоев вследствие процессов, которые влекут за собой изменения метрики какого-либо одного из слоев или обоих слоев (как в случае биметаллического термостата). Но оно может осуществляться и посредством внешних сил, приложенных к одному из слоев двухслойной системы. В последнем случае энергия может сообщаться одному слою – «пассивному» – посредством деформации внешними силами другого слоя – «активного». Системы с таким видом энергоснабжения были реализованы в двухслойных моделях с эластичным основанием, которые использовались для изучения закономерностей процесса фрагментации. Модели этого типа будут подробно рассмотрены в главе 4. Предварительно же укажем на принцип их устройства.

Конструктивной основой модели является лист резины, на который заливают расплав легкоплавкого материала (парафин, канифоль). Затвердевая при охлаждении, модельный материал прочно сцепляется с резиновой подложкой. Далее лист резины подвергают одноосному, двухосному или плоскому всестороннему растяжению с помощью системы домкратов. Усилие, сообщаемое резиновой подложкой, передается и сцепленному с ним плоскому блоку модельного материала – верхнему слою, в результате чего в нем образуются системы трещин отдельности, расчленяющие его на отдельные фрагменты.

Остановимся на особенностях энергоснабжения такой модели.

Поскольку слои контактируют по всей площади, деформирующее усилие передается от активного слоя к каждому элементу площади пассивного слоя независимо от энергоснабжения его других элементов. Если элемент пассивного слоя, скажем, разрушится или отслоится от своей подложки, то это на энергоснабжении остальных элементов существенным образом не отразится. Особенности разрушения такой системы будут точно такими же,

как если бы это была система, накопление энергии в которой осуществляется по принципу термостата – за счет энергетических преобразований, которые происходят в самой системе. В двухслойных системах выход из строя одного или нескольких рабочих элементов не вызывает существенных нарушений в энергоснабжении остальных элементов независимо от того, снабжаются они энергией от внешнего или внутреннего источника. В этом отношении системы, в которых энергия передается от активного слоя к пассивному по всей площади контакта, могут быть определены как *системы с параллельным энергоснабжением*. Что касается систем типа термостата, в которых активными являются оба слоя и упругая энергия возникает в них независимо от внешних сил, то они представляют собой *системы с автономным энергоснабжением*. К такого рода системам относятся также и системы матричного типа, содержащие в себе множество самостоятельных источников энергии. Элементарные источники энергии, по сути кванты энергии, дисперсно рассеяны в субстрате системы. В такой системе каждый элемент ее объема располагает автономным запасом энергии независимо от ее содержания в других элементарных объемах. Выход из строя одного элемента, сопровождающийся аннигиляцией его энергетического потенциала, никак не сказывается на наличии запаса энергии в других элементах.

В системах с параллельным и автономным энергоснабжением их элементы снабжаются энергией независимо друг от друга. В силу принципа независимости энергоснабжения характер разрушения систем с автономным и параллельным энергоснабжением в своих определяющих чертах обладает принципиальным сходством. И те и другие мы в дальнейшем будем именовать *системами с независимым энергоснабжением их элементов*.

Примером *систем с зависимым энергоснабжением их элементов* являются системы с последовательным энергоснабжением. Простейший пример такой системы – простое одноосное растяжение стержня в испытательной машине. Усилие в такой системе последовательно передается от одного сечения стержня к соседнему сечению. Появление магистральной трещины, секущей образец в любом его сечении, тем самым прекращает энергоснабжение всей системы в целом. Такие системы мы будем называть *системами с последовательным энергоснабжением их элементов*. Последовательное энергоснабжение осуществляется при растяжении и иных системах приложения внешних сил: изгибе, кручении и т.д.

Механические процессы в энергонасыщенных системах – их разрушение, в частности, осуществляются за счет их собственно-

го энергетического потенциала, т.е. такие системы являются системами с независимым энергоснабжением уже по определению. Между тем в классической механике деформируемого твердого тела рассматривается почти исключительно механическое поведение тел в условиях последовательного энергоснабжения. В частности, основные теории прочности исходят из экспериментальных прототипов, в которых образцы испытывались в условиях последовательного энергоснабжения, главным образом при растяжении, в том числе и в тех случаях, когда теории развиты на аксиоматической основе, в которой об экспериментальной основе явно не упоминается.

Как будет показано далее, вид энергоснабжения является основным фактором, который предопределяет характер разрушения. Представление о зависимости разрушения от вида энергоснабжения является нашим нововведением, необходимым для описания разрушения энергонасыщенных сред, которые как раз и представляют собой системы с независимым энергоснабжением.

2-4. МЕХАНИЗМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЛАТЕНТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В общих чертах причина появления латентных напряжений, как о том уже упоминалось, состоит в несогласованных изменениях размеров, объема и формы смежных в пространстве структурных элементов твердого тела в процессе его структурной перестройки. Теперь рассмотрим различные механизмы возбуждения латентных напряжений более детально.

Предварим содержание этого раздела текста следующим замечанием.

Информация о механизмах возбуждения латентных напряжений в горных породах крайне скудна. Основные сведения, касающиеся этой проблемы, получены в технике. Однако физическая картина образования латентных напряжений в принципиальном существе остается одинаковой для технических материалов и горных пород. Во всяком случае, результаты, полученные в технике, могут рассматриваться как модельные и служить отправной точкой при будущих исследованиях механизмов возникновения латентных напряжений уже в геологической среде. Они дают представление о многообразии и своеобразии ситуаций, в каких латентные напряжения могут возникать и в природе.

По типу механизма возбуждения Х.Д. Тиц [Tietz, 1980] предложил следующую классификацию латентных напряжений:

1. *Термические (тепловые) напряжения.*

2. *Деформационные напряжения*, образующиеся в результате неоднородной деформации под действием внешней нагрузки.

3. *Трансформационные напряжения*, образующиеся вследствие неоднородных или неодновременных структурных преобразований, связанных с изменениями объема.

4. *Дисперсные напряжения*, обусловленные дефектами кристаллической решетки.

5. *Ориентационные напряжения*, которые возникают вследствие анизотропии упругих свойств, теплопроводности, термоупругих свойств и др.

Рассмотрим механизмы возбуждения латентных напряжений по этим подразделениям.

2-4.1. Тепловые напряжения

Причиной возникновения напряжений могут быть изменения температуры. При этом различают «термоупругие» и «тепловые» латентные напряжения. Первые возникают в теле, тепловое поле которого неоднородно, вторые возникают и в том случае, если тепловое поле тела остается пространственно-однородным. Вообще, в обоих случаях напряжения возникают вследствие неоднородных деформаций различных частей тела при изменении его температуры, но термоупругие напряжения существуют как функция времени и при выравнивании теплового поля исчезают полностью, а тепловые латентные напряжения в этом случае сохраняются.

Термические (тепловые) напряжения образуются при остывании вследствие неодинаковых деформаций различных зон сечения тела и неодинаковых коэффициентов их теплового расширения. Например, периферия цилиндра охлаждается быстрее, чем его внутренние части, вследствие чего на периферии возникают растягивающие, а в центре – сжимающие напряжения, в целом образуя замкнутую уравновешенную систему. Если не превзойден предел пластичности материала, то по мере выравнивания температуры возбужденные напряжения исчезают. Но если произошли необратимые деформации материала, то напряжения в образовавшейся механической системе сохраняются и после выравнивания температуры, причем их знак в процессе остывания может смениться даже на противоположный [Tietz, 1980].

Во время охлаждения металла, нагретого выше критической точки, одновременно протекают два процесса, связанные с изме-

нениями его объема: 1) уменьшение объема металла при охлаждении, зависящее от коэффициента температурного сжатия, и 2) изменение объема металла от происходящих в нем структурных превращений (например, при закалке сталей). Пока эти объемные изменения происходят в пластичном металле, т.е. пока объемные изменения могут вызвать равномерную во всем объеме пластическую деформацию, латентные напряжения в термически обрабатываемом изделии создаваться не будут. Когда же часть обрабатываемого изделия (более тонкая часть, нагруженный слой) остынет до непластичного состояния, а часть будет оставаться еще пластичной, после окончательного охлаждения всего изделия в нем создадутся латентные напряжения, так как за изменениями объема остывающих пластичных слоев металла не могут свободно следовать связанные с ними уже непластичные слои.

Пример: в охлаждающемся снаружи к центру диске сердцевина не приобретает соответствующего ей после охлаждения размера, оставаясь растянутой, а наружный слой – сжатым. При внутренних структурных превращениях, сопровождающихся увеличением объема при охлаждении, происходит обратное. Расширяющаяся после охлаждения наружного слоя сердцевина растягивает наружные слои металла, оставаясь сжатой.

Если возникающие латентные напряжения достигают большой величины, то они могут вызвать коробление или растрескивание изделий. В практике термических цехов такого рода брак изделий занимает очень большое место [Конторович, Лившиц, 1943].

Представим себе отливку из однофазного металла, кристаллы которого обладают разными коэффициентами теплового расширения в разных направлениях. При температуре немного ниже точки затвердевания кристаллические зерна ориентированы произвольным образом, но полностью подогнаны друг к другу. При охлаждении металла до комнатной температуры различное расширение зерен приводит к образованию взаимодействия между зернами. Возникающие при этом напряжения могут достигать весьма большой величины, но будут уравновешены в очень малых локальных областях.

Подобная же картина наблюдается в случае двухфазного металла, в котором обе фазы имеют различные коэффициенты расширения. В результате того, что наружные слои остывают быстрее, чем внутренние, например после прокатки профилированной стали, при сохранении механической сплошности проката в нем возникает своего рода физическая расслоенность, выража-

ющаяся в возникновении наружных и внутренних слоев с разными физическими свойствами. Известны случаи коробления или взрывообразного разрушения проката, причиной которых являются латентные напряжения, возникшие вследствие неравномерного охлаждения изделия в целом.

В литературе обычны упоминания о случаях растрескивания излившихся лав в процессе их остывания или деструкции интрузивных тел и вмещающих их пород. Указывая на то, что они возникают по причине изменений температуры и связанных с этим изменений объема, эти случаи с точки зрения механики обычно не рассматриваются с такой углубленностью, как в отношении приложений в инженерном деле.

Здесь мы хотим остановиться на особом случае, который, по логике вещей, может играть существенную роль в структурной эволюции земной коры. С течением геологического времени денудацией положительных форм рельефа вскрываются горные породы, которые прежде находились на глубине в десятки километров при температуре в сотни градусов. По мере их приближения к земной поверхности они охлаждаются до температуры в десятки градусов. Это означает, что в режиме эскалации пород происходит глубокое изменение их термодинамического состояния по TP-параметрам со всеми вытекающими из этого структурными преобразованиями. При этом, в частности, с необходимостью должны возникать значительные тепловые напряжения, которые могут послужить причиной физической стратифицированности толщ земной коры, выраженной, например, их объемным разуплотнением на микроуровне (и соответствующими изменениями геофизических характеристик среды) или образованием субгоризонтальных трещин – первичной слоистости, задающей кинематические характеристики дальнейшей тектонической расслоенности.

2-4.2. Деформационные напряжения

Указания на то, что латентные напряжения деформационной природы могут появляться в металлических материалах при разнообразных механических воздействиях, весьма многочисленны.

По Э. Махерауху [Macherauch, 1979], деформационные напряжения возникают при получении, переделе и обработке металлических материалов во всех тех случаях, когда участки объема одного материала под действием механических, термических или химических процессов подвергаются остаточному изменению своей формы, и им в этом препятствуют соседние участки объе-

ма. Обычно связанные с этим неоднородные пластические деформации ведут к упругой несовместимости во взаимном сопряжении соседних элементов тела. У металлических материалов в принципе не может быть состояния в строгом смысле без латентных напряжений.

По А. Надаи [1969], если часть или несколько частей тела подвергались необратимому деформированию за пределом упругости и затем внешние нагрузки и моменты удалялись, то в чрезмерно деформированных областях и вокруг них будут действовать латентные напряжения. Приводящее к их возникновению течение может иметь пластическую природу, как в ковких металлах, или вызываться медленной необратимой ползучестью при повышенной температуре и продолжительном действии нагрузок; в вязко-упругих средах оно может обусловливаться вязкими частями деформации, которые могут накапливаться, когда тело находится в деформированном состоянии в течение большого промежутка времени. А. Надаи рассматривает механизм возникновения латентных напряжений на большом количестве разнообразных примеров: при автофреттаже (при искусственном создании латентных напряжений в толстостенных стволах артиллерийских орудий за счет их необратимого расширения), в случае запредельного вращения дисков паровых турбин, в колесах железнодорожных вагонов при торможении и др.

По И.А. Биргеру [1963], латентные напряжения возникают в деталях большинства технологических операций (при литье, ковке, термической и механической обработке) и по своей величине могут превосходить напряжения от внешних нагрузок; например, в поверхностных слоях деталей машин после шлифования деформационные напряжения иногда достигают 60–80 кг/мм^2.

2-4.3. Трансформационные напряжения

Механические напряжения, приложенные к изделиям, находящимся в химически агрессивной среде, активизируют процесс их коррозии. То же относится к изделиям, не нагруженным извне, но в которых химические процессы вызывают появление латентных напряжений. Может показаться невероятным, что хлориды, содержащиеся в питьевой воде, могут в течение нескольких часов вызвать растрескивание толстой детали, изготовленной из нержавеющей стали [Anderson, Grew, 1977].

В литературе описаны различные случаи возникновения значительных латентных напряжений вплоть до разрушающих, свя-

занные с фазовыми переходами (например, уже рассматривавшееся мартенситное превращение в стали в процессе ее охлаждения), внедрением в кристаллические решетки примесных атомов водорода, выпадающих из раствора (взрывы химических реакторов) и др. [Отстаточные..., 1957].

Газ в вещественной матрице может появиться при затвердевании металла или после затвердевания в результате выделения из твердого раствора, или в результате внутренних реакций, сопровождающихся выделением газообразных продуктов (см., например, [Морозов, 1950] или [Потак, 1955]).

Реакция с образованием газообразных продуктов может происходить внутри твердой фазы, если имеется достаточная энергия для образования центров кристаллизации или если центры кристаллизации возникли из-за раковин, существовавших ранее. Примером могут служить включения пара, образующегося при отжиге в водороде меди или серебра, содержащих кислород. Возникающие в этих случаях латентные напряжения оказываются достаточными для образования сильного растрескивания и повышения хрупкости металла.

2-4.4. Дисперсные напряжения

Масштабный уровень, на котором образуются трансформационные и дисперсные напряжения, примерно один и тот же. По существу сходны и механизмы их образования. Четкой границы между теми и другими нет. Но если, говоря о трансформационных напряжениях, имеют в виду их обусловленность изменениями объема, то дисперсные напряжения рассматриваются под углом зрения их влияния на прочность.

Дисперсные напряжения по классификации, принятой в технике, относятся к напряжениям третьего рода. Они образуются при всех тех процессах, при которых образуются дислокации и иные дефекты кристаллических решеток, ведущие к несовместимостям в структуре решетки. Эти дефектные конфигурации и их латентные напряжения играют фундаментальную роль при пластической деформации, образовании трещин хрупкого разрушения, росте усталостных трещин, эффекте Баушингера [Macherauch, 1979; Макклинток, Аргон, 1970].

Разрушение твердых тел на уровне их кристаллического строения – это отрыв атомных плоскостей. Необходимые для этого напряжения могут быть вычислены теоретически. Прочность, соответствующую этим вычислениям, называют «теоретической». Реальные же кристаллы разрушаются при напряжениях

на несколько порядков меньших, чем их теоретическая прочность, что объясняется существованием в них микроскопических зародышевых трещин.

Зарождение микротрещин может произойти лишь в том случае, если в кристалле могут возникнуть напряжения, достигающие величины его теоретической прочности. Согласно современным представлениям, высокие растягивающие напряжения, необходимые для разрушения правильной кристаллической решетки, достигаются не за счет концентрации напряжений от внешних сил на опасных дефектах кристалла, а за счет процессов, вызывающих образование дислокаций и тем самым возбуждающих латентные напряжения, достаточные для отрыва атомных плоскостей. Таким образом, на первых этапах развития зародышевой трещины работа по образованию новой свободной поверхности покрывается за счет запаса энергии латентных напряжений. Лишь когда трещина достигнет гриффитсовских размеров, затраты на поверхностную энергию могут быть покрыты уже за счет работы внешних сил [Павлова, 1970].

2-4.5. Ориентационные напряжения

Один из частных случаев возбуждения ориентационных латентных напряжений – за счет произвольной ориентировки кристаллических зерен при остывании отливки из однофазного металла – обсуждался выше. Рассмотрим еще один случай: возбуждение напряжений второго рода, обусловленное анизотропией пределов текучести в кристаллах.

Пусть значения предела текучести для разных кристаллов лежат в пределах между некоторыми минимальными и максимальными значениями. При возрастании нагрузки вначале начнут течь кристаллы с меньшими значениями предела текучести. Кристаллы с наибольшими значениями этого предела начнут течь последними. Первые «потекут» сильнее, чем вторые. Поэтому после снятия нагрузки кристаллы с бóльшими значениями предела текучести будут испытывать растяжение, а с меньшими значениями – сжатие. По аналогичному сценарию будут развиваться события при различиях в модулях упругости и степени упрочнения в двухфазных материалах. Таким же образом могут образовываться латентные напряжения в гетерогенных материалах с разными коэффициентами расширения кристаллических зерен [Tietz, 1980]. Заметим, что именно такими гетерогенными свойствами отличается и горная порода на уровне ее минерального строения.

В материалах с микро- и макроструктурными неоднородностями латентные напряжения могут возникать и в том случае, когда они подвергаются гидростатическому давлению, причем их величина может оказаться достаточной для того, чтобы в материалах появились трещины. Подобные эффекты наблюдались в природе [Rosenfeld, 1969; Nur, Simmons, 1970] и при лабораторных исследованиях [Редклифф, 1973; Morlier, 1972; Лившиц, Прищепов, 1977]. Увеличение давления приводит к созданию в поликристаллах, составленных из случайно ориентированных анизотропных зерен, неоднородного напряженного состояния: в направлениях с наибольшей сжимаемостью кристаллы испытывают эффективное растяжение, а в направлениях с меньшей сжимаемостью – сжатие (по сравнению с деформацией свободного кристалла при таком же окружающем давлении).

Механизмы образования латентных напряжений, которых мы здесь коснулись, в основном относятся к примерам из технологической практики. Это сделано потому, что более или менее детально механизмы эти изучались применительно к решению различных технологических проблем. Однако вполне очевидно, что образование латентных напряжений происходит на уровнях организации вещества, свойственных искусственным материалам и природной среде. Приведенные примеры могут служить в качестве физических стереотипов, в соответствии с которыми латентные напряжения образуются и в геологической среде.

2-5. ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННОГО ЛАТЕНТНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

2-5.1. Развитие взглядов на напряженное состояние земной коры

Примерно до 60-х гг. XX в. во взгляде на напряженное состояние земной коры существовало два мало взаимодействующих между собой направления. Одно из них формировалось в поле потребностей производства горных и инженерно-геологических работ, другое – в русле общих проблем геологии, в первую очередь в русле геотектоники, а затем и геодинамики. В рамках первого направления напряжения рассматривались как результат действия сил гравитации, в рамках второго – как результат дей-

ствия «тектонических сил», возбуждаемых процессами, протекающими в глубоких недрах Земли.

Кратко охарактеризуем основные вехи в развитии этих направлений.

Силы, возникающие в массиве горных пород при искусственном внедрении в массив, получили техническое название «горного давления». Действием этих сил и определяется устойчивость горных выработок. Под естественными напряжениями понимались напряжения, которые имели место в массиве до производства горных работ [Булин, 1971].

Длительное время существовало представление, что распределение напряжений в массиве горной породы близко к гидростатическому и обусловлено нагрузкой вышележащих толщ горных пород (гипотеза Гейма), причем величина гидростатического давления на заданной глубине h определяется выражением $P = \gamma h$, где γ – объемный вес горных пород.

При гидростатическом напряженном состоянии главные напряжения тензора гравитационных напряжений между собой равны. Таким образом, предполагалось, что поле естественных напряжений близко к равнокомпонентному.

В 1938 г. А.Н. Динник выдвинул гипотезу: напряженное состояние нетронутого массива определяется выражениями $\sigma_z = P$, $\sigma_x = \sigma_y = \lambda P$, где λ – коэффициент бокового распора, причем $\lambda = \mu/(1 - \mu)$, где μ – коэффициент Пуассона. Согласно этой гипотезе, среда рассматривалась как упругая сплошная однородная изотропная.

Впоследствии выдвигались и другие версии моделей среды, например среды упруго-вязкой, пластичной, или, как в механике грунтов, – среды сыпучей, но во всех случаях считалось, что горное давление – результат осложнения поля напряжений, создаваемого весом пород, техногенным внедрением в горный массив.

М.М. Протодьяконов разработал теорию свода, основанную на том, что при проходке выработки в ее кровле формируется свод естественного равновесия и на выработку действует лишь ограниченный объем дезинтегрированных пород, заключенных внутри свода. В результате развития этого положения была весьма детально изучена структура поля напряжений в окрестности горных выработок. При этом выяснилось, что эта структура имеет отчетливо выраженный зональный характер.

Указанные представления продержались до 70-х гг., когда стали известны и начали широко внедряться в практику методы прямых измерений напряжений в окрестности горных выработок, разработанные и примененные Т. Нильсом и Н. Хастом в

1967 г. в Скандинавии. Прямые измерения позволили установить, что напряжения во многих случаях существенно (иногда в десятки раз) превосходят те, которые бы мог обусловить вес пород. Было установлено, что поле измеренных напряжений часто имеет сложный, сильно дифференцированный характер, причем напряжения могут сильно варьировать по модулю и знаку на базах измерения порядка десятка метров, метров и даже в одной измерительной скважине.

В «доинструментальный» период изучения полей напряжений представления, развиваемые геологами и горняками, практически не перекрывались: горняки полагали, что напряженное состояние горных пород вблизи поверхности Земли полностью определяется их собственным весом, геологов же интересовали «тектонические» напряжения, возбуждаемые некими глубинными диастрофическими процессами.

Прямые измерения прежде всего с очевидностью указали на то, что в верхней части земной коры действуют не только гравитационные, но и какие-то другие значительные силы невыясненной природы, которые без выяснения причин их появления были отнесены горняками к категории «тектонических».

П.Н. Николаев [1978] предложил различать поля тектонических напряжений разных рангов: космические, глобальные, зональные, региональные, локальные, частные и, наконец, точечные. Он рассматривал особенности естественного поля напряжений как эффекты перераспределения глобального поля тектонических напряжений, возбуждаемых в глубоких недрах Земли, на структурных неоднородностях геологической среды – по аналогии с концентрацией и перераспределением напряжений на неоднородностях в напряженном теле. Среда и в этом случае рассматривалась как энергетически пассивная.

Параллельно доминирующей линии во взгляде на геологическую среду как энергетически пассивную уже с конца XIX в. обозначилась маргинальная ветвь, представители которой время от времени обращали внимание на возможность энергетической активности среды. Они допускали точку зрения, в соответствии с которой в качестве причины локальных полей напряжений рассматривались локальные процессы, протекающие непосредственно в тех же объемах геологической среды, в которых фиксируются и эти напряжения, и структуры, обусловленные их разрядкой.

Нет единой точки зрения на то, какова природа той «пружины», которая пускает в ход эволюцию Земли, в том числе и тектонические процессы. Но очевидно то, что некие «первичные»

процессы, преломляясь в многообразии геологической действительности, «запускают» множество «вторичных» процессов и именно с этими вторичными процессами и многообразием полей возбуждаемых ими напряжений чаще всего сталкиваются горняк, инженерный геолог и тектонист.

2-5.2. Многоуровневая структура поля латентных напряжений

В технических приложениях выработано представление о масштабной иерархии латентных напряжений. Суть его сводится к следующему.

Твердое тело как таковое существует вследствие структурных связей, соединяющих его элементы и части в одно целое, и масштаб элементарных полей латентных напряжений («сингулярностей») определяется масштабом тех структурных связей, упругие деформации которых и обусловили появление латентных напряжений. В зависимости от масштаба структурных связей, на которых уравновешиваются (замыкаются) элементарные поля латентных напряжений, в технике различают напряжения первого, второго и третьего рода. *Напряжения первого рода* замыкаются на уровне связей одного порядка с размерами деталей машин и конструкций. *Напряжения второго рода* соответствуют уровню связей между кристаллами. *Напряжения третьего рода* уравновешиваются на уровне дефектов кристаллических решеток. Вместе с тем эта классификация условна: четких демаркационных линий между напряжениями указанных трех родов нет [Витман, 1933].

Нет никаких ограничений к тому, чтобы принцип классификации латентных напряжений, учитывающий ранг структурных связей, на которых они возбуждаются, может быть применен и к геологической среде. Она организована по принципу структур разного масштаба, вложенных одна в другую, и представляет собой многоуровневую иерархическую систему. С другой стороны, то, что латентные напряжения могут возникать на любом уровне организации геологической среды, из общефизических представлений достаточно очевидно, тем более, что геологические тела как структурные композиции носят черты статически неопределимых систем. Тем не менее, нам неизвестны работы, в которых бы проблема существования латентных напряжений на надпородном уровне имела бы столь же четкую постановку, как в инженерном деле.

2-5.3. Принцип относительности

«Смысл внутренних («внутренними» в этой работе названы латентные напряжения. – *В.П.*) напряжений сохраняется лишь до тех пор, пока рассмотрению подвергается все тело в целом. Если же его мысленно рассечь какой-нибудь плоскостью, или выделить из него небольшой элемент, то внутренними можно назвать только напряжения, сохраняющиеся в отдельных частях тела; те же напряжения, которыми мы заменили внутренние, действовавшие ранее в плоскости сечения или по границам выделенного элемента, приобретут по отношению к остальным частям тела новый смысл внешних и составят как раз ту часть первоначальных внутренних напряжений, которая исчезает в отдельных элементах тела при нарушении между ними связи. Дальнейшее последовательное уменьшение выделяемых элементов должно постепенно сопровождаться постепенным уменьшением внутренних напряжений» Ф.Ф. Витман [1933. С. 32].

Приведенное рассуждение можно представить и так. Пусть Q – база измерения (масштаб рассмотрения, размер рассматриваемого элемента объема) и L – характерный размер пространственной области, в которой замыкается единичная система латентные напряжения масштабного ранга i. Тогда при $L > Q$ латентные напряжения будут восприниматься рассматриваемым объемом тела как силы, приложенные к нему извне.

Соотношение масштаба рассмотрения и размеров рассматриваемого объекта имеет принципиальное значение: в зависимости от этого соотношения наблюдаемый объект будет выглядеть поразному. Некоторые же свойства объекта можно увидеть только при определенном масштабном разрешении или в зависимости от уровня генерализации.

В частности, на выборе определенного соотношения между масштабом рассмотрения и минимальным размером элементарных объемов рассматриваемых тел основаны соображения о применимости континуальных моделей к описанию реальных сред. Если выбрать масштаб рассмотрения, при котором $Q \gg L$, то неоднородностью горной породы и наличием латентных напряжений, обусловленных этой неоднородностью (например, на уровне ее минерального строения), можно пренебречь, учитывая, например, ее пониженную прочность вследствие микроскопических латентных напряжений, как ее прочностную характеристику. Тем не менее, следует иметь в виду, что и в таком подходе содержится определенная некорректность: горная порода содержит неоднородности и разрывы сплошности практически на *лю-*

бом масштабном уровне. Как бы ни был велик размер напряженного тела, на соразмерном ему масштабном уровне существуют «свои» неоднородности и разрывы сплошности.

Каково же влияние масштаба рассмотрения на свойства объекта в общем виде? Пусть Q – база измерения (масштаб рассмотрения) и L_i – характерный размер пространственной области, в которой замыкается единичная система латентных напряжений масштабного ранга i.

При $Q \gg L_i$ совокупность множества элементарных полей латентных напряжений предстанет перед наблюдателем как своего рода фоновая напряженность и он воспримет эффекты их коллективного воздействия как особенные свойства среды, например как ее пониженная прочность или повышенная способность к хрупкому разрушению.

При $Q \ll L_i$ наблюдатель увидит настолько малый фрагмент целого, что вопрос о системе в целом потеряет для него практическое значение. В измеряемых напряжениях он увидит результат действия внешней силы. Именно так рассматривают обычно «тектоническую» составляющую естественного поля напряжений, тогда как, если говорить более строго, в рамках существующих на этот счет представлений она возбуждается на связях регионального или глобального уровня за счет процессов, протекающих в глубоких недрах Земли.

При $Q \approx L_i$, выполняя точечные измерения в разных частях единичной системы, наблюдатель столкнется с явлением сильного разброса измеренных значений не только по модулю и знаку, но и по ориентировке в пространстве, что часто имеет место в практике измерения напряжения в массивах пород в окрестности горных выработок [Напряженное..., 1978]. Наблюдатель имеет дело не с «тектоническими», а с местными напряжениями системы, замыкающейся в том объеме породы, в каком ведутся измерения.

Сказанное легко обобщить на тот случай, если значение L принять фиксированным, а Q – переменным.

Трещины разбивают массив на отдельности, вследствие чего нарушается связность массива, т.е. некоторая часть из полного набора его структурных связей оказывается разрушенной. Возможность рассматривать такой массив как сплошной полностью определяется соотношением между размерами отдельностей и размерами области, материал которой активно участвует в изучаемом механическом процессе [Руппенейт, Либерман, 1960]. Точно так латентные напряжения представляют собой множество дискретных единичных систем и в этом случае «сплошность»

поля напряжений определяется соотношением между размерами единичных полей и размерами области, механическое поведение которой рассматривается.

Из этих и такого рода соображений следует, что при определенном масштабном разрешении свойства реальных тел удовлетворяют гипотезе сплошности. Тем самым появляется возможность оценивать область применимости методов, в основание которых положена эта гипотеза.

Рассмотрим следующий вывод:

	$Q \gg L$	$Q \approx L$	$Q \ll L$
Гипотеза сплошности	+	–	+
Гипотеза отсутствия начальных напряжений	–	–	+

Здесь знак «плюс» обозначает соответствие, а знак «минус» – несоответствие указанных гипотез определенному соотношению между Q и L.

Из вывода, в частности, следует, что один и тот же объем материала на разных уровнях масштабного рассмотрения может различаться механическими свойствами, равно как и то, что на одних масштабных уровнях материал может быть равновесным, тогда как на других – неравновесным. Указанная относительность свойств среды имеет, в частности, большое значение для правильного понимания горно-геологических условий тех массивов пород, которые подвергаются тому или иному техногенному воздействию.

Возможность наблюдать систему нарушений сплошности заданного структурного уровня также зависит от масштаба рассмотрения.

При $Q \gg L$ элементарные фрагменты структурного рисунка становятся неразличимы. Площади, покрытые этим структурным рисунком, могут предстать перед наблюдателем лишь как некоторый общий фон, различимый скорей по вторичным проявлениям, таким, например, как повышенная эрозия или более интенсивное выветривание.

При $Q \ll L$ наблюдатель не видит целого. Представление о нем может быть составлено только по данным большого количества «точечных» измерений, образующих в своей совокупности достаточно плотное для этого поле.

Соотношение $Q \approx L$ единственно благоприятное для того, чтобы составить представление о системе в целом и ее наиболее существенных деталях. Структурный рисунок заданного масштабного уровня оказывается в этом смысле в «фокусе» оптического инструмента. Вместе с тем изменения масштаба ведут к

тому, что в «поле зрения» наблюдателя попадают четкие изображения иных систем, свойственных другим уровням иерархически организованной геологической среды. Приведенный вывод иллюстрирует и то, что именно структурные элементы (или поля латентных напряжений), для которых справедливо соотношение $Q \approx L$ и которые видны с наибольшей четкостью, составляют предмет значительных затруднений для их описания с помощью методов механики сплошной среды [Пономарев, 1987а, в].

2-5.4. Разнородность полей латентных напряжений

Процессы, возникающие в твердом теле при нарушении его термодинамически равновесного состояния, многообразны, взаимно обусловлены. Теоретически любой из них способен возбуждать латентные напряжения. Тем не менее, вклад каждого из этих процессов в суммарное поле латентных напряжений в общем случае различен и, когда речь идет о том или ином механизме возбуждения латентных напряжений, следует помнить, что имеется в виду ведущий механизм, вклад которого в суммарное поле латентных напряжений наиболее значителен. В геологической среде, в частности, особенно интенсивным образованием латентных напряжений сопровождаются процессы, возбуждаемые изменением таких параметров, как давление, температура и химический потенциал, т.е. тех же параметров, влияние которых наиболее значительно и при различных геохимических преобразованиях. Таким образом, глобальная тектоническая система может влиять на напряженное состояние земной коры не непосредственно, в форме прямого силового воздействия, а опосредствованно, изменяя термодинамическое состояние объемов земной коры. Кроме того, внешнее воздействие одной и той же природы может возбуждать латентные напряжения на разных уровнях структурной организации среды.

Для иллюстрации еще раз обратимся к примеру сварочных напряжений. При сварке возникают местные напряжения, локализованные непосредственно в сварном шве, и реактивные напряжения, действующие во всех звеньях сварной конструкции. Местные напряжения включают в себя «букет» латентных напряжений, обусловленных возникновением дислокаций, внедрением чужеродных атомов в кристаллические решетки материала, фазовыми изменениями в сварном шве, анизотропией упругих термоупругих свойств, тепловыми объемными эффектами. Кроме того, кроме «окончательных» латентных напряжений, кото-

рые имеют место уже в готовой и остывшей после сварки конструкции, в ней в процессе сварки возникают исчезающие впоследствии *переходные напряжения*.

Из приведенного примера ясно, что строение результирующего поля латентных напряжений должно быть очень сложным, а задача вычисления или измерения латентных напряжений – весьма непростой. Успехи приложений традиционной механики в области различных технических приложений объясняются не только достоинствами применяемого аппарата, но отчасти и тем, что расчетчики имеют дело с материалом существенно «окультуренным» технологами – уровень латентных напряжений в нем снижен до пренебрежимо низкого. Кроме того, еще и тем, что любое сколько-нибудь сложное изделие, прежде чем получить путевку в жизнь, подвергают целому комплексу доводок и испытаний, в которых устраняются и огрехи, обусловленные некорректностью применяемых методов расчета.

В случае же естественной геологической среды дело усложняется. Это – неокультуренный материал, который ведет себя неуправляемо, в соответствии со своей природой. В этом случае исследователь стоит перед объектом исследования очень сложным, причем попытки игнорировать эту сложность приводят к результатам, которые, несмотря на их количественную форму, могут не давать даже грубо качественного представления об истинном механическом поведении этого объекта. Учитывать сложность натуры следует уже хотя бы для того, чтобы найти рациональные пути обхода этой сложности, как это уже частично сделано в технике. Во всяком случае, это поможет уяснить, в чем именно состоит проблема.

Возвратимся к конкретике.

Особенностью латентных напряжений является их исключительная «цепкость», избавиться от них непросто. В технике латентные напряжения могут быть ослаблены или сняты всеми теми способами, которые приводят к ослаблению упругих деформаций с последующей диссипацией упругой энергии, накопленной материалом. Но это может сопровождаться пластической деформацией и возбуждением новых, вторичных по происхождению латентных напряжений. От деформационных напряжений можно избавиться, подвергнув изделие отжигу. Но тогда взамен деформационных в материале вследствие его перекристаллизации могут появиться трансформационные напряжения. Избавление от одного вида латентных напряжений может вести к появлению латентных напряжений другого вида по известной схеме «хвост вытащил – нос увяз, нос вытащил – хвост увяз».

Приведем выдержку из работы [Фандерлик, 1964. С. 210], дающую представление об этой особенности: «Напряжения, вызванные камнями в стекле, свилями, неправильным набором при получении накладных стекол, спаиванием с металлом и т.д., как правило, происходят от разницы в термическом расширении и не могут быть устранены никаким правильно проведенным отжигом». Вот некоторые факторы, влияющие на величину и направление напряжений при спаивании двух стекол, перечисленные в цитируемой работе: тепловое расширение обоих стекол; модули упругости; вязкость и ее зависимость от температуры; температура «точки затвердевания»; теплопроводность стекол; плотность; коэффициент Пуассона. Если значения хотя бы какой-то одной из этих характеристик в спаиваемых стеклах не совпадают, то в их двухслойной системе возникнут латентные напряжения.

Заметим: здесь речь идет о системе из двух разновидностей одного и того же материала, очень близких по своим свойствам. Принципиальным же свойством геологической среды является существенная неоднородность в вещественном, структурном, масштабном и других сечениях пространства ее определений. Нетрудно представить, насколько эта среда благоприятна для появления в ней латентных напряжений даже при не слишком значительном изменении действующего на нее давления, температуры, химически агрессивных флюидов и т.д. Уже из чисто физических представлений мы должны придти к мысли, что в случае геологической среды мы имеем дело с системой, весьма чутко отзывающейся на действие факторов, стремящихся изменить ее состояние, причем формой ее отклика на такого рода внешние воздействия должно быть появление латентных напряжений.

Еще одна особенность.

Предлагая различать первичные и вторичные сварочные напряжения, Ф. Кампю [Остаточные..., 1957. С. 12] ввел в рассмотрение *переходные сварочные напряжения* – типа первичных и вторичных, но появляющихся в процессе сварки и исчезающих после ее окончания. «Измерение их невозможно, и известно о них очень мало; однако нет никаких данных думать, что они не являются более важными, чем окончательные остаточные, и не исключено, что они порождают больше трещин, чем окончательные напряжения».

Другими словами, те или иные процессы, протекающие в объемах среды, могут возбуждать «временные» латентные напряжения, которые существуют в течение отрезка времени, не превышающего длительности процесса. Крайне интересны в этом отношении «мгновенные» латентные напряжения, которые

возникают вследствие резкого нарушения термодинамического равновесия в момент взрыва. На резкое ударное воздействие горные породы реагируют мгновенным появлением латентных напряжений, которые столь же резко на мгновение изменяют физико-механические свойства пород, делая их существенно более хрупкими и менее прочными. Возможно, что именно в этом кроется причина того, что в процессе взрыва горная порода разрушается по схеме фрагментации, общей для самопроизвольного разрушения хрупких тел, содержащих собственные источники энергии.

Латентные напряжения налагаются на другие напряжения точно так, как любые другие системы напряжений. Если их совместное действие не превышает предел упругости, то для них остается в силе принцип упругого наложения. С повышением же этого предела начинается пластическое течение в соответствии со свойствами данного материала и вне зависимости от того, какой род напряжений в нем действует. Но в условиях пластического течения латентные напряжения изменяются количественно, и происходит их перераспределение. Трудно учитываемое неблагоприятное влияние латентных напряжений часто обнаруживается при совместном действии с напряжениями, возбуждаемыми внешними причинами [Остаточные..., 1957].

2-5.5. Эффекты взаимодействия

Вопрос взаимодействия полей латентных напряжений разного масштабного уровня очень важен для понимания напряженного состояния геологической среды, но в литературе освещен бегло. Обычно указывается, что местные напряжения (второго и третьего рода) заключены в небольшом объеме без возможности их переноса, тогда как напряжения первого рода «глобальны» в масштабе конструкции или изделия и могут проявляться в любой части напряженной системы. Энергия, накапливаемая в системе в случае напряжений первого рода, может достигать больших значений, и если в теле имеются трещины и другие дефекты, то вся скопившаяся энергия действует в этих ослабленных пунктах. Подчеркивается также, что напряжения второго и третьего рода анизотропны, а ориентировка напряжений первого рода подчиняется геометрии конструкции [Остаточные...,1957].

Очевидно, что в таком рассуждении исследователи исходят из фиксированного масштаба рассмотрения. Сказанное в отношении напряжений первого рода столь же справедливо и в отноше-

нии напряжений второго и третьего рода, однако в масштабе рассмотрения, соизмеримом с объемами среды, в которых локализуются элементарные системы этих напряжений.

В прагматических целях, для решения определенных инженерных задач, жесткий выбор масштаба рассмотрения с разделением полей напряжений на микроструктурные и макроскопические вполне оправдан. Однако для того, чтобы понимать напряженное состояние геологической среды с огромной градацией масштабов ее структур, обойти стороной вопрос о наложении элементарных полей латентных напряжений разного ранга нельзя.

Суммарное поле латентных напряжений – результат наложения элементарных полей латентных напряжений разного ранга. Поскольку каждое из них представляет собой систему напряжений противоположного знака, а напряжения в каждой точке суммируются с учетом их знака и пространственной ориентировки, нетрудно вообразить, что результирующее поле напряжений должно иметь очень сложный дифференцированный характер и изменяться при переходе от одного измерительного репера к другому. При разрушении структурных связей определенного масштабного уровня, например вследствие техногенного воздействия, элементарные поля структурных напряжений этого уровня аннигилируют и изымут свой вклад в результирующее поле напряжений. В результате последует перераспределение напряжений, эффекты которого по отношению к точке зрения, выработанной в рамках представлений о напряжениях как результате действия внешних сил, могут оказаться совершенно неожиданными.

Поскольку система структурных связей организована по принципу структурного совмещения, одна и та же точка (под «точкой» имеется в виду элементарно малый объем среды) одновременно принадлежит сразу нескольким связям разного масштаба. Иначе говоря, любая точка рассматриваемого объема материала посредством структурных связей, близко- и дальнодействующих, сопряжена со всеми остальными точками этого объема. В той мере, в какой система сингулярностей соответствует системе структурных связей, сопряжены и разноранговые элементы поля латентных напряжений. Изменение напряженного или деформированного состояния в данной точке сказывается перераспределением деформаций или напряжений в остальных точках рассматриваемого тела.

Эта особенность напряженного состояния неравновесной среды проявляется в целом ряде особенностей, иногда на первый взгляд парадоксальных. Приведем примеры.

«При определенных условиях, связанных с изменением внешней среды, латентные напряжения могут самопроизвольно уменьшаться за счет пластической деформации (релаксировать). Этот процесс протекает в разных участках тела с различной интенсивностью в зависимости от величины напряжений; в связи с этим тело упруго деформируется из-за нарушения равновесия напряжений, изменяя первоначальные размеры и форму» [Соколов, Уральский, 1981. С. 35]. Подобным механизмом объясняют, например, самопроизвольное коробление листовой стали спустя длительное время после ее изготовления.

Если в объеме материала, содержащем латентные напряжения, вводятся свободные поверхности, образованные возникновением трещин, пропиливанием, сверлением и т.п., то тем самым повреждаются и структурные связи в той мере, в какой они пересекаются этой свободной поверхностью.

Одни связи, меньшие по размерам, при этом могут быть разрушены полностью, а связанные с ними сингулярности сняты, другие же связи, большие по размерам, могут быть повреждены лишь частично, что эквивалентно уменьшению их эффективного сечения, воспринимающего нагрузку. Разрушение или повреждение связей влечет за собой перераспределение напряжений. Деформации, вызванные ослаблением в одной части блока материала, могут быть переданы на другие области. В работе [Friedeman, 1972] отмечено, что с помощью датчиков напряжений, установленных в блоках, зарегистрированы различные комбинации ослабленных замыкающих и замкнутых деформаций, а также зарегистрированы и перераспределения деформации внутри блока. Полученные данные показывают, что точные пропорции этих составляющих являются функциями размера, расположения и модулей упругости областей, в которых сосредоточены замкнутые и замыкающие деформации, а также являются функциями относительных величин ослаблений этих двух составляющих деформации.

Заметим, что деформации, вызванные разрушением структурной связи, локализуются в объеме, содержащем обусловленную ими сингулярность, и если последняя имела микроскопические размеры, то микроскопической является и деформируемая область. Перемещения (или деформации), наблюдаемые при снятии латентных напряжений на макроскопических базах измерения, однозначно указывают на то, что они были обусловлены наличием макроскопических сингулярностей, т.е. на то, что материал содержит дальнодействующие связи.

По мере измельчения горной породы уровень латентных напряжений понижается. Об этом, в частности, говорят данные

рентгенографических исследований: ширина спектральных линий дебаевского спектра зависит от уровня напряжений – они тем шире, чем выше уровень напряжений. В работе [Reik, 1976] отмечено, что по мере измельчения горной породы ширина спектральных линий последовательно уменьшается. Эффект понижения уровня напряжений в процессе фрагментации отчасти может быть обусловлен тем, что образование трещин, отделяющих фрагмент от массива, освобождает фрагмент от действия дальнодействующих связей.

Извлекая образец породы из массива, мы разрушаем структурные связи, превышающие размеры образца. По этой причине в небольшом образце горной породы, извлеченном из массива, содержится лишь часть латентных напряжений, действию которых образец подвержен в массиве породы, а именно лишь та часть, которая соответствует сингулярностям, образующимся на связях с размерами, превосходящими размеры образца. Поэтому в горном деле и рассматриваются в качестве собственных только напряжения второго и третьего рода, поскольку их существование может быть установлено прямыми измерениями в образце, освобожденном от действия внешних нагрузок. Напряжения первого рода остаются «за кадром». Обычно их относят к «тектоническим» напряжениям, минуя весь спектр латентных напряжений, которые могут образовываться на связях надпородного уровня.

Отметим один практически важный аспект, вытекающий из представления о связности полей латентных напряжений. Внедрение горной выработки в массив породы может привести к значимому перераспределению напряжений и деформаций в областях, намного превышающих своими размерами те «зоны влияния» горных выработок, которые обычно определяют, рассматривая задачи перераспределения напряжений в окрестности неоднородностей, вводимых в сплошную равновесную среду. Учет дальнодействия структурных связей может иметь решающее значение не только для определения напряженного состояния рассматриваемой выработки, но и напряженного состояния всей системы свободных поверхностей.

Характерный пример такого дальнодействия – так называемые «тектонические горные удары». Они возникают не вблизи свободной поверхности, а в десятках и сотнях метров от неё, как это имело место, например, на Североуральском бокситовом руднике. С одной стороны, причинная связь горных ударов с ведением горных работ очевидна. С другой – эти удары возникают далеко вне «зон влияния» выработок, эффективный размер которых обычно полагают составляющим несколько метров.

Другой пример – парадоксальное явление, заключающееся в том, что напряжения в выработках относительно небольшого поперечного сечения значительно выше, чем в существенно больших выработках, хотя, казалось бы, эффективное сечение массива, несущее нагрузку, должно уменьшаться при возрастании площадей свободных поверхностей внутри массива, а поэтому должны были бы возрастать и напряжения.

В напряженном состоянии земной коры, даже если оно возбуждается локальными процессами, помимо местных напряжений, должна иметь место реактивная дальнодействующая составляющая. Поскольку же реактивные напряжения в пространстве системы перманентны, то такого рода напряжения, возбуждаемые разными источниками, могут налагаться. То, что обычно воспринимается как поле тектонических напряжений (в традиционном понимании), может оказаться полем реактивных напряжений, возбуждаемых местными процессами, но передающимся на большие расстояния.

Упомянем в связи с этим одно аномальное проявление горного давления: казалось бы, вопреки логике, при увеличении пролета подземных камер их устойчивость не уменьшается, а возрастает. Приведем некоторые факты, взятые из работы [Марков,1977]. На одном из рудников Ловозерского массива, на Кольском полуострове, в кровле выработок с сечением 2,5 × 2,5 м наблюдается активное стреляние и разрушение пород, свидетельствующее о близкритическом напряженном состоянии в окрестности выработки. Вместе с тем гораздо большие выработки (камеры длиной 200, шириной 70 и высотой в десятки метров) в том же массиве сохраняют длительную устойчивость. Из практики канадских рудников известно, что удавалось прекратить полностью или существенно сократить число случаев разрушения камер при увеличении пролетов с 15 до 30 м. При сооружении различного рода подземных складов установлено, что выработки сохраняют длительную устойчивость при весьма больших пролетах обнажений. Например, на морской подземной базе Misko в крупнейших подземных залах в Стронфорсене в Швеции камеры имеют размеры 124 в длину, 18,5 в ширину и 25 м в высоту. Является правилом, что горные удары, возникая в относительно небольших выработках, никогда не возникают в выработках с сечением порядка нескольких десятков метров. Природа таких эффектов требует пристального изучения. С точки зрения излагаемых здесь представлений, одной из вероятных причин таких явлений есть то, что введение больших свободных поверхностей уменьшает вклад дальнодействующих связей в общую сумму напряжений.

2-5.6. Измерение латентных напряжений

Определить величину напряжений, обусловленных упругими деформациями твердого тела, можно двояким образом: вычислить или измерить.

В случае действия внешней нагрузки на тела, близкие к равновесному состоянию, используются обычно вычисления, поскольку существующий аналитический аппарат позволяет решать эту задачу достаточно просто и эффективно. В этом случае проблема измерения напряжений отодвигается на второй план. Если же такая проблема возникает, то существуют и сравнительно простые средства ее решения.

Иначе дело обстоит с измерением величины латентных напряжений: теоретические расчеты позволяют получить оценки, которые, несмотря на количественную форму, имеют лишь качественный смысл первого приближения. По этой причине на первый план выдвигаются методы инструментального, опытного определения их величины. Этим же объяснимо и разнообразие используемых для этого принципиально разных методов. Рассмотрим некоторые методы измерения латентных напряжений или идеи, которые могут быть положены в разработку таких методов.

Впервые метод измерения латентных напряжений применил Н.В. Калакуцкий, который провел серию опытов по определению латентных напряжений в стальных стволах артиллерийских орудий и листовом металле. Смысл его метода был в том, что из изделия вырезалось кольцо и затем по изменению его диаметра выносилось суждение о «давлении», т.е. напряжении, действовавшем в металле. Его работы стали основой многих методических модификаций, заключавшихся в замере деформации образцов, возникших при разрушении. Обзоры методов измерения латентных напряжений в разрушаемых образцах можно найти в работах [Конторович, 1943; Соколов, Уральский, 1981; Биргер, 1963]. Среди разрушающих методов существует метод, когда в изделии прожигаются отверстия лазерным лучом и их отклонения от круговой формы измеряются с помощью лазерной интерферометрии.

Широкое распространение получил рентгеноструктурный метод измерения латентных напряжений, основанный на явлении дифракции рентгеновских лучей, выражающемся в размытии и ослаблении линий дебаевского спектра. С помощью этого метода были получены многие важные результаты. Достоинство метода – это метод неразрушающий. Однако его приме-

нение ограничено: он применим только для определения напряжений, которые возникают на уровне кристаллов и их дефектов. Кроме того, глубина проникновения рентгеновских лучей не превышает 0,02 мм от поверхности пробы. В отношении горных пород рентгеноструктурный метод применяется к измерению напряжений только в горных породах, богатых кварцем [Reik, 1976].

Известен также целый ряд других методов, имевших ограниченное распространение. Многие из них основаны на тех или иных способах снятия латентных напряжений, например выщелачиванием цемента у поверхности исследуемого образца [Friedeman, 1972], протравливанием поверхности образца в парах ртути, аммиака и других реактивов [Витман, 1933]. В таких случаях происходит растрескивание образцов и величину напряжений определяют по степени растрескивания. Таков же и металлохимический подход. Латентные напряжения увеличивают склонность металлов к растрескиванию от коррозии. Исследуемые образцы обезжиривают протравкой в кислоте и помещают в корродирующую среду. О величине латентных напряжений судят по величине промежутка времени от момента погружения до момента появления трещин [Конторович, Лившиц, 1943].

В изучении латентных напряжений в геологической среде сложилась парадоксальная ситуация. В технике изучаются главным образом латентные напряжения, возникающие на уровне макроскопических структурных связей, т.е. напряжения первого рода. Напряжения, возникающие на уровне микроструктуры вещества, изучены гораздо хуже [Биргер, 1963; Соколов, Уральский, 1981]. Исследования же латентных напряжений в геологической среде в подавляющем большинстве посвящены как раз тем напряжениям, которые возникают на уровне ее микроскопического строения. Они же являются предметом исследований с использованием рентгеноструктурного анализа.

Опыты по изучению акустической эмиссии разгруженных образцов [Пономарев и др., 1991] показывают, что существует принципиальная возможность судить об уровне естественной энергонасыщенности пород по измерению интенсивности эмиссии кернов, добытых бурением. Сами опыты и были нацелены на разработку соответствующего метода. Однако впоследствии по причинам, которые в наши дни понятны всем, разработку метода пришлось приостановить.

Растрескивание, диспергирование материалов и горных пород в процессе релаксации латентных напряжений изменяет мно-

гие их физико-механические характеристики: плотность, упругие модули, скорость прохождения упругих волн, магнитные свойства. Все эти эффекты, как и акустическая эмиссия, при должной разработке могут быть использованы для суждения о величине латентных напряжений. Попыткой реализации таких возможностей может служить работа [Попов, Чернышев, 1982], в которой предложено определять величину латентных напряжений, измеряя параметры релеевских волн.

РАЗРУШЕНИЕ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЫ

Использованные далее данные об особенностях разрушения энергонасыщенной среды в основном относятся к разрушению искусственных материалов, содержащих латентные напряжения. Тем не менее общность физического существа твердотельных систем независимо от того, имеют они искусственное происхождение или являются природными, позволяет с учетом частной специфики распространять особенности разрушения искусственных материалов и на объекты природные.

Множество проявлений разрушения под действием латентных напряжений наблюдается и в горных породах *in situ*, но в этом случае требуется еще доказать, что наблюдаемый случай разрушения действительно обязан латентным напряжениям. Основной способ доказать, что это так, именно и устанавливается по сходству картины разрушения горных пород *in situ* с картиной разрушения энергонасыщенных технических и модельных материалов.

Разрушение энергонасыщенных тел в его типичной выраженности характеризуется динамичным, взрывоподобным развитием, в процессе которого образуются трещины хрупкого отрыва, расчленяющие субстрат разрушаемого тела на множество фрагментов. Формула разрушения энергонасыщенных тел – динамичность, хрупкость и фрагментация.

3-1. ОБЩИЕ ПОДХОДЫ К ПРОБЛЕМЕ РАЗРУШЕНИЯ

Мы не ставили цель изложить представления механики разрушения в достаточно полном их объеме. Задержимся лишь на тех ее основных идеях и смыслах, которые, во-первых, дают общее представление, концептуальный фон, проясняющий необходимость направленных исследований разрушения именно энергонасыщенных сред, а, во-вторых, имеют хотя бы и косвенное отношение к этой проблеме.

3-1.1. Механика разрушения

Термин «механика разрушения» появился около 50 лет назад, причем достаточно эффективная теория разрушения в настоящее время отсутствует.

К механике разрушения относят исследования по распространению трещин, а также, в более широком смысле, исследования заключительной стадии процесса деформирования. Под разрушением также понимают распад твердого тела на несвязанные между собой отдельности (куски) [Родионов и др., 1986].

В механике разрушения различают два направления. Начало одному из них – *теории предельного равновесия* – положили Кулон, Сен-Венан и Мор, начало другого восходит к Гриффитсу, заложившему основы *теории хрупкого разрушения*, впоследствии развившейся в *механику хрупкого разрушения*. Последняя занимается изучением развития трещин в хрупких и квазихрупких телах. Под *хрупкими* понимают тела, материал которых сохраняет свойство линейной упругости вплоть до разрушения. Под квазихрупкими понимают тела, материал которых отступает от свойств линейной упругости в узкой локальной зоне у берегов трещины [Черепанов, 1974].

Настоящая работа ориентирована на уяснение закономерностей образования трещин в энергонасыщенных телах. В этом отношении, с одной стороны, проводимые в ней исследования можно отнести к механике хрупкого разрушения, но, с другой, – лишь к ее сравнительно мало развитому направлению, в котором исследуются трещины, возникающие в процессе релаксации в телах, располагающих собственным энергетическим ресурсом. Именно наличие этого ресурса может стать причиной хрупкого разрушения даже тех тел, которые в равновесном состоянии обычно ведут себя, как пластичные.

3-1.2. Механика сплошной среды

В качестве базиса для построения теории предельного равновесия обычно рассматривается описание пластической деформации, теоретическим стержнем которого, в свою очередь, является механика сплошной среды (МСС). Таким образом, представления о разрушении твердых тел, в частности о разрушении геологической среды, формировались главным образом в концептуальном поле МСС.

МСС рассматривает поведение твердых тел, представленных их интегральными характеристиками, под действием внешней на-

грузки. Такой подход принято считать феноменологическим. Однако это не вполне так. МСС рассматривает «феноменологию» не реального, а теоретически сконструированного материала. Вместе с тем сейчас уже стало очевидным, что классические подходы МСС применительно к описанию деформирования и разрушения структурированной энергонасыщенной геологической среды нельзя назвать корректными.

Один пример. Классическая теория при различных видах нагружения твердых тел – при растяжении, изгибе, кручении и т.д. – предписывает определенную и различную в разных случаях ориентировку возникающих при этом трещин. Именно на этом зиждется теоретическая часть структурной геологии, в которой различают, например, надвиги, сбросы или сдвиги. Однако на внешнее воздействие, осуществленное по любой из таких схем, хрупкое энергонасыщенное тело отреагирует совершенно одинаково: оно взорвется и рассыплется на части и частицы вплоть до пылевидной фракции.

Складывается парадоксальная ситуация: аппаратом, созданным для описания механического поведения сплошных сред, пытаются описывать нечто ему принципиально чужеродное – разрывные нарушения. Не исключено, что таким путем прийти к внутренне непротиворечивой механике разрушения невозможно в принципе. Во всяком случае, на этом пути механика разрушения ждет своего гения, который подобно Коши ввел бы в существующий теоретический аппарат положение, способное резко изменить в этой области всю теоретическую ситуацию. Мнение о некорректности использования моделей и методов МСС к описанию напряженно-деформированного состояния геологической среды в последнее время стали выражать многие специалисты. Типично в этом смысле высказывание Х. Бока, видного специалиста по механике скальных пород: «Совершенно очевидно, что некоторые материалы ведут себя преимущественно как дискретные среды (то есть среды, состоящие из набора отдельных частиц, взаимные перемещения которых по крайней мере столь же значительны, как их собственные деформации), и обычные методы механики сплошной среды, использующие упругость и пластичность, для них абсолютно неприемлемы».

3-1.3. Теория дислокаций

Процесс пластического течения на микроскопическом уровне рассматривается в рамках теории дислокаций – линейных дефектов строения кристаллических решеток. К настоящему времени это направление достигло больших успехов.

По существу теория дислокаций – теория физическая, ее объектом являются коллективные эффекты ансамблей локальных нарушений сплошности среды. Другими словами, ее исходный принцип противоположен исходному принципу МСС. Для того, чтобы состыковать эти два развитые научные направления, чужеродные по своим исходным установкам, были предприняты значительные усилия. Попытки согласовать теории пластичности с теорией дислокаций, однако, осуществлялись односторонне: с позиций приспособления теории дислокаций к требованиям МСС. Платформой для такого согласования явились два представления.

Во-первых, принято считать, что дислокации – специфические объекты микромира. На макроскопическом уровне существование дислокаций сказывается интегрально, в свойствах и механических характеристиках материала. Вопрос о «дислокационном» характере перемещения структурных единиц геологической среды на макроскопическом уровне из рассмотрения исключен в рамках теории дислокаций и в рамках МСС. Наоборот, существует тенденция рассматривать дискретные смещения в геологической среде в рамках континуальных приближений. Таково, например, представление о сейсмотектоническом течении масс горных пород, которое развивал Ю.В. Ризниченко.

Во-вторых, в рамках МСС предполагается, что и на микроскопическом уровне пластическая деформация осуществляется только трансляционным движением дефектов под действием внешних приложенных напряжений. Условие сохранения сплошности представляется как определенная самоорганизация только трансляционных мод смещения кристаллических решеток. Это же представление затем было транспонировано на масштабный уровень смещения крупных геоблоков, возбуждающих землетрясения. Согласно утвердившемуся в сейсмологии представлению со времен гипотезы упругого проскальзывания, предложенной Ридом в начале XX в., землетрясение рассматривают как результат смещения смежных геоблоков по уже существующим разрывам, причем это смещение осуществляется скачком.

3-1.4. Физическая мезомеханика

Трудности в согласовании теории пластичности с теорией дислокаций, с одной стороны, и наблюдаемое на опыте структурирование материала в процессе его деформирования, с другой, сравнительно недавно дали начало новому направлению в механике деформируемой среды – физической мезомеханике.

В основу физической мезомеханики положена концепция деформационного структурирования твердых тел, начинающегося на микроуровне и затем последовательно переходящего с уровня на уровень, завершаясь разрушением тела в целом. Деформируемый материал под нагрузкой предложено рассматривать как сложную иерархически организованную систему элементов разного масштаба, а процесс деформирования в целом – как структурную эволюцию этой системы. Другими словами, в мезомеханике декларируется отход от основополагающего принципа МСС – принципа континуальности. В мезомеханике традиционная схема была признана ошибочной [Панин, 1998]. Выяснилось, что, помимо трансляционного движения в деформируемом теле, существенную роль играют и локальные повороты его структурных элементов.

Примером использования представлений мезомеханики в науках о Земле могут служить работы С.В. Гольдина. Он развил представление, согласно которому концентрацию потенциальной энергии в очаге будущего землетрясения обеспечивает геометрия «упаковки» иерархически организованной системы блоков земной коры, причем энергоемкая конфигурация «упаковки» образуется в процессе самопроизвольной перестройки этой системы. Потеря устойчивости какого-либо из элементов системы, находящейся в ее энергонасыщенном состоянии, влечет за собой спонтанную перестройку всей системы, что сопровождается сбросом запасенной энергии – активным сейсмическим процессом [Гольдин, 2002].

3-1.5. Синергетика

В рамках синергетики рассматриваются общие подходы к изучению универсальных свойств явлений самоорганизации в динамических системах. Особое значение при этом придается изучению роли коллективных, кооперативных эффектов в процессах самоорганизации [Летников, 1992].

Примером синергетического подхода к проблемам механики разрушения могут служить представления, развиваемые ныне в мезомеханике.

«В рамках методологии синергетики деформируемое твердое тело рассматривается как открытая, сильно неравновесная в локальных зонах концентраторов напряжений система, в которой в ходе нагружения протекают неравновесные структурные превращения. Последние развиваются на различных масштабных уровнях и различаются по характеру, энергии, протяженности в объ-

еме, скорости протекания. Их самоорганизация в заданных граничных условиях нагружения обусловливает формирование диссипативных структур, эволюция которых определяет характер пластического течения и разрушения материала. В традиционной физике пластичности и прочности эти процессы описываются на языке теории дислокаций и дисклинаций с использованием классических моделей механики сплошной среды. Однако это приводит к методологически неправильной интерпретации сложной самоорганизующейся многоуровневой системы.

Анализ всех типов деформационных дефектов в кристалле показывает, что, в сущности, их надо рассматривать не просто как нарушение периодичности структуры исходного кристалла, а как элементы других структур» [Панин, 1998. С. 17].

Прежде всего подчеркнем, что представление о деформационном процессе, как о процессе структурной перестройки субстрата, отслеживающего изменение внешних условий, важно в особенности применительно к геологической среде. Земная кора в таком свете представляется ареной интенсивнейших структурных преобразований как пограничный, переходной слой, в котором происходит смена термодинамических условий, свойственных недрам Земли, условиями космического пространства. В близповерхностном слое происходит не «разрушение» его, а непрерывная перестройка, структурная аккомодация, приспособление эволюционирующего вещества Земли к стабильно сохраняющимся условиям Космоса.

Такой взгляд по духу родствен принципу автаркии земной коры, выдвинутому В.И. Вернадским: «Все процессы начинаются в земной коре и в ней кончаются». Взгляд на литосферу и ее верхнюю часть – земную кору – как на арену спонтанно развивающихся процессов структурной перестройки геологической среды дает возможность принципиально новых подходов к решению практических задач.

Приведем пример. Структурная перестройка, протекающая в геологической среде, с физической точки зрения является процессом релаксационным. Между тем изученность явления релаксации в больших массах геологической среды, отражением которого в указанном смысле является сейсмический процесс, в особенности изученность физики этого процесса, пока остается на зачаточном уровне. Изучение структурной перестройки геологических систем в поле больших градиентов термодинамических параметров представляется ключом к пониманию механического поведения больших масс геологической среды, в том числе и проявлений наведенной сейсмичности.

Далее. Появление новых основополагающих представлений влечет за собой переорганизацию ранее сложившейся системы знаний. При этом на первых порах нередко одни и те же понятия употребляются к принципиально различным ситуациям или в одни и те же понятия разными исследователями вкладывается различный смысл, включая и весьма обычные случаи, когда форма используется без какого либо ее внятно очерченного смыслового наполнения. Чтобы в дальнейшем избежать такого разночтения, мы здесь коснемся трактовки понятия о диссипативных структурах, являющегося одним из основных представлений неравновесной термодинамики [Пригожин, 1985].

В процессе становления неравновесной термодинамики одной из ее эмпирических основ было изучение неравновесных стационарных систем, возникающих в условиях динамического равновесия между поступлением энергии в систему и ее последующим высвобождением (когерентное электромагнитное излучение, конвективные ячейки, реакция Жаботинского – Белоусова и др.). В качестве диссипативных структур в этом случае рассматривались динамически устойчивые структуры, образующиеся в результате энергетического баланса между поступлением энергии в систему и ее высвобождением. Важной чертой такого рода диссипативных структур является то, что они непрерывно восстанавливаются, воспроизводятся и, следовательно, не испытывают необратимых изменений во времени. Другими словами, это динамические стационарные системы, лишенные направленного развития, эволюции. Форма элементов диссипативных структур этого типа и их общий рисунок могут испытывать флуктуации, однако их усредненные статистические характеристики во времени существенно не изменяются.

В механике в качестве неравновесной стационарной системы такого рода с известными ограничениями может рассматриваться материал в состоянии крипа. В науках о Земле смысловыми аналогами крипа на мегаскопическом уровне выступают, например, представление о тектоническом и сейсмотектоническом течении масс горных пород или гипотеза стационарности сейсмического режима, по Г.А. Гамбурцеву. Представление о диссипативных структурах в этом же общем смысле применяли к горным породам В.И. Родионов с сотрудниками [1986].

Однако если мы обратимся к синергетическим представлениям, развиваемым в рамках мезомеханики, то увидим, что здесь под диссипативными структурами понимают те необратимые структурные преобразования, которые возникают в процессе движения неравновесных твердотельных систем к их равнове-

сию. Хотя трещины и иные дефекты структуры, которые проявляются в процессе движения неравновесных твердотельных систем к их равновесию, образуются в результате диссипации энергии, сообщаемой им внешним нагружением, роль каждого из этих структурных новообразований в рассеивании энергии одноактна. По существу это естественные преобразующие устройства разового действия. В данном случае мы имеем дело с нестационарной релаксирующей системой. Системы такого рода могут переходить через несколько квазистационарных, «мгновенных» состояний, но их структура в конечном счете необратимо изменяется: в процессе диссипации энергии система испытывает направленную структурную эволюцию. В отличие от диссипативных структур стационарных систем, структуры разрушения, образующиеся в геологической среде вследствие их энергетической разгрузки, мы в дальнейшем будем называть *структурами самопроизвольного разрушения*.

Структурная эволюция – один из главнейших характеристических признаков нестационарных релаксирующих систем. Включая структуры самопроизвольного разрушения в понятийное множество диссипативных структур, следует иметь в виду, что в этом случае поток энергии сквозь систему сопровождается необратимым изменением структуры самой системы, в чем и состоит принципиальное отличие таких эволюционирующих систем от систем стационарных, динамически устойчивых. Кроме того, при этом следует иметь в виду, что в геологической реальности стадии накопления и высвобождения упругой энергии могут быть разделены во времени, притом нередко громадными, геологически длительными промежутками времени.

Таким образом, используя общий термин «диссипативные структуры», в каждом частном случае требуется ясно представлять, с системой какого типа имеет дело исследователь, потому что поведение систем разного типа может оказаться во многом, даже в основных чертах, совершенно различным.

Насколько это важно?

Приведем один пример. Согласно существующим в сейсмологии представлениям, природную сейсмичность рассматривают как стационарную. Существует тенденция полагать стационарной и наведенную сейсмичность. Однако можно привести достаточно веские доводы в пользу того, что мы в обоих случаях имеем дело не со стационарными, а с эволюционирующими системами (см. главу 6). Если это так, то, например, в корне меняются принципы подхода к планированию систем мониторинга сейсмичности и пониманию физической сущности тех процессов раз-

рушения геологической среды, одним из внешних проявлений которых является возникновение землетрясений.

Опыт геологии с очевидностью указывает на то, что структуры геологической среды непрерывно эволюционируют. Реальные геологические системы могут рассматриваться как стационарные лишь на коротких промежутках времени, «бесконечно малых» по отношению к общей продолжительности их эволюционного развития, подобно тому как в равновесной термодинамике неравновесные процессы представляют в виде последовательности множества их квазиравновесных «отрезков».

3-1.6. Теория Гриффитса

По [Тимошенко, Гудьер, 1979], полная энергия системы складывается из действия поверхностных и объемных сил, а также из потенциальной энергии упругих деформаций, обусловленных действием на систему этих сил. В отношении поверхностных и объемных сил в теории упругости существует два постулата. Согласно одному из них, точки приложения этих сил двигаются вместе с элементами материала, на которые они действуют в равновесной конфигурации, согласно второму – эти силы в этом процессе не меняют ни величины, ни знака.

Общая идея подхода Гриффитса состоит в отходе от канона механики сплошной среды: он допустил, что при образовании трещины упругая энергия может переходить в поверхностную. В результате Гриффитс был уволен с работы. Впоследствии он работал в качестве конструктора в авиационной промышленности, а его разработки были подвергнуты научному остракизму. Подход Гриффитса был возрожден в годы Второй мировой войны, притом не механиками, а химиками, в поисках причин низкой прочности материалов, которые по силе их химических связей должны были бы быть исключительно прочными.

Для вычислительных целей Гриффитс принял трещину в форме очень узкого эллиптического отверстия, большая ось которого длиной l нормальна к направлению растягивающего усилия S. При появлении такой трещины начальная энергия деформации, вызванной растягивающим усилием, уменьшается, поскольку эта энергия расходуется на увеличение поверхностной энергии берегов трещины. В пластинке единичной толщины это уменьшение составляет $V = \pi l^2 S^2/4E$, где E – модуль Юнга.

Поскольку рост длины трещины требует увеличения поверхностной энергии, которая может быть получена за счет уменьшения энергии деформации, то удлинение может произойти и без

увеличения полной энергии. Условие самопроизвольности распространения трещины состоит в равенстве этих двух значений энергии $(dV/dl)dl = (\pi l S_{кр}^2/2E)dl = 2dlT$, где T – поверхностная энергия. Из этого следует, что если растягивающее усилие превышает некоторое критическое значение $S_{кр}$, то рост трещины становится самопроизвольным, самоподдерживающимся.

3-1.7. Вариационный подход

Рассмотрим некоторые общие моменты, касающиеся траекторий единичных трещин хрупкого отрыва и заполнения энергонасыщенного субстрата системами трещин. Будем рассматривать движение вершины трещины как движение частицы в поле с потенциальной энергией U, а сами трещины как траектории движения этой частицы.

Известно, что механическая траектория движущейся точки в потенциальном пространстве нормальна изоэнергетическим поверхностям этого пространства. Механические траектории ведут себя подобно лучам света в оптике, которые везде нормальны к волновым поверхностям (фронту волны). Поверхности равного времени в оптике соответствуют поверхностям равного действия в механике, а принцип наименьшего времени Ферма – принципу наименьшего действия, или принципу Якоби. Это явление получило название оптико-механической аналогии Гамильтона [Ланцош, 1965].

Аналогия между оптическими лучами и механическими траекториями превратилась в одну из ведущих идей квантово-механических представлений. В известной мере, как показано ниже, эта идея может быть использована и при анализе геометрических свойств систем или семейств трещин хрупкого отрыва в энергонасыщенных средах.

Вопрос о траекториях трещин хрупкого отрыва в духе идей аналитической механики рассмотрен в работе [Морозов, Фридман, 1961].

Согласно представлениям, развиваемым в этой работе, трещины хрупкого отрыва развиваются на поверхности тела по геодезическим линиям. Последние же представляют собой наименьшие расстояния между двумя точками, выбранными на поверхности тела. С геодезической линией совпадает натянутая нить, соединяющая две точки. Такая нить находится в состоянии устойчивого равновесия, т.е. не имеет тенденции сдвинуться по поверхности в сторону, ее потенциальная энергия минимальна. В соот-

ветствии с принципом Герца, при отсутствии внешних сил траектория движущейся по поверхности точки описывается геодезической линией. Поскольку разрушение материала может осуществиться легче по геодезической линии – для этого требуется наименьшая работа, то по геодезическим линиям развиваются и трещины. Однако поскольку движение вершины трещины осуществляется как движение частицы в потенциальном поле, траектория зависит не только от геометрии поверхности, но и от напряженного состояния тела. Для учета последнего обстоятельства принимается, что элемент длины трещины определяется произведением линейного элемента поверхности на некоторую функцию f, зависящую от напряженного состояния в окрестности данного линейного элемента поверхности тела.

3-2. ВЛИЯНИЕ ЛАТЕНТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В традиционных построениях механики деформируемых сред латентные напряжения игнорируются как фактор второстепенный, влиянием которого на физико-механические свойства твердых тел и их механическое поведение вполне допустимо пренебречь. Между тем высокий уровень латентных напряжений в твердотельной системе может кардинально изменить ее свойства и поведение.

Именно латентные напряжения, возникающие на микроскопическом и субмикроскопическом уровнях твердых тел, являются главной причиной того, что реальная прочность их относительно прочности теоретической снижена примерно на пять порядков. Микротрещины, возникающие под их действием, уменьшают плотность материалов, существенно изменяют их магнитные, упругие и иные физико-механические свойства. Латентные напряжения играют ведущую роль в явлениях упругого последействия, упругого гистерезиса, при упрочнении. Наличие латентных напряжений сказывается в «охрупчивании» материалов: в повышении их хрупкости и склонности к хрупкому разрушению, множественному растрескиванию.

Высокий уровень латентных напряжений может привести к весьма динамичному, лавинообразному развитию процесса разрушения – от сравнительно медленно развивающегося прогрессирующего разрушения до взрывоподобного. Процесс разрушения энергонасыщенных систем может сопровождаться интенсивной сейсмоакустической эмиссией.

Наличие латентных напряжений может усилить или, наоборот, ослабить развитие «классических» видов разрушения под действием внешней нагрузки.

Разрушение в энергонасыщенных системах может начаться при самых незначительных внешних инициирующих воздействиях вплоть до того, что оно может произойти самопроизвольно, при отсутствии сколь-нибудь заметных внешних воздействий. Другими словами, энергонасыщенные системы обладают свойством повышенной тензочувствительности и резко нелинейным соотношением между сигналом и откликом системы на этот сигнал.

В процессе разрушения энергонасыщенной среды в ней образуются весьма специфические структуры разрушения – плоские и объемные сети трещин, сообщающие среде характер блоковой делимости, причем размеры образующихся отдельностей в зависимости от конкретных ситуаций могут колебаться от частиц пылевидной фракции до крупных блоков земной коры. Наконец, наличие латентных напряжений резко активизирует процессы коррозии и протекание различных геохимических реакций, сопровождаясь явлениями типа эффекта Ребиндера и т.п.

Далее будут выборочно рассмотрены некоторые аспекты разрушения энергонасыщенных сред. Эти аспекты могут иметь значение для понимания механизма тех видов разрушения, которые возникают в геологической среде естественным путем и вследствие различных техногенных воздействий.

3-2.1. Повышение хрупкости

Материал, нарушенный кластерами дислокаций и связанных с ними латентных напряжений, оказывается «растянут», но не извне действием внешнего растяжения, а изнутри процессами дислокационного разуплотнения материала, причины которого могут быть самыми разнообразными – от деформаций тела внешними воздействиями до тех или иных процессов, протекающих непосредственно в этом же теле. При деформировании прутка отожженной стали, например, число дислокаций в нем возрастает примерно на пять порядков.

Установлено, что характер напряженного состояния в координатах «растяжение–сжатие» влияет на характер разрушения: при растяжении один и тот же материал ведет себя более хрупко, а при сжатии – более пластично (объединенная теория прочности Давиденкова–Фридмана) [Беляев, 1951]. Своеобразное «внутреннее» растяжение, которое сообщается материалу наличием кластеров дислокаций и обусловленных ими латентных напряжений, «охрупчивает» материал, делает его склонным к хрупкому разрушению.

Таковы «водородная хрупкость», обусловленная образованием сингулярностей за счет внедрения атомов водорода в кристаллическую решетку стали; «хладноломкость» стали, связанная с появлением латентных напряжений при сильном охлаждении; растрескивание полированных стальных поверхностей; повышенная хрупкость перекаленных или цементируемых изделий из стали; коррозионное растрескивание черных и цветных металлов и др. [Остаточные..., 1957; Tietz, 1980; Витман, 1933]. Эти примеры показывают, что наличие латентных напряжений способствует хрупкому разрушению даже таких пластичных материалов, как металлы. Что касается материалов, хрупких по своей природе, таких, как стекло, керамика или горные породы, то наличие латентных напряжений делает их еще более хрупкими.

Причина этого явления видится в следующем.

Как уже отмечалось, элементарные поля латентных напряжений представляют собой системы самоуравновешенных напряжений противоположного знака. Прочность материалов на растяжение существенно меньше, чем на сжатие. Отношение этих величин для большинства горных пород, например, составляет 1:5–1:15 [Reik, 1976], поэтому по мере симметричного роста сжимающих и растягивающих напряжений в данной сингулярности разрушение отрывом начинается прежде других видов разрушения. Разрушение с образованием трещин хрупкого отрыва может возникнуть с течением времени и за счет релаксационных процессов, протекающих в материале. Экспериментальное подтверждение тому, что растягивающая компонента может вызвать хрупкое разрушение, если действует в нем достаточно долго, можно найти в опытах С.С. Шуракова, С.Н. Журкова, Б.Н. Назруллаева, Я.М. Потака.

Хрупкое разрушение может быть свойственно не только материалам, содержащим латентные напряжения, но и материалам, которые испытали на себе их действие в прошлом. В этом случае макроскопический объем материала обладает системой микротрещин, образовавшихся в свое время под действием микроструктурных напряжений, что может выразиться, например, не только в уменьшении прочности, но и в анизотропии прочности и упругих свойств. Если затем к такому объему материала приложить внешнюю систему сил, то материал станет деформироваться и разрушаться не как сплошная изотропная среда, а как структурированная среда с заложенными в ней кинематическими связями, продолжая тенденцию, соответствующую той информации, которая заложена в структуре материала.

Так, известны опыты, когда на поверхность стекла наносились царапины с помощью абразивного порошка и затем изучалось влияние ориентированных систем царапин на прочность образцов стекла. Прочность образцов с царапинами, нормальными к направлению растяжения, была вдвое меньше прочности образцов с царапинами, параллельными направлению растягивающих напряжений [Пух, 1973].

Эти опыты говорят о том, что если система трещин хрупкого отрыва в материале хаотична, то внешние силы способствуют в первую очередь раскрытию и развитию тех из них, которые ориентированы по нормали к направлению растяжения. Материалу с унаследованной трещинной структурой «легче» разрушаться путем образования макроскопических трещин хрупкого отрыва.

3-2.2. Понижение прочности

Сильно перенапряженные среды, находящиеся в метастабильном состоянии, характеризуются напряжениями, которые определяются порядком прочности данного материала. Так, для горных пород верхняя граница латентных напряжений в песчаниках до 300–400 бар [Reik, 1976], а предельная плотность упругой энергии порядка 10^4 эрг/см^2 [Friedeman, 1972].

Влияния латентных напряжений на прочность мы уже касались, когда речь шла о механизме возникновения дисперсных напряжений. В общих чертах причина столь существенного понижения прочности реальных твердых тел относительно их теоретической прочности состоит в образовании кластеров дислокаций и росте возбуждаемых этим дисперсных напряжений, уровень которых может дорастать до значений, достаточных для разъединения (отрыва) атомных плоскостей кристаллических решеток.

Как известно, первая попытка объяснить расхождение между теоретической прочностью и прочностью, наблюдаемой на опыте, была предпринята Гриффитсом. Он предположил, что низкая прочность стекла обусловлена наличием в нем микротрещин, которые играют роль концентраторов напряжений. Однако причину появления микротрещин Гриффитс не рассматривал. Между тем, зарождение микротрещин возможно только в том случае, если по какой-то причине в материале возникнут напряжения, достигающие теоретической прочности. Постулируя трещины как уже существующие Гриффитс, таким образом, лишь перенес вопрос о происхождении пониженной прочности на более глубинные уровни структуры вещества.

Начало развитию представлений о том, что причиной возникновения зародышевых микротрещин являются латентные напряжения, положено работами А.В. Степанова, который впервые обратил внимание на то, что в разрушении кристаллов важную роль играют напряжения, возникающие вследствие деформаций кристаллических решеток в процессе пластической деформации. Тогда же эти представления были подтверждены и развиты Давиденковым и Классен-Неклюдовой. Позже появились работы, в которых рассматривались атомные механизмы зарождения трещин на основе теории дислокации, которые по существу представляют собой конкретизацию общей идеи А.В. Степанова. В таких схемах обязательным условием зарождения трещин является блокировка скольжения, т.е. невозможность релаксации значительных локальных напряжений за счет пластических деформаций [Смирнов, Ярошевич, 1965].

Одна из модификаций такого представления о механизме понижения прочности полухрупких тел изложена в работе [Леонов и др., 1963].

Движение дислокаций вызывает в кристаллическом теле смещение одной атомной плоскости относительно другой, макроскопическим эффектом чего является собственно пластическая деформация. Подвижность дислокаций весьма велика в том смысле, что сопротивление бездефектной кристаллической решетки их движению мало. Однако в реальных твердых телах на пути перемещения дислокаций имеются препятствия в виде границ блоков и зерен, включений инородных атомов и т.д. При действии касательных напряжений около препятствий накапливаются дислокации. Их концентрация ведет к появлению локальных напряжений растяжения, под действием которых атомные плоскости удаляются друг от друга.

Ниже мы остановимся на проблеме соотношения отрыва и сдвига при разрушении твердых тел более подробно. Пока же возьмем на заметку, что в указанных построениях их авторы исходят из того, что на микроскопическом уровне зародышевые трещины образуются как трещины отрыва, под действием нормальных напряжений. Роль касательных (сдвиговых) напряжений сводится к насыщению материала кластерами дислокаций.

Представление о значительных латентных напряжениях, возникающих в процессе пластической деформации, положено в основу ряда моделей пластичности. К их числу, например, относится теория пластичности Ю.А. Кадашевича и В.В. Новожилова [Кадашевич, Новожилов,1981].

Сейчас установлено, что дефектные конфигурации кристаллических решеток и их латентные напряжения играют фундаментальную роль при пластической деформации, образовании трещин хрупкого отрыва, росте усталостных трещин и эффекте Баушингера [Макклинток, Аргон, 1970]. Еще в 30-е гг. XX в. появилась точка зрения, что прочность определяется локализованными перенапряжениями на неоднородностях, причем образование разрыва может происходить как сразу, так и с задержкой времени, когда процессу разрушения может предшествовать то или иное течение материала [Александров, Журков, 1933].

В целом в настоящее время наиболее распространено представление, что эффект понижения прочности реальных материалов вызван существованием зародышевых трещин, появление которых обусловлено латентными напряженями, возникающими на микроскопическом и субмикроскопическом уровнях.

Это же представление распространено на объяснение причины пониженной прочности горных пород [Павлова, 1970].

Вместе с тем следует заметить, что рассмотренные представления развиты применительно к ситуациям, когда возбуждаются деформационные латентные напряжения. Однако причины возбуждения латентных напряжений, как это уже рассматривалось, могут иметь самую различную, в том числе и немеханическую природу. Возникновение латентных напряжений неизбежно уже в самом процессе образования данной структурной модификации вещества независимо от того, происходит оно естественным или искусственным путем. Об этом, в частности, свидетельствует то, что реальный материал обычно обладает пониженной прочностью уже до того, как он подвергнется действию внешних деформирующих усилий.

Элементарные поля латентных напряжений можно рассматривать как сингулярности – «точки», вкрапления малых областей с особыми свойствами в матрицу материала с регулярными свойствами. Теоретическими моделями сингулярностей являются, например, так называемые дислокации Вольтерра.

Для того, чтобы представить дислокацию Вольтерра, следует провести ряд мысленных операций: сделать в заданном объеме упругого континуума короткий надрез, затем сместить берега надреза и вновь склеить их, восстановив сплошность. Дислокация Вольтерра представляет собой точечный источник упругой энергии, вкрапленный в матрицу, причем воздействие этого источника на вмещающую среду почти полностью локализуется в близкой окрестности склеенного надреза и быстро убывает по мере

удаления от него по закону, свойственному убыванию местных напряжений по мере удаления их от концентратора. В качестве натурных аналогов дислокаций Вольтерра можно рассматривать случай с двухзерновой минеральной ячейкой, подверженной разгрузке. Вследствие несовместных деформаций минеральных зерен с разными упругими модулями при уменьшении нагрузки на их контакте возникает сингулярность – элементарное поле латентных напряжений, представляющее собой единичную систему уравновешенных между собой напряжений противоположного знака.

Во всех случаях, когда речь будет идти об общих особенностях поведения сред, содержащих сингулярности, и когда конкретная форма сингулярностей не имеет принципиального значения, мы будем иметь в виду простейший случай сингулярностей с радиальной симметрией, или попросту «точечных».

Так, остывание стали сопровождается мартенситным фазовым превращением. Образующиеся частицы мартенсита возрастают в объеме. Этому, однако, препятствует вмещающее пространство вещества реликтовой фазы, вследствие чего при взгляде с макроскопического уровня в материале возникают «точечные» дисперсные поля латентных напряжений. Хотя в действительности кристаллы мартенсита имеют игольчатую форму, для рассмотрения общих закономерностей поведения тел, насыщенных такого рода сингулярностями, их формой можно пренебречь.

Рассмотрим объем среды, содержащий множество неперекрывающихся сингулярностей с достаточно большими межсингулярными расстояниями (не менее их радиуса). Неперекрываемость понимается в том смысле, что на расстояниях, существенно превышающих размер структурной (или физической) особенности среды, обусловившей появление сингулярности, величина напряжений становится пренебрежимо малой.

Для аннигиляции дислокации Вольтерра достаточно, чтобы склейка берегов разрыва была нарушена, т.е. чтобы в теле сингулярности возник разрыв сплошности. Очевидно, что постольку в межсингулярном пространстве напряжения отсутствуют (или пренебрежимо малы), трещина, развившаяся в теле сингулярности, за ее пределы выйти не может. Если тело содержало множество сингулярностей, затем аннигилировавших, то оно окажется насыщено множеством трещин. Если сингулярности соответствовали субмикроскопическим или микроскопическим размерам, то тело окажется насыщено множеством субмикроскопических и микроскопических трещин, в целом сохраняя свое единство, по-

скольку связи в межсингулярном пространстве окажутся ненарушенными. Трещины, ранг которых соответствует рангу аннигилировавших сингулярностей, будем называть *элементарными трещинами*.

Влияние микро- и субмикроскопических трещин на макроскопические свойства материала состоит, прежде всего, в снижении их прочности. Вместе с тем тело, как макроскопическое целое, сохраняет свое единство.

3-2.3. Динамический характер разрушения энергонасыщенных тел

Как уже это отмечалось, характер и темп развития разрушения, помимо других факторов, определяется запасом упругой энергии, которым она располагает к моменту начала разрушения. Если эта энергия сравнительно невелика, разрушение протекает медленно, спокойно, постепенно. При недостаточном подводе энергии разрушение может остановиться. При избытке подводимой энергии процесс разрушения может приобрести характер лавины или взрыва [Фридман,1960]. Из этого очевидно, что возможность динамического разрушения зависит от условий, которые определяют возможность накопления энергии. В самом общем виде эти условия сводятся к альтернативе: либо необходимая энергия сообщается телу внешним нагружением, либо она накапливается в теле в форме энергии фиксированных упругих деформаций.

Главным условием перехода тела в энергонасыщенное состояние под действием внешней нагрузки является его высокая прочность. Недостаточно прочные тела по мере роста нагрузки разрушаются до того, как плотность упругой энергии в них достигнет порогового значения. Поскольку же прочность реальных материалов сильно понижена относительно их теоретической прочности, то и случаи их динамического разрушения осуществляются при стечении относительно редких обстоятельств.

Так, взрывообразно может разрушиться образец горной породы, сжимаемый под прессом. Во избежание несчастных случаев техникой безопасности работ, выполняемых на прессе, предусмотрена установка специального защитного кожуха.

Известны случаи, когда внешняя нагрузка была причиной динамичного разрушения горных пород в натурных условиях. Таковы, например, случаи возникновения горных ударов в целиках, оставляемых в подземных выработанных пространствах в каче-

стве опор, принимающих на себя вес пород над выработанным пространством.

Дефицит прочности реальных материалов усугубляет и то, что внешнее нагружение осуществляется обычно по схеме последовательного энергоснабжения. Прочность же цепи, сколь бы ни были прочны ее отдельные звенья, определяется прочностью ее слабейшего звена. Поэтому плотность энергии в теле, подверженном действию внешних сил, лимитируется предельной энергоемкостью его самого ослабленного сечения.

Иначе обстоит дело в системах с независимым энергоснабжением. Энергонасыщенность среды за счет фиксированных упругих деформаций создает идеальные условия для динамического роста трещин.

Во-первых, начало роста трещины в системе с независимым энергоснабжением не снижает уровень напряжений во всей системе, как это имеет место в системах с последовательным энергоснабжением. За исключением узкой зоны у берегов прорастающей трещины уровень энергонасыщенности в остальном субстрате системы остается столь же высоким. Это, в частности, способствует процессу ветвления динамично развивающейся трещины, что, в свою очередь, влечет за собой гораздо более существенный динамичный сброс энергии, чем при простом линейном развитии единичной трещины. Кроме того, в этом случае возможно появление разрушения в других точках субстрата в форме своего рода отклика на воздействие упругих волн, излучаемых очагом первичного разрушения.

Во-вторых, наличие латентных напряжений делает материал более хрупким, что предрасполагает его к более динамичному разрушению.

В-третьих, и это особенно важно, при росте трещины в среде за счет действия внешней силы требуется определенное время для восполнения потерь энергии в вершине растущей трещины, что замедляет ее рост. В случае же среды, содержащей запасы латентной энергии, движущаяся точка роста трещины вскрывает запасы энергии, «складированные» по пути ее распространения, что способствует быстрому «разгону» растущей трещины до скоростей, близких к предельно возможным.

В-четвертых, прочность реальных тел в разных их точках или сечениях неодинакова. При внешнем нагружении верхний предел энергии, которую может накопить тело, определяется прочностью тех локальных участков тела, где она минимальна. Превышение этого минимального уровня влечет разрушение системы. В системах же с независимым энергоснабжением локаль-

ные ослабления прочности особой роли не играют. Верхний предел накопленной латентной энергии в локальных участках системы может достигать уровня, соответствующего прочности самых прочных включений, содержащихся в системе.

В целом же уровень энергии, накопленный за счет процессов, протекающих в системе, в силу этих причин будет существенно выше при прочих равных условиях, чем в системах, подверженных действию внешних сил.

Все эти причины в совокупности ведут к тому, что среды, содержащие латентную энергию, в том числе и горные породы, очень часто ведут себя, как взрывчатка.

Примеры случаев динамического разрушения, причиной которого были высокие латентные напряжения: взрыв свободно лежащей балки, глыб породы в отвалах, стальных шариков, вынутых из барабана полировочной машины, и др.

Приведем особенно яркий пример. В свое время в качестве игрушки изготовлялись так называемые «батавские слезки» – застывшие в падении капли стекла, имеющие форму объемной запятой. При обламывании «хвостика» капля с треском взрывалась в пальцах, превращаясь в беловатую пыль. Чтобы измельчить материал до такой тонкой фракции внешним усилием, потребовалось бы затратить весьма значительную работу. Тем не менее, столь значительный запас энергии, который позволил выполнить работу по измельчению стекла до фракции пудры, заключен в весьма небольшом объеме самой «батавской слезки».

Энергонасыщенный субстрат может разрушаться прорастанием одной трещины и образованием сети трещин отдельности, ведущей к его интенсивному дроблению. Разрушение с дроблением материала на множество мелких ячей, например, можно наблюдать при разрушении закаленного стекла (из него, в частности, изготовляют лобовые стекла автомашин).

Механизм ячеистого дробления состоит в следующем [Финкель, 1970]. Фронт разрушения, образуемый многими трещинами, имеет сферическую форму с центром в точке удара. В результате размножения возникшие трещины могут идти радиально или «тангенциально». Один размер будущей ячейки («отдельности») обусловлен ростом радиальных трещин, а второй – ответвлением боковых трещин («тангенциальных») от основных («радиальных»). Общая тенденция процесса разрушения – покрыть стекло статистически равномерной сетью трещин. Слишком крупные фрагменты, образовавшиеся при первичном дроблении, разрушаются затем до среднестатистической нормы, расчленяясь на более мелкие осколки. Средняя скорость распространения тре-

щин в закаленном стекле 1500 м/с. С физической точки зрения картина разрушения дроблением представляет собой результат автокаталитического распада поля латентных напряжений.

Обзор работ, в которых рассматривался процесс ветвления трещин в различных материалах, приведен в работе [Финкель, 1970]. Здесь мы укажем только на некоторые моменты проводившихся исследований этого процесса.

Существует определенная пороговая скорость роста трещины, по достижении которой она начинает ветвиться. Для стекла это скорость около 1500–1700 м/с. При меньших скоростях ветвление не происходит. Основная особенность процесса – резкий спад скорости трещины после акта ветвления. Затем трещина вновь набирает скорость, после чего ветвление скачкообразно уменьшает ее и т.д.

Рост ветвящейся трещины – это чередующиеся периоды набора скорости перед ветвлением и ее потери после него. На модели с жестким основанием наблюдалось ветвление уже ответвившихся трещин, так что окончательная картина была образована совокупностью ветвей трех-четырех поколений.

Угол ветвления, т.е. угол между ответвившейся «дочерней» и основной «материнской» трещиной, зависит от скорости последней: чем эта скорость меньше, тем ближе угол ветвления к прямому.

В принципе причиной ветвления трещин является ее нестабильность, наступающая по достижении критических скоростей. До таких скоростей трещина может быть разогнана в материале и действием внешней нагрузки. Но наличие латентных напряжений чрезвычайно стимулирует этот процесс. Приведем выдержку из обзорной работы, на которую мы сослались, обсуждая тему ветвления трещин.

«Для множественного же ветвления ... необходимы колоссальные ускорения трещины порядка 10^{10} см/с^2. Очевидно, локализованные очаги с высоким упругим потенциалом остаточных напряжений как раз и способны обеспечить большие ускорения трещины и тем самым многократное последовательное их ветвление. В противном случае, при отсутствии внутренних напряжений, ветвление тоже возможно. Однако для этого необходимы чрезвычайно высокие внешние напряжения» [Финкель, 1970. С. 159].

Автору настоящей работы пришлось побывать в очаге мощного горного удара, произошедшего на одной из шахт Североуральского бокситового рудника. Стенки подземной полости, вскрывавшие прочную монолитную горную породу, после горно-

го удара оказались покрыты густой мозаикой трещин отдельности, причем элементы этой мозаики, представляющие столбчатые отдельности, можно было извлекать из стенки просто пальцами. Трудно представить, чтобы столь интенсивное дробление могло быть вызвано только действием внешних сил. Если бы это было так, то растрескавшаяся горная порода, державшаяся на стенках только за счет ничтожной руинной прочности, не могла бы не обрушиться в свободное подземное пространство.

Способен ли волновой процесс вызвать ветвление трещин в объеме среды, нагруженном только внешней силой? Обсуждая такое истолкование процесса дробления, В.М. Финкель (с. 176) замечает: «По нашему мнению, объяснение подобного рода пригодно в случае единичного ветвления трещин, но весьма сомнительно в случае множественного ветвления». Главное условие множественного ветвления – наличие в теле дисперсно-рассеянных собственных источников энергии и концентраторов напряжений. В результате их взаимодействия с упругими волнами процесс разрушения и принимает характер взрыва. «При распространении ударного импульса ... впереди фронта истинного разрушения на различных неоднородностях образуются локальные изолированные очаги разрушения (переносное разрушение). Они имеют форму точки, от которой в обе стороны отходит по несколько трещинок, способных расти в обоих направлениях. Процесс объединения многих таких разрушенных участков и создает иллюзорное впечатление о сверхрелеевской скрости трещин» [Финкель, 1970. С. 176].

Кратко обсудим еще один аспект затронутой темы.

Прохождение продольной волны сквозь элемент объема среды попеременно вызывает в нем сжатие и растяжение. Это может привести к образованию в нем «мгновенных» дисперсных или ориентационных латентных напряжений. Время жизни таких «эфемерных» напряжений определяется временем прохождения полуволны растяжения или сжатия. Такие «наведенные» волновым процессом латентные напряжения на время прохождения волн могут резко изменять физико-механические свойства субстрата, сообщая ему повышенную хрупкость, склонность к лавинообразному развитию разрушения и т.д. Видимо, именно поэтому более неоднородные материалы при взрыве разрушаются гораздо легче и интенсивнее, чем более однородные. Так, показано, что взаимодействие динамических и статических напряжений в бетоне и граните проявляется по-разному. В бетоне взрыв не оказывает существенного влияния на глобальное деформирование образца. В граните же взрывы с энергией на два-три поряд-

ка меньше запасенной упругой энергии образца вызывают аномально большие разрушения в окрестности источника взрыва [Корявов и др., 1981].

Подводя итог обсуждению вопроса о дроблении среды при динамично протекающем процессе разрушения, еще раз подчеркнем основную мысль: обязательным условием множественного ветвления трещин является наличие в разрушаемом объеме среды латентных напряжений. При их отсутствии дробление среды не будет столь интенсивным. Если исследователь сталкивается с картиной интенсивного дробления, хорошо развитыми сетями трещин отдельности, то, вероятнее всего, причиной образования структур такого рода были латентные напряжения.

3-3. РАЗРУШЕНИЕ В УСЛОВИЯХ ЗЕМНЫХ НЕДР

Существует распространенное мнение, что условия для хрупкого разрушения наиболее благоприятны в верхней части земной коры. С глубиной же, по мере роста температуры и давления, поведение пород становится все более пластичным. Не оспаривая в общих чертах это мнение, рассмотрим посылки к тому, что хрупкое разрушение, тем не менее, вполне возможно на достаточно больших глубинах.

3-3.1. Хрупкое разрушение в условиях высоких температур

Предполагается, что глубинам 13–17 км, т.е. слою земной коры, где активность сейсмического процесса близка к максимальной, свойственны температуры 400–700 °С [Киссин, 2002]. Возможно ли хрупкое разрушение среды в таком ее достаточно «горячем» состоянии?

При анализе этой проблемы во внимание следует принять то обстоятельство, что повышение температуры, с одной стороны, повышает пластичность субстрата, но, с другой стороны, ее изменения возбуждают различные фазовые и полиморфные превращения, которые делают среду сильно неравновесной, энергонасыщенной и тем самым более склонной к хрупкому динамичному разрушению.

Физическая картина перехода субстрата в энергонасыщенное состояние сейчас хорошо изучена в отношении металлов. Таковы, например, изменения состояния сталей при мартенситных превращениях, происходящих при около 500 °С. В металлах критическое состояние наступает при температурах, соответствую-

щих переходу из пластического состояния в упругое. Для чугуна такой «критический» интервал температур 400–700 °С. Из физического материаловедения известно, что именно в этой области температур в металлах происходят фазовые превращения, которые возбуждают значительные латентные напряжения и тем самым придают этим металлам повышенную хрупкость [Финкель, 1970; Фридман, 1974].

Установлено, что хрупкое разрушение с образованием трещин отрыва возможно и при высоких температурах, когда материал еще достаточно пластичен. При этом инициирующие трещины возникают на тех гранях кристаллов, которые ближе по своей ориентировке к плоскостям, нормальным к действию растягивающего напряжения [Работнов, 1979]. Дальнейшее смещение по таким трещинам («тектоническое течение») может придать материалу рассланцованную структуру, а сами зоны образовавшейся трещиноватости могут служить каналами для транспортировки флюида.

3-3.2. Хрупкое разрушение в условиях высокого давления

В вопросе влияния высокого давления на механическое поведение вещества обычно подчеркивают два момента.

Во-первых, предполагается, что ниже определенной глубины открытые трещины, даже если они образуются, тут же «схлопываются» под действием высокого давления и, следовательно, в «раскрытом» виде на больших глубинах они становятся невозможны.

Во-вторых, предполагается, что порода «сплющивается», «раздавливается» высоким давлением и тем самым переходит в пластическое состояние.

В отношении первого предположения заметим, что трещины не бывают «пустыми» и вблизи дневной поверхности они заполнены водой или газом при атмосферном давлении. Точно так на больших глубинах они заполнены газом, газово-флюидной смесью или расплавом при давлении, которое соответствует этим глубинам. Это означает, что для раскрытия трещин преодолевать величину наложенного гидростатического давления не требуется. Другими словами, среда на больших глубинах «не замечает» того высокого давления, которому она подвержена.

За этим утверждением стоит следующее обоснование.

В процессе своего формирования горная порода как макроскопическая конструкция подвергается «сборке» на атомно-мо-

лекулярном уровне. Более того, такая сборка осуществляется заново всякий раз при значимом изменении PT-условий. С этой точки зрения геологическая среда, вовлекаемая в многообразные структурно-вещественные преобразования, находится в состоянии непрерывной реконструкции. Если «сборка» протекает в условиях высокого давления, оно уравновешивается на связях атомного и молекулярного уровней. Вследствие этого надмолекулярная структура горной породы оказывается ненагруженной. Такая горная порода как структурная композиция «не ощущает» действующего на нее высокого давления подобно тому, как глубоководная рыба как организм, как конструкция не ощущает высокого гидростатического давления, в условиях которого она сформировалась. Из модели «глубоководной рыбы» следует, что прочность пород – их сопротивление действию девиаторных напряжений – не слишком отличается от прочности пород в условиях атмосферного давления.

Зададимся вопросом: каким должно быть усилие, чтобы разорвать ткань глубоководной рыбы в условиях ее обитания? Следуя традиции, мы должны были бы полагать, что для этого растягивающее усилие должно превысить величину гидростатического давления. Но интуиция и опыты П. Бриджмена говорят, что величина давления должна иметь порядок прочности ткани рыбы при атмосферном давлении. Мы знаем: прочность тканей обычных мелководных рыб и рыб глубоководных примерно одинакова, хотя в последнем случае, чтобы противостоять огромным давлениям абиссальных глубин, она должна была бы обладать исключительно высокой прочностью. Как бы равнокомпонентное давление ни было велико, материал реагирует не на его величину, а на величину нарушения его симметрии.

Представления, в которых выражено предположение о том, что макроскопическая структура геологической среды в глубине земных недр противостоит высокому давлению, соответствующему этой глубине, образно говоря, соответствуют «модели батискафа», когда внешнее давление уравновешивается прочностью корпуса. В противоположность «модели глубоководной рыбы», в этом случае тела рассматриваются «пустотелыми» в том смысле, что их макроскопические структурные связи противостоят полной величине давления, свойственного рассматриваемым глубинам.

Из сказанного следует и то, что высокое давление отнюдь не в состоянии «расплющивать» породу до перевода ее в стационарно пластическое состояние. Наоборот, в условиях гидростатического давления, сколь бы оно ни было высоким, состояние вещества близко к идеальной упругости.

Трещины отрыва с разъединением атомных плоскостей могут возникать в твердых телах теоретически на сколь угодно большой глубине при выполнении условий их возникновения, не слишком отличающихся от тех, которые способствуют возникновению трещин хрупкого отрыва вблизи дневной поверхности. Радикально же влияет на механическое поведение геологической среды температура, увеличение которой «размягчает» вещество вплоть до его перехода в пластичное, пастообразное или вполне жидкое состояние.

Таким образом, при ближайшем рассмотрении представление о том, что в своей реакции на высокое давление геологическая среда реагирует как «пустотелая», равно как и заключения, которые выводятся из этой посылки, несмотря на их широкую распространенность, являются не более чем распространенным предрассудком.

Тем не менее упругая энергия, «закачанная» в вещество высоким давлением, проявляет себя на макроскопическом уровне, но в другой, весьма специфической форме.

Согласно основной концепции физического материаловедения, высокое внешнее давление изменяет атомное строение твердого тела. В частности, оно изменяет межатомные расстояния и выталкивает электроны из их обычных атомных уровней. Это, в свою очередь, влечет за собой изменение энергетической структуры сжатых молекул и атомов, выраженное изменением их фононных спектров, межатомных взаимодействий и т.п. Материал по мере роста давления скачкообразно проходит через ряд фаз. Уменьшение же давления выстраивает последовательность структурных и энергетических преобразований в обратном порядке. При этом отдельные фазы материала, а с ними и весь объем содержащей их матрицы, могут переходить в сильно неравновесное состояние [Влияние..., 1987].

3-3.3. Относительное растяжение

Когда, рассматривая тектонические проблемы, говорят о «напряжениях растяжения», то речь идет не о растяжении в буквальном смысле этого термина, т.е. об «абсолютном растяжении», а об относительном растяжении. Вес пород, только за исключением самых незначительных глубин, слишком велик для того, чтобы могло осуществиться «истинное состояние растяжения». Под «тектоническим напряжением» понимают разность между действительно имеющимся напряжением и средним изо-

тропным давлением. Если истинные напряжения обозначить тензором τ_{ik}, то «тектоническим напряжением» будет девиатор $T_{ik} = \tau_{ik} - (1/3\Sigma\tau_{ik})\delta_{ik}$, где δ_{ik} – тензор Кронекера. Отдельные составляющие тензора T_{ik} могут иметь отрицательные значения. Когда один из диагональных элементов T_{ik} в основной системе координат отрицателен, говорят о растяжении в соответствующем направлении.

Обычно под «тектоническим напряжением» понимают разность между действительно имеющимся напряжением и средним изотропным давлением. Если эта разность положительна, то говорят о «тектоническом сжатии», если же она отрицательна – о «тектоническом растяжении» [Шайдеггер, 1967]. Поэтому нередко в расчетах состояние относительного растяжения заменяют эквивалентной схемой, в которой изотропное напряжение приравнивают нулю, а величину разгрузки принимают в качестве абсолютного растягивающего напряжения (см., например, [Биргер, 1963]). Такая замена не формальна: этой схеме соответствуют и действительные деформации, возникающие в материале.

Видоизменение напряженного состояния трехосного сжатия, при котором все главные напряжения являются сжимающими и выполняется условие $\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_3$, есть напряженное состояние растяжения. При этом направление алгебраически наибольшего главного напряжения совпадает с направлением действия разгрузки [Земля..., 1974].

Иногда состояние относительного растяжения именуют *растяжением, вызванным двухсторонним сжатием*. Под влиянием этого напряженного состояния материалы испытывают деформацию полноценного растяжения [Смирнов-Аляев, 1949]. Это определение подчеркивает, что для характера деформирования материала несущественно, какие силы являются «активными»: растяжение или сжатие. Он определенным образом реагирует только на соотношение главных напряжений. В частности, при этом образуются трещины отрыва («трещины разгрузки») даже в том случае, если все главные напряжения являются сжимающими. Нетрудно заметить, что относительное растяжение является условием, при котором осуществляется самопроизвольное хрупкое разрушение. Для понимания разрушения геологической среды возможность появления трещин отрыва в условиях неравнокомпонентного сжатия имеет принципиальное значение.

Опыты, соответствующие воздействию относительного растяжения на образцы стекла и других хрупких материалов, были осуществлены П. Бриджменом [1955]. В этих опытах образцы в форме стержней проходили сквозь два сальника в сосуд высоко-

го давления, и часть стержня, находящаяся внутри сосуда, подвергалась гидравлическому обжиму. Одновременно с возрастанием давления жидкости образец сжимался осевой нагрузкой, действующей на его свободные торцы, вследствие чего весь образец в целом подвергался равномерному всестороннему сжатию. Во второй стадии опыта образец, находящийся в состоянии всестороннего сжатия, разгружался по одной оси; что достигалось уменьшением осевого усилия при неизменном гидростатическом обжатии. При достаточно большой разгрузке стержень разрывался, причем плоскость разрыва, носившая ясно выраженный характер разрыва при растяжении, была нормальна к направлению действия разгрузки. Образование трещин хрупкого отрыва в условиях, когда все три главных напряжения являются сжимающими, П. Бриджмен отмечал как явление «в высшей степени парадоксальное». Это явление он назвал «пинч-эффектом», или явлением «перекусывания». В типичном случае, например, трещины отрыва возникали в образцах стекла в плоскости, на которой действовало сжимающее напряжение, уменьшенное в процессе опыта с 26 000 до 15 100 кг/см^2.

По первоначальной версии, причиной пинч-эффекта предполагалось расклинивающее действие жидкости, проникающей в трещины образца. Для проверки этой версии образец перед испытаниями заключали в свинцовую оболочку, исключавшую проникновение жидкости в образец. Результат, тем не менее, оказался прежним. Физически правдоподобного объяснения эффект так и не получил. Однако отсутствие объяснения факта не отрицает само его существование. Это означает лишь одно: в современных теоретических взглядах на механику разрушения в условиях высоких давлений существует пробел фундаментального значения.

Сложившаяся ситуация напоминает ситуацию в физике, когда была обнаружена аномалия в равновесном излучении абсолютно черного тела, не укладывавшаяся в рамки классической физики. В попытках решить антиномию между теорией и опытными данными была создана квантовая механика, покоящаяся на совершенно иных теоретических основаниях. Возможно, что нечто подобное произойдет в будущем и при попытках найти подходящие теоретические основания для их согласования с пинч-эффектом. Пока же примем как вероятную возможность того, что образование трещин хрупкого отрыва и их систем возможно и в глубоких недрах Земли в том случае, если в геологической среде действуют условия относительного растяжения.

Можно привести немало примеров, когда упрощенные «механоцентрические» представления не в состоянии охватить всю сложность поведения реальных тел. Физико-механические свойства горных пород при высоких давлениях, соответствующих условиям недр Земли, например, пытаются выяснить, подвергая образцы высокому давлению. Однако свойства горной породы, сформировавшейся в условиях высокого давления, не будут соответствовать свойствам породы того же вещественного состава, пусть и подвергнутой высокому давлению, но структура которой уже успела прийти в соответствие условиям земной поверхности. Нагружая образцы пород или других модельных материалов, структура которых уже пришла в соответствие с «комнатными» термодинамическими условиями, породы подвергают столь чудовищному давлению, которого они на уровне своей надмолекулярной структуры никогда бы не испытали, образуясь глубоко в недрах Земли. Если говорить о реальном поведении твердых тел в условиях глубин, то его имитация должна соответствовать модели «глубоководной рыбы», требующей, чтобы исследуемое тело не просто нагружалось высоким давлением, а формировалось в этих условиях.

Высокое давление создает огромные запасы упругой энергии в веществе; изменяя его электронную структуру [Курдюмов, Дегтярева, 1987]. Можно предположить, что существуют какие-то механизмы последовательной передачи этой энергии на минеральном, породном и надпородном уровнях строения геологической среды по мере уменьшения давления. Поток энергии, запасенной на глубинном атомно-молекулярном уровне, в условиях разгрузки устремляется на «периферию» – на микро- и макроструктурный уровни. Это значит, что разгруженные породы, сформировавшиеся в глубоких недрах, в форме фиксированных упругих деформаций могут вмещать в себе огромную избыточную энергию, на что в свое время и обращал внимание К.И. Богданович.

Поведение материалов в условиях высоких давлений дает примеры того, что монотонные изменения температуры и давления, порознь и в сочетании, могут обеспечить не монотонное, а скачкообразное изменение состояния субстрата в аспекте его энергонасыщенности, а также связанной с нею его способности к динамическому разрушению. Что касается наук о Земле, то здесь вопросы, имеющие касательство к затронутой нами теме, поднимались во многих работах теоретического и экспериментального характера, в частности предпринимались попытки вывести существование геофизической границы Конрада из скачкообразных вещественных изменений. Однако аспект механических напряжений, возникающих в процессе вещественных

преобразований, и их возможная роль в деструкции среды практически оставался вне рассмотрения.

Положение дел в этой области стало меняться после результатов, полученных при бурении Кольской сверхглубокой скважины, достоверно показавших, что граница Конрада имеет, скорее, не вещественную, а структурную природу. Импульсом к развитию исследований в этом направлении явилось также развитие представлений о влиянии глубинных флюидов на формирование структурно-вещественного состояния земной коры. В связи с этим, стал активно обсуждаться, пока преимущественно в постановочной форме, вопрос о природе повышенной проницаемости литосферы для флюидов и формах структурной выраженности флюидопроводящих каналов. Подаспект этой темы – интерес к уяснению природы тектонической раздробленности в зонах жильных месторождений нефти. Изучение тонкой структуры коровой сейсмичности призвано сыграть в комплексе этих задач новую и эффективную роль инструмента, позволяющего не только устанавливать объемные очертания зон деструкции, но и процесс их формирования, а также их современное структурное состояние, что имеет множество выходов на насущнейшие потребности практики.

3-3.4. Дилемма «сдвиг–отрыв»

За логическими рассуждениями обычно стоит какая-нибудь интуитивная посылка. Более того: если за теоретическими рассуждениями такая посылка отсутствует, то они чаще всего бесплодны – в смысле их претензий на объяснение тех или иных сторон натуры. Хуже всего, если место такой интуитивной посылки занимает теоретический догмат. К числу таких догматических посылок, воспроизводимых во многих работах чисто автоматически или же высказываемых как своего рода кредо лояльности по отношению к существующим теоретическим установкам, относится утверждение, что основной формой разрушения горных пород *in situ* является сдвиг («скалывание»).

Авторы работы [Ольшак и др., 1964] отмечают противоречие между представлениями о характере разрушения, вытекающими из теоретических посылок механики сплошной среды, и разрушением, наблюдаемым на опыте. Если в качестве основной формы разрушения в теоретических представлениях выступает сдвиг, то экспериментальные данные говорят о том, что основной формой разрушения является отрыв (см., в частности, [Гончаров, Талицкий,1998]).

Обсуждая затронутую проблему о ведущем типе разрушения – сдвиге или отрыве, Н.М. Беляев [1951, с. 278] замечал, что «в последнее время многие ученые склонны приписывать отрыву вообще все случаи разрушения материала». Он отмечал, что разрушение хрупких неметаллических материалов, таких как стекло, пластмассы, бетон и горные породы, как правило, происходят по площадкам, перпендикулярным к оси образца, т.е. как раз по тем, где действуют наибольшие растягивающие напряжения. При кручении таких же образцов трещины разрушения располагаются приблизительно под углом 45° к оси образца, т.е. опять-таки перпендикулярно к направлению наибольших растягивающих напряжений. При сжатии призм разрушение начинается с появлением трещин, параллельных направлению сжимающего усилия, а следовательно, перпендикулярно к направлению деформации растяжения.

Об отсутствии сдвиговых смещений на берегах трещин, образующихся при разрушении образцов горных пород, о том, что эти трещины являются трещинами отрыва, ясно свидетельствует фактура поверхностей трещин – «раковистый» излом, «перистые», «султанные», «шевронные», «елочные» рисунки. Вопреки существующему представлению, что такие фактурные рисунки имеют место в сравнительно редких случаях, Дж. Гремберг на большом экспериментальном материале показал, что они развиваются по поверхностям трещин всегда, даже в случаях, когда окончательное разрушение происходит от среза по наклонной плоскости. Он же показал, что последний происходит только в практически разрушенном материале, уже почти потерявшем свою связность и по существу представляющем собой «сыпучую» массу. В своих опытах Дж. Гремберг отмечал, что осевое растрескивание образцов сопровождалось увеличением объема, воспринимаемым как поперечное расширение [Gramberg, 1965].

Сходная фактура наблюдается на берегах трещин в горных породах, образующихся естественным путем. Так, автор работы [Bankwitz, 1965] детально изучил морфологию тысяч трещин в Тюрингских Сланцевых горах. Он констатировал наличие на поверхности многих трещин неровностей, образующих перообразные, веникообразные или кольцевые структуры. Эти осложнения на поверхностях трещин свидетельствуют о том, что трещины в процессе своего развития разрастались в разные стороны от некоторой исходной точки или линии.

Структурный рисунок на поверхностях трещин исключает возможность скалывания вдоль трещин в обычном смысле, когда вектор смещения предполагается постоянным для всех точек по-

верхности трещин. Этот вектор имеет различную величину и направление для разных точек.

Прежде чем перейти к следующему моменту, остановимся на кратком комментарии к данным опытов Дж. Гремберга.

Механика сплошной среды предсказывает, что вероятность разрушения наиболее высока в плоскости, где действуют наибольшие касательные напряжения. Эксперимент же говорит о том, что сдвиговый тип смещений осуществляется не в сплошной среде, а в среде сыпучей, т.е. с разрушенными дальнодействующими структурными связями, потерявшей тем самым сплошность.

Напомним, что тектонофизическим аргументом в пользу «сдвигового» механизма очага землетрясения явилась так называемая «парная трещиноватость», наблюдаемая в природе и рассматриваемая как ведущий тип трещиноватости земной коры [Гзовский, 1975]. Однако гораздо большее распространение в земной коре имеют системы трещин, сообщающие ей блоковую делимость, т.е. породы земной коры в приповерхностном слое представляют собой среду с разрушенными дальнодействующими связями, нечто типа «сыпучей» среды, если рассматривать ее с меньшим масштабным разрешением. С этой точки зрения широкую распространенность парной трещиноватости в земной коре можно рассматривать как вторичное перемещение масс пород, уже нарушенных первичными трещинами отдельности, сообщающими им блочную структуру.

Наличие латентных напряжений, по всей видимости, является причиной несимметричного поведения материала в координатах «сжатие–растяжение».

Материал в каждой своей малой области – «точке» не различает природу действующих в ней напряжений, а реагирует на их сумму. В зависимости от знака приложенных напряжений деформирование и разрушение материала будет протекать различным образом: при наложенном внешнем сжатии оно будет более пластичным, при уменьшении же величины внешнего сжатия, т.е. при разгрузке, материал будет вести себя более хрупко, поскольку суммарное напряжение растяжения при этом возрастает. Этим, в частности, может быть объяснена двойственность деформационного поведения горной породы, состоящая в том, что породы одного и того же вещественного состава в натурных условиях то склонны к пластическому течению, то к хрупкому дроблению. Поэтому разгрузка представляется одной из важнейших причин образования в породах трещин хрупкого отрыва.

Дислокационный механизм охрупчивания материала сводится к образованию микротрещин, соизмеримых с областью скопления

кластеров дислокаций, или в случае точечных дефектов – с размером областей искажения конфигурации кристаллической решетки, вызванных внедрением примесных атомов. Дальнейшее прорастание микротрещин возможно только в поле сил, которые по отношению к таким малым локальным объемам материала являются внешними. Такими полями сил, внешними по отношению к указанным субмикроскопическим областям, могут быть поля латентных напряжений более низкого ранга. В этом случае предельная длина образующихся трещин будет определяться масштабным рангом этих полей. Так, под влиянием сварочных напряжений возможно растрескивание сварочного шва с образованием множества, хотя и мелких, но видимых невооруженным глазом трещин. Если же в свариваемой конструкции имеются напряжения первого рода или она нагружена внешней силой, то возможно объединение этих трещин и образование магистрального разрыва, разрушающего по сварному шву всю конструкцию в целом.

Дж. Гриффитс, вводя представление о начальных трещинах отрыва, которые снижают прочность материалов относительно их теоретической прочности (о «трещинах Гриффитса», как стали называть их впоследствии), сделал попытку примирить свои построения с положениями механики сплошной среды, введя предположение, что концы зародышевых трещин являются сколовыми и загнуты по отношению к оси трещины под углом 45°, так что форма трещины напоминает знак интеграла. Предпринятые впоследствии попытки обнаружить «трещины Гриффитса» такой формы, в том числе и с помощью электронной микроскопии, успеха не имели.

Таким образом, при внимательном изучении оснований, на которых построено представление о примате сдвига в отношении разрушения горных пород, мы приходим к заключению, что это представление по существу представляет собой теоретический постулат. С данными экспериментов и натурными наблюдениями оно не согласуется.

3-3.5. Предпосылки к альтернативной модели очага землетрясения

В теоретической сейсмологии основной формой механизма очага тектонического землетрясения считается сдвиг, хотя наблюдения над дислокациями, сопровождающими землетрясения, показывают только то, что в этом случае можно говорить лишь о смещениях по ослабленным поверхностям – разрывам, играющим роль наложенных кинематических связей, трансформирую-

щих в своей плоскости смещения любого направления, кроме строго нормальных.

В экспериментах по моделированию очага землетрясения осуществить чистый сдвиг так и не удалось: «сдвиговый» характер разрушения удавалось получить только в виде смещений по заранее ослабленным поверхностям. При напряженном состоянии, которое в соответствии с теоретическими посылками должно порождать трещины сдвига, возникают системы трещин отрыва, которые Дж. Гремберг назвал *осевыми расщепляющими трещинами*. Совокупность сведений о разрушении энергонасыщенных сред позволяет сделать следующее предположение: не является ли землетрясение актом динамического высвобождения собственного энергетического потенциала среды, в процессе которого происходит скачкообразное смещение берегов образовавшегося разрыва?

Рассмотрим, как соотносятся с этим предположением основные аргументы, которые обычно приводят в качестве доказательств «сдвигового» характера деформаций в очаге землетрясения.

В основе принятых представлений о природе тектонических землетрясений лежит схема Рида – «теория упругой отдачи». Эмпирической базой ее построения послужили геодезические измерения, проведенные в области катастрофического землетрясения в Сан-Франциско в 1906 г. По этим измерениям была восстановлена картина деформаций в области сейсмогенерирующего разлома. Эпюра напряжений, обусловивших эти деформации, напоминает эпюру напряжений в пластинах термостата (см. рис. 2-1). Однотипность эпюр напряжений в обоих случаях означает, что причиной землетрясений могут быть не обязательно деформации, создаваемые смещением берегов разрыва под действием внешних сил. В принципе, ту же картину создадут фиксированные упругие деформации, накапливаемые природными двухслойными системами в зоне контакта их разнородных составляющих. В последнем случае причиной землетрясений будут не «тектонические» силы, а энергетические преобразования в зоне контакта и обусловленные ими фиксированные упругие деформации. Такая точка зрения в свете существующих представлений о природе землетрясений выглядит парадоксальной, однако, как будет показано далее, она более удовлетворительно согласуется с наблюдаемыми фактами, чем представление о «сколовом» механизме.

Аргументы в пользу «сколового» механизма очагов землетрясений приведем из одной среди наиболее содержательных в

этом отношении работ – [Гзовский, 1975]. Рассматривая дилемму «сдвиг–отрыв» применительно к очагу землетрясения, М.В. Гзовский склоняется к приоритету «сдвига», исходя из следующих соображений.

Среди сильных землетрясений неизвестно таких, которые были бы связаны с возникновением поверхностей отрыва, хотя геологам известно большое количество отрывов, рассекающих верхнюю часть земной коры. Поскольку условно-мгновенные прочности горных пород на отрыв в пять-десять раз ниже прочностей на скалывание, сила землетрясений, связанных с отрывами, должна быть на один-два балла меньше, чем у связанных со сколами. Но, кроме того, образованию отрывов препятствует общее высокое всестороннее сжатие, характерное для тех глубин, на которых расположены очаги большинства землетрясений. В верхней части коры, где отрывы встречаются весьма часто, прочность горных пород (из-за малости всестороннего сжатия) намного меньше, чем на тех глубинах, где отрывы должны быть редки. Все это показывает, что энергия землетрясений, вызываемых появлением отрывов, должна быть значительно меньше энергии землетрясений, обусловленных развитием сколов. Вероятно поэтому, и не бывает сильных землетрясений, порождаемых отрывами.

Оценим силу этих аргументов.

Первый из них о том, что количество упругой энергии, которое могут накопить горные породы, зависит от их прочности на отрыв и скол, полностью относится к случаю нагружения пород внешней нагрузкой, к системам с последовательным энергоснабжением. Выше мы перечислили ряд обстоятельств, в силу которых системы с независимым энергоснабжением могут обеспечить условия, гораздо более эффективные для динамичного развития трещин. Выше приводились данные о том, что в песчаниках плотность латентной энергии может достигать 10^4 эрг/см^2. Очевидно, что в породах большей прочности и в особенности в условиях высокого всестороннего давления ее величина может достигать еще больших значений. Создать запас упругой энергии в веществе, достаточный для того, чтобы процесс разрушения принял динамичное, лавинообразное развитие, действием внешней нагрузки весьма затруднительно не только в случае растяжения, но и в случае скола. Взгляд на проблему, изложенную М.В. Гзовским, с точки зрения представления о механизме достижения средой энергонасыщенного состояния можно выразить следующим тезисом: не бывает сильных землетрясений, порождаемых не только отрывами, но и сколами, если деформации, обеспечиваю-

щих в своей плоскости смещения любого направления, кроме строго нормальных.

В экспериментах по моделированию очага землетрясения осуществить чистый сдвиг так и не удалось: «сдвиговый» характер разрушения удавалось получить только в виде смещений по заранее ослабленным поверхностям. При напряженном состоянии, которое в соответствии с теоретическими посылками должно порождать трещины сдвига, возникают системы трещин отрыва, которые Дж. Гремберг назвал *осевыми расщепляющими трещинами*. Совокупность сведений о разрушении энергонасыщенных сред позволяет сделать следующее предположение: не является ли землетрясение актом динамического высвобождения собственного энергетического потенциала среды, в процессе которого происходит скачкообразное смещение берегов образовавшегося разрыва?

Рассмотрим, как соотносятся с этим предположением основные аргументы, которые обычно приводят в качестве доказательств «сдвигового» характера деформаций в очаге землетрясения.

В основе принятых представлений о природе тектонических землетрясений лежит схема Рида – «теория упругой отдачи». Эмпирической базой ее построения послужили геодезические измерения, проведенные в области катастрофического землетрясения в Сан-Франциско в 1906 г. По этим измерениям была восстановлена картина деформаций в области сейсмогенерирующего разлома. Эпюра напряжений, обусловивших эти деформации, напоминает эпюру напряжений в пластинах термостата (см. рис. 2-1). Однотипность эпюр напряжений в обоих случаях означает, что причиной землетрясений могут быть не обязательно деформации, создаваемые смещением берегов разрыва под действием внешних сил. В принципе, ту же картину создадут фиксированные упругие деформации, накапливаемые природными двухслойными системами в зоне контакта их разнородных составляющих. В последнем случае причиной землетрясений будут не «тектонические» силы, а энергетические преобразования в зоне контакта и обусловленные ими фиксированные упругие деформации. Такая точка зрения в свете существующих представлений о природе землетрясений выглядит парадоксальной, однако, как будет показано далее, она более удовлетворительно согласуется с наблюдаемыми фактами, чем представление о «сколовом» механизме.

Аргументы в пользу «сколового» механизма очагов землетрясений приведем из одной среди наиболее содержательных в

этом отношении работ – [Гзовский, 1975]. Рассматривая дилемму «сдвиг–отрыв» применительно к очагу землетрясения, М.В. Гзовский склоняется к приоритету «сдвига», исходя из следующих соображений.

Среди сильных землетрясений неизвестно таких, которые были бы связаны с возникновением поверхностей отрыва, хотя геологам известно большое количество отрывов, рассекающих верхнюю часть земной коры. Поскольку условно-мгновенные прочности горных пород на отрыв в пять-десять раз ниже прочностей на скалывание, сила землетрясений, связанных с отрывами, должна быть на один-два балла меньше, чем у связанных со сколами. Но, кроме того, образованию отрывов препятствует общее высокое всестороннее сжатие, характерное для тех глубин, на которых расположены очаги большинства землетрясений. В верхней части коры, где отрывы встречаются весьма часто, прочность горных пород (из-за малости всестороннего сжатия) намного меньше, чем на тех глубинах, где отрывы должны быть редки. Все это показывает, что энергия землетрясений, вызываемых появлением отрывов, должна быть значительно меньше энергии землетрясений, обусловленных развитием сколов. Вероятно поэтому, и не бывает сильных землетрясений, порождаемых отрывами.

Оценим силу этих аргументов.

Первый из них о том, что количество упругой энергии, которое могут накопить горные породы, зависит от их прочности на отрыв и скол, полностью относится к случаю нагружения пород внешней нагрузкой, к системам с последовательным энергоснабжением. Выше мы перечислили ряд обстоятельств, в силу которых системы с независимым энергоснабжением могут обеспечить условия, гораздо более эффективные для динамичного развития трещин. Выше приводились данные о том, что в песчаниках плотность латентной энергии может достигать 10^4 эрг/см^2. Очевидно, что в породах большей прочности и в особенности в условиях высокого всестороннего давления ее величина может достигать еще больших значений. Создать запас упругой энергии в веществе, достаточный для того, чтобы процесс разрушения принял динамичное, лавинообразное развитие, действием внешней нагрузки весьма затруднительно не только в случае растяжения, но и в случае скола. Взгляд на проблему, изложенную М.В. Гзовским, с точки зрения представления о механизме достижения средой энергонасыщенного состояния можно выразить следующим тезисом: не бывает сильных землетрясений, порождаемых не только отрывами, но и сколами, если деформации, обеспечиваю-

щие эти виды разрушения, создаются действием внешних сил. Причиной сильных землетрясений, как и вообще сейсмичности, является разгрузка собственного энергетического потенциала, представленного упругой энергией, сохранившейся до разгрузки в состоянии объемного сжатия геологической среды, либо латентной энергией, заблаговременно запасенной средой в результате непосредственно происходящих в ней (или происходивших в прошлом) энергетических преобразований.

Прямыми измерениями показано: латентные напряжения, создаваемые при различных технологических операциях (при шлифовке изделий из стали высокой прочности, сварке корабельной брони), могут достигать 70–80 кг/мм^2. Для того, чтобы обусловить такие напряжения, потребовалось бы давление столба пород высотой около 30 км. В свете таких данных выглядит неудивительным то, что «зеркала скольжения», по которым блоки пород «пришлифовываются» при взаимном смещении, часто подвергаются интенсивной фрагментации, образуя приразломные зоны дробления.

Чрезвычайно высокую концентрацию упругой энергии, запасенной фиксированными упругими деформациями, динамично высвобождающуюся при отрыве, ярко демонстрирует явление стреляния горных пород. Для того, кто непосредственно наблюдал это явление, это очень сильный аргумент, обращенный к его интуиции. Явление состоит в том, что стенки выработок самопроизвольно «отстреливают» небольшие линзообразные пластины пород со звуком, достигающим силы ружейного выстрела или даже взрыва шпурового заряда взрывчатки. При этом отскочившая отдельность несколько увеличивается в объеме, вследствие чего вложить ее обратно в образовавшуюся лунку невозможно. Фактура образовавшейся поверхности – типичная поверхность хрупкого отрыва.

В приведенном случае площадь поверхности отрыва пластины порядка нескольких десятков квадратных сантиметров. Что произойдет, если поверхность отрыва такого типа будет иметь площади в десятки, сотни, тысячи квадратных метров? Напомним, что площади излучающих поверхностей, образующихся при больших землетрясениях, достигают сотен и тысяч квадратных километров.

Что касается второго аргумента – о невозможности образования трещин отрыва в условиях высокого всестороннего давления, то его состоятельность уже обсуждалась, в связи с существованием пинч-эффекта. В настоящее время представление о возможности возникновения «открытых» трещин в условиях земных

недр уже не выглядит необоснованной гипотезой. Так, при бурении Кольской сверхглубокой скважины получены прямые свидетельства того, что трещины отрыва образуются на глубинах, существенно превосходящих те, которые для разрывных нарушений этого рода считались предельными. Другой пример: слои пониженной скорости в средней земной коре сейчас стали рассматривать как латеральные зоны повышенной проницаемости пород, представленные системами открытых трещин.

Наиболее сильным аргументом в пользу «сдвигового» очага землетрясения полагают «квадрантную» картину распределения знаков первых вступлений сейсмических волн, возбуждаемых землетрясением.

Любая теоретическая модель очага землетрясения должна соответствовать тому эмпирическому наблюдению, что положительные и отрицательные знаки первых вступлений продольных волн (Р-волн), излучаемых его очагом, упорядочены в пространстве – разделены *нодальными* линиями по *квадрантам*. Под «механизмом очага землетрясения» в узком смысле и подразумевают те смещения в его очаге, которые обеспечивают эту картину.

Совершим небольшой экскурс к истокам этого представления.

Соответствующие теоретические положения восходят к понятию дислокаций, заимствованному из металловедения и физики кристаллов. Одной из теоретических моделей, развиваемых в этой области, явились так называемые «дислокации Вольтерра». Если провести в упругой сплошной среде мысленный разрез, сместить его берега в плоскости разреза, а затем склеить, то это и будет локальный источник напряжений, соответствующий дислокации этого вида. Он представляет собой типичную элементарную систему латентных напряжений, в локальной области которой самоуравновешиваются напряжения противоположных знаков.

Обобщение понятия дислокации Вольтерра позволило применить это понятие для описания напряженного состояния разломов геологической среды. Но возникла дилемма. В случае дислокации Вольтерра никакие внешние силы к среде не приложены. Возбуждаемые ею напряжения локальны, они полностью определяются фиксированными упругими деформациями ее берегов. В принятых же представлениях о разломах и причинах смещения по ним предполагается, что они есть результат действия внешних сил.

Дилемма эта была разрешена в рамках теоремы об эквивалентности сил, которая утверждает, что поле смещений, порож-

даемых сдвиговой дислокацией на бесконечно малом элементе поверхности, идентично полю от двойной пары сил, приложенной к элементу поверхности в отсутствие дислокаций [Касахара, 1985]. На этой основе был разработан целый ряд моделей механизма очага землетрясения, таких как пара сил с моментом, двойная пара сил, действующих по нормали друг к другу, две пары сил с противоположно направленными моментами и др. В этих моделях рассмотрены различные варианты возможной направленности сейсмического излучения при условии распределения знаков первых вступлений по квадрантам.

Отметим два обстоятельства.

Во-первых, теория дислокаций внутренне противоречит положению механики сплошных сред, поскольку она разрабатывалась в отношении дискретных сред и дискретных смещений по наложенным кинематическим связям. Чтобы обойти это противоречие, Стэкеди, вводя в сейсмологию представление о дислокациях, представил его как «упругую теорию дислокаций».

Существует целый класс теорий, в которых предпринимались попытки снять противоречие между континуальными методами и дискретным строением вещества. По своему существу они паллиативны и уже в силу этого нередко сложны настолько, что их трудно применить на практике. В качестве примера можно указать на работу Э. Кренера [1965]. По своей сложности она не уступает общей теории относительности. Для решения тех же задач могут быть применены гораздо более простые и более адекватные средства, исходящие из прямого ви́дения физического существа задач, не опосредованного континуальными представлениями.

Во-вторых, реальная картина поля напряжений, обусловленная дислокационным механизмом, представлена условными эквивалентными схемами, в которых она рассматривается как результат действия внешних сил. Между тем разрядка напряжений, накопленных контактной системой, соответствующей дислокации Вольтерра (например, биметаллическим термостатом), дает картину распределения знаков первых вступлений по квадрантам непосредственно, «автоматически», без имитации напряженного состояния действием внешних сил. Если принять, что при землетрясении происходит разрядка напряжений, накопленных в соответствии с механизмом, соответствующим дислокации Вольтерра, то требование квадрантного распределения первых вступлений удовлетворяется прямо, непосредственно, дополнительных доказательств не требует. Оно имманентно присуще волновой картине, излучаемой при разрушении энергосодержа-

щих двухслойных систем. Существующие теоретические представления о механизме очага землетрясения являются уже производными от этой первичной схемы.

Соответствие классической модели очага землетрясения усматривалось в сдвиговом характере смещений по уже существующим разрывным нарушениям, активизированным землетрясениями, а также в существовании «парной трещиноватости». Мы уже приводили материалы, свидетельствующие о том, что трещины в породах земной коры, вопреки существующей теоретической установке, являются преимущественно трещинами хрупкого отрыва, тогда как трещины парной трещиноватости, соответствующие теоретической картине сдвига, образуются в результате вторичного смещения уже потерявшего связность материала. Целый ряд авторов и полагает трещины отрыва, которыми насыщена геологическая среда, трещинами первичными, а трещины всех других типов – трещинами вторичными (см., например, [Шульц, 1979]). Иными словами, есть основания полагать, что на макроуровне повторяется картина, наблюдаемая на субмикроскопическом уровне, где первичными зародышевыми трещинами, разъединяющими атомные плоскости, являются трещины отрыва. Что касается «сдвиговых» смещений по разрывам при землетрясениях, то каждое разрывное нарушение является наложенной кинематической связью. Вектор смещения масс горных пород, приведенных в движение землетрясением, разлагается плоскостью разрывного нарушения на две составляющие – нормальную к плоскости сместителя и тангенциальную, действующую в его плоскости. По нормали к плоскости сместителя массы пород смещаться не могут и если значения тангенциальной составляющей отличаются от нуля, то, соответственно, и происходит смещение пород в плоскости сместителя, воспринимаемое как «сдвиг».

Предположим, что в двухслойной системе, помимо местных латентных напряжений, возбуждены и реактивные напряжения более низкого порядка, присущие статически неопределимым системам. Очевидно, что в этом случае образование магистральной трещины должно сопровождаться еще и смещением вдоль ее берегов, и это должно происходить практически одновременно с образованием трещины отрыва, с очень небольшим запаздыванием, определяемым скоростью распространения упругих волн и временем, необходимым для преодоления инерции разъединенных частей. Волновая картина этого процесса содержала бы две составляющие: короткопериодную, связанную с образованием поверхности отрыва, и длиннопериодную, обусловленную сме-

щением разъединенных частей балки вдоль образовавшегося разрыва, что в общих чертах и соответствует волновой картине, наблюдаемой при землетрясениях.

3-4. ХРУПКОЕ ПОСЛЕДЕЙСТВИЕ

В кругу идей механики разрушения существует представление, согласно которому характер и темп развития разрушения, помимо других факторов, определяется запасом упругой энергии, запасенной системой. Если эта энергия сравнительно невелика, разрушение протекает медленно, спокойно, постепенно. При недостаточном подводе энергии разрушение может остановиться. При избытке подводимой энергии процесс разрушения может приобрести характер лавины или взрыва [Фридман, 1960].

Разумеется, энергия, необходимая для динамического разрушения тела, может быть подведена от внешнего источника энергии, например химическим взрывом или динамическим, ударным приложением значительной внешней нагрузки. Но в данном случае речь идет о разрушении за счет энергии, запасенной системой, т.е. энергии, которая к моменту разрушения уже содержалась в этом теле. Такой вид разрушения по форме его проявления можно назвать *самоподдерживающимся, самопроизвольным*, а по физическому смыслу – *релаксационным*. В дальнейшем мы и станем рассматривать именно такой вид разрушения.

Говоря о самопроизвольном разрушении, требуется иметь представление не только о том, как протекает разрушение в теле, располагающем запасом упругой энергии, но и о том, каков механизм накопления этой энергии.

3-4.1. Упругое последействие

Явление, состоящее в том, что твердые тела способны запасать упругие деформации и какое-то время хранить их уже после того, как причины, вызвавшие их появление, на тело уже больше не действуют, в механике деформируемого тела известно как *последействие*, или *запаздывающая упругость*. Иногда говорят об *упругом последействии*. Материалы, обладающие свойством последействия, называют *наследственно-упругими*, или *вязко-упругими*. Рассмотрим существо явления так, как оно освещено в работе [Работнов, 1979].

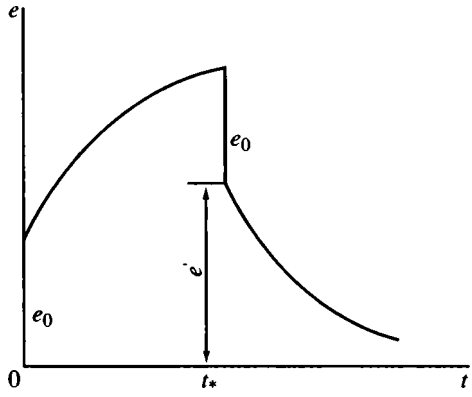


Рис. 3.1. Изменение деформации вязко-упругого тела в зависимости от времени [Работнов, 1979]

На рис. 3.1 приведен график, отражающий в идеализированном виде изменение деформации вязко-упругого тела в зависимости от времени. В начальный момент времени сила, приложенная к телу, вызывает его «мгновенную» начальную упругую деформацию на величину e_0. Однако по истечении времени t_* к начальной деформации прибавится добавочная деформация e'. Если мгновенно снять нагрузку в момент времени t_*, то упругая деформация e_0 исчезнет, накопленная же за время t_* деформация последействия не исчезнет. «На первый взгляд, – замечает Работнов, – может показаться, что e' – пластическая деформация, но это не так. Разгруженный образец будет сокращаться со временем, остаточная деформация будет уменьшаться, стремясь к нулю» [Работнов, 1979. С. 403].

Термин «наследственная упругость» «связан с тем, что поведение материалов определяется не только тем воздействием, которое образец испытывает в данный момент, но также историей тех воздействий, которым материал подвергался ранее, в течение всей истории своего существования».

Определение «вязко-упругий» связано с механической моделью, которая качественно описывает поведение материалов со свойством упругого последействия. Модель близка к модели Максвелла, в которой последовательно соединены упругий и вязкий элементы. В ней лишь вместо вязкого элемента включен элемент, в котором параллельно соединены вязкий и упругий элементы, что и обеспечивает математический аналог упругого последействия. Недостаток модели в том, что в ней исключена из рассмотрения физика явления. Модель удостоверяет способность тел накапливать и сохранять упругие деформации, но не входит в то, как и почему это происходит. Отчасти по этой причине мы и ввели понятие фиксированных упругих деформаций. Оно позволяет ответить на эти вопросы или, по меньшей мере, физически осмысленно их поставить.

Подчеркнем один важный момент.

Восстановление формы упруго-вязкого тела осуществляется в процессе высвобождения упругой энергии, заблаговременно запасенной телом, т.е. оно является процессом релаксационным, хотя в рамках представлений об упруго-вязком теле это и не подчеркивается. Поскольку упругая энергия телом накоплена, процесс дальнейшего восстановления исходной формы тела является самоподдерживающимся, самопроизвольным.

Представление об упругих фиксированных деформациях позволяет более четко представить физическую картину «запаздывающей упругости» в нескольких отношениях.

Во-первых, в принятой системе представлений запаздывающая упругость рассматривается как эффект, проявляющийся при действии на тело внешней силы и полностью ею определяемый. Это исключает из рассмотрения важнейший случай, когда латентная энергия системы вообще не зависит от действия внешних сил, когда фиксированные деформации возникают за счет самых разных, в том числе и немеханических процессов, которые протекают непосредственно в теле при изменении его термодинамического состояния. Это очень существенно.

Во-вторых, упругие деформации, остающиеся в теле после снятия внешней нагрузки, которая обеспечила их появление, по характеру воздействия на субстрат не адекватны тем напряжениям, которые в обычных упругих телах возникают как функция сопротивления приложенной внешней нагрузке. По существу это латентные напряжения, обусловленные фиксированными упругими деформациями, а напряженно-деформированное состояние, обусловленное упругими фиксированными деформациями, качественно отличается от напряженно-деформированного состояния, определяемого действием внешних сил.

Об этом несколько подробнее.

Фиксированные упругие деформации образуют в матрице содержащего их материала множественные элементарные дискретные образования – сингулярности, каждая из которых представляет собой дискретный элементарный энергоноситель, своего рода квант энергии. Напряжения, создаваемые очагами фиксированных деформаций, представляют собой элементарные дискретные системы напряжений противоположного знака. В интегральном выражении они создают в материале напряженное состояние, которое по его физической сущности было бы правильнее называть напряженностью среды по аналогии с представлениями о напряженности электростатического поля, создаваемого автономными электрическими зарядами.

Заметим, что хотя термин «упругое последействие» иногда используется исследователями для объяснения некоторых проявлений сейсмичности, главным образом таких, как афтершоки сильных сейсмических событий, явление запаздывающей упругости в механике обычно рассматривается как второстепенное и главным образом по отношению к средам, которые характеризуются небольшими временами релаксации, например к полимерам. Состояние же энергонасыщенности, определяемое фиксированными упругими деформациями, проявляется в механическом поведении геологической среды как фактор первостепенной важности.

3-4.2. Самоподдерживающееся хрупкое разрушение

В хрупких телах процесс «упругого последействия» проявляется уже не как чисто упругий, как, например, в полимерах, а осложняется их *структурной дезинтеграцией*. В механике деформируемого твердого тела это явление отмечено как *самоподдерживающееся хрупкое разрушение*. Дезинтеграция выражается массовым образованием трещин хрупкого отрыва, которое сопровождается интенсивным излучением упругих импульсов. При этом процесс разгрузки может протекать весьма динамично, лавинообразно, принимая характер взрыва. В этом случае размеры тела не восстанавливаются до своей исходной ненапряженной нормы, а, наоборот, тела разрыхляются, *разуплотняются*, вследствие чего их объем при той же исходной массе возрастает, их физико-механические характеристики изменяются, а их способность связывать в себе упругую энергию повторно в новом цикле «нагрузка–разгрузка» ухудшается. Этому явлению мы уделим особое внимание.

В исходе представление о самоподдерживающемся разрушении введено в механику разрушения в работе [Галин и др., 1966]. Приведем выдержки из этой работы.

«Всякое тело, вначале находящееся в однородном напряженном состоянии, а затем внезапно очутившееся в условиях, когда его поверхность становится свободной от нагрузок, подвергается самопроизвольному разрушению, если потенциальная упругая энергия, приходящаяся на единицу объема тела, превосходит некоторую критическую величину, являющуюся константой материала (при одинаковой технологии, одинаковой температуре и прочих равных условиях) ... Основным фактором, определяющим способность хрупкого тела к самопроизвольному разрушению, является запас упругой энергии в неразрушенном теле.

Наибольший запас энергии (практически неограниченный) можно создать при всестороннем сжатии» (с. 1034).

Таким образом, по факту, внезапная разгрузка массива среды, находившегося до начала разгрузки в равновесном состоянии, влечет за собой хрупкое разрушение субстрата. Однако сам процесс разрушения осуществляется уже не за счет действия внешних сил, а за счет того запаса энергии, который они в теле заблаговременно создали.

С одной стороны, тело обладает свойствами наследственной упругости, но, с другой, восстановление исходного объема тела не является чисто упругим. Оно сопровождается вторичными неупругими изменениями этого объема – структурной дезинтеграцией тела в процессе его разгрузки.

Энергетическая разгрузка тела осуществляется в режиме релаксации системы. В этом смысле самоподдерживающееся, или самопроизвольное, разрушение по его физическому смыслу является *релаксационным*.

В русле этой логики мы приходим к тому очевидному, но чужеродному канонам механики сплошной среды заключению, что процесс релаксации в хрупком теле выражается разрушением, структурной дезинтеграцией этого тела. Причем в случае, если тело располагает должным запасом энергии, т.е. если оно является энергонасыщенным, этот процесс может принять взрывообразное развитие.

В сейсмологии явление неупругого увеличения объема под действием приложенных напряжений было определено как *дилатансия*. Эксперименты позволили связать его с образованием множества малых трещин. Как было установлено, разрушающему напряжению соответствует приращение объема около 0,3%. На основе представления о дилатансии была разработана дилатансионно-диффузионная (ДД) модель очага землетрясения [Касахара, 1985].

Казалось бы, что уже существующее представление о дилатансии с его разработанной теоретической инфраструктурой можно было бы использовать вместо вводимого нами представления о хрупком последействии. Однако за этими понятиями стоят разные комплексы физических представлений. Причиной образования трещин в ДД-модели предполагается действие внешней силы, тогда как хрупкое последействие рассматривается как результат релаксации собственного энергетического потенциала твердотельной системы. Поэтому далее, во избежание возможной путаницы вследствие наложения разных физических смыслов, привлекать понятие «дилатансия» мы не будем.

Во избежание все той же путаницы заметим, что существует еще один термин, близкий по звучанию термину «дилатансия» – «дилатация». Под дилатацией подразумевают расширение (увеличение в объеме) пород, вызванное давлением флюида, превышающем литостатическое давление. При этом давление флюида уменьшается, и если оно уменьшается до величины литостатического давления, то дилатация прекращается [Гончаров и др., 2005].

3-4.3. Прочность как условие энергонасыщенности

Среди других способов сообщения энергии твердым телам гидростатическое сжатие занимает «привилегированное» положение. Поскольку в условиях гидростатического сжатия прочность среды бесконечна, теоретически энергоемкость среды в этом случае также бесконечна. Количество упругой энергии, сообщенной телу, в этом случае может быть сколь угодно большим, сохраняться сколь угодно долго.

Сопротивление тела гидростатической (равномерно всесторонней) нагрузке уравновешивается упругой деформацией его структурных связей. Внезапная разгрузка нарушает это равновесие. «Мгновенные» упругие деформации при этом немедленно высвобождаются, но фиксированные упругие деформации в теле сохраняются. Теперь функцию уравновешения вместо внешней нагрузки принимают на себя структурные связи тела, т.е. высвобождению фиксированных упругих деформаций теперь противостоит не внешняя нагрузка, а структурные связи, в интегральном выражении – прочность тела. Если прочность достаточно велика, то удерживаемый связями запас упругой энергии может достичь порогового значения и тело перейдет в энергонасыщенное состояние со всеми вытекающими из этого последствиями.

Заметим, что возможность перейти в энергонасыщенное состояние может осуществиться и при других видах нагружения, например при кручении, изгибе, сдвиге или растяжении. Суть не только в способе нагружения, но и в прочности материала: достаточно ли она велика, чтобы тело могло вместить запас энергии, необходимый для его последующего самоподдерживающегося разрушения.

В работе [Галин и др., 1966] описан следующий эксперимент. Образцы оконного стекла сначала окунали в ванну с плавиковой кислотой, далее промывали водой и, не высушивая, испытывали на центральный симметричный изгиб. Большинство образцов разрушалось со звуком, напоминавшим звук выстрела, причем весь испытуемый образец разлетался на мелкие осколки,

имеющие вид иголок со средней толщиной от нескольких до десятков микрон.

В данном случае энергонасыщенное состояние образца достигалось при изгибе, но основной причиной, делающей это возможным, было устранение микроскопических дефектов на поверхности стекла травлением в плавиковой кислоте, что сильно повысило его прочность. Напомним: уже Дж. Гриффитс, испытывая на растяжение стеклянные нити, показал, что реальная прочность стекла на порядки ниже его теоретической прочности, обеспечиваемой силой химических связей. Причину снижения прочности он видел в поверхностных дефектах стекла. Однако сопротивление реальных материалов девиаторным напряжениям обычно настолько мало, что перевести эти материалы в энергонасыщенное состояние неравнокомпонентным внешним нагружением практически невозможно. Как показывает приведенный пример, для этого требуются специальные технологические процедуры по повышению прочности материала. Геологические же тела обычно испещрены дефектами. Свидетельством этому может служить существование «порового пространства» в практически любой горной породе, даже находящейся в условиях высокого гидростатического сжатия.

В примере с самопроизвольным разрушении глыб породы, извлеченных из массива на поверхность, их энергетический потенциал мог быть создан в условиях высокого всестороннего сжатия и сохраняться до тех пор, пока изотропное состояние массива не было нарушено техногенным воздействием. Но создание столь значительного запаса энергии в глыбе породы прямым действием девиаторных напряжений будь то растяжение или сдвиг, обусловленный сжатием, представляется маловероятным и если в природе и реализуется, то лишь в каких-то исключительных случаях.

В природе более широко реализуются другие, более экономные способы достижения энергонасыщенного состояния. Во-первых, в отличие от подавляющего большинства технических изделий, в геологической среде широчайше распространены двухслойные системы, энергоснабжение элементов которых осуществляется независимо. Во-вторых, энергонасыщенное состояние среды может быть достигнуто даже при отсутствии внешних механических нагрузок за счет тех энергетических преобразований, которые протекают непосредственно в самой среде. В этом случае среда насыщается автономными источниками энергии в форме потенциальной энергии фиксированных упругих деформаций, т.е. в форме латентной энергии.

Рассмотрим основания для такого суждения.

В случае последовательного энергоснабжения элементов тела, например при одноосном растяжении образца на испытательной машине, прочность образца в целом определяется прочностью в его самом ослабленном сечении подобно тому, как обычная стальная цепь не может быть прочнее своего слабейшего звена. Положение в корне меняется при независимом энергоснабжении элементов тела. При этом, несмотря на то что ослабленные участки тела могут начать разрушаться при незначительных нагрузках, в прочных участках той же системы запас энергии локально может достигать плотности, которая лимитируется их теоретической прочностью. И хотя система содержит ослабленные элементы, в среднем содержание энергии в ней в условиях независимого энергоснабжения элементов – в системах с автономным энергоснабжением, в первую очередь, может достигать значений, недостижимых в системах из того же материала, но при последовательном энергоснабжении. Если содержание энергии в системах с зависимым энергоснабжением определяется прочностью их слабейших элементов, то в телах с независимым энергоснабжением оно определяется энергетической емкостью элементов самых прочных.

В геотектонике достаточно широко используется понятие *стресса* – определенно ориентированного одностороннего давления. Проявления стресса связаны с тектоническими движениями. Под действием стресса образуются складки продольного изгиба и системы трещин. Стресс играет существенную роль в и стирании, измельчении, раздавливании фрагментов горной породы, условия стресса способствуют метаморфизму пород [Геологический..., 1978].

Существует тенденция рассматривать как проявления стресса и сейсмичность. Следует, однако, заметить, что условия стресса не могут обеспечить породам запас упругой энергии, достаточный для развития в них самоподдерживающегося разрушения. Если природная сейсмичность – следствие разрядки собственного энергетического потенциала среды, то этот потенциал прямым действием внешних сил создать в геологической среде вряд ли возможно. Вероятнее, что он имеет какую-то совсем другую природу. По нашему предположению, основная роль в переходе среды в энергонасыщенное состояние, обеспечивающее возможность сейсмического процесса, принадлежит латентной энергии.

3-4.4. Акустическая эмиссия разгруженных образцов

Мы осуществили серию опытов, в которых исследовали акустическую эмиссию разгруженных образцов горных пород. Опыты состояли в следующем.

Образцы горных пород и искусственных материалов при их нагружении излучают импульсы акустической эмиссии (АЭ). Этот эффект хорошо известен и воспроизводился во множестве экспериментальных работ, преследующих цели различных технических приложений (степень изношенности зданий, поврежденность газовых магистралей, затвердевание бетона и т.д.). Он также применялся и для моделирования сейсмического режима [Виноградов, 1989; Стрижков и др., 1989]. В таких случаях АЭ рассматривалась как отклик нагруженных образцов на действие внешней нагрузки. Особенность наших опытов была лишь в том, что мы регистрировали импульсы АЭ не в нагруженных образцах, а в разгруженных.

То, что твердые тела способны запасать упругую энергию под действием внешних сил и затем сохранять ее в форме собственного энергетического потенциала, известно как явление наследственной упругости в упруго-вязких телах. Об этом явлении говорилось ранее (1-3). Однако в опытах по упругому последействию измерялись деформации релаксирующей системы. Нам же важно было выяснить, сопровождается явление последействия в горной породе излучением упругих импульсов, свидетельствующих о дискретном характере процесса релаксации, или же оно протекает «бесшумно», в виде ползучести без разрывов сплошности. Постановка выполненных экспериментальных исследований и полученные результаты освещены в работе [Пономарев и др., 1991].

Программа экспериментальных исследований сводилась к одноосному сжатию призматических образцов гранита ($50 \times 50 \times 100$ мм), выдержке их под нагрузкой в течение нескольких минут, последующей разгрузке и регистрации импульсов акустической эмиссии в образце, уже свободном от нагрузки. Регистрация импульсов велась в течение от одного до нескольких часов. Технические подробности постановки опытов отражены в упомянутой выше работе.

На образцах одного и того же типа было проведено несколько серий экспериментов. Во всех опытах после разгрузки образцов наблюдалась высокая АЭ, постепенно затухающая в течение нескольких часов. Типичный пример приведен на рис. 3.2. По оси ординат отложены значения N_Σ, соответствующие числу импульсов

Рис. 3.2. Изменение интенсивности акустической эмиссии разгруженных образцов гранита в зависимости от времени [Пономарев и др., 1991]

за 300 с, по оси абсцисс – время. График 1 получен по данным эмиссии разгруженного образца после его предварительного нагружения усилием 5 т. Выдержка под нагрузкой составляла 10 мин. Очень интенсивная АЭ, наблюдаемая непосредственно после разгрузки, примерно в течение четверти часа быстро снижается и затем, флуктуируя во времени, постепенно затухает в течение нескольких часов (приведенные графики соответствуют первому часу после начала разгрузки). При повторном нагружении того же образца на одну и ту же величину интенсивность эмиссии резко снижается (эффект Кайзера). Эту особенность иллюстрирует график 2. Вместе с тем при смене осей нагружения эффект Кайзера исчезает. График 3 соответствует случаю, когда тот же образец нагружался не вдоль его продольной оси, а нагрузка прилагалась к его боковым граням (образец был расположен между пуансонами пресса горизонтально). Из сравнения кривых 1 и 2 видно, что средняя интенсивность эмиссии после смены осей нагружения даже несколько повысилась.

В одной из серий проводившихся опытов призматический стержень гранита был разделен на три образца, одинаковых по размерам. Первый из них нагружался усилием 5, второй 10 и третий 15 т. Результаты представлены на рис. 3.3, соответственно, кумулятивными кривыми 1; 2; 3. При построении кривых из суммы импульсов эмиссии исключались данные за первые 600 с после начала разгрузки, как имеющие при очень больших значениях большие разбросы. Приведенные данные показывают, что при

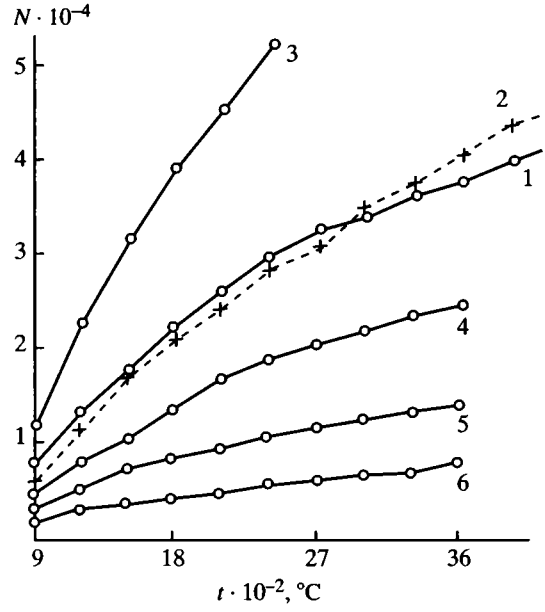


Рис. 3.3. Кумулятивные графики акустической эмиссии в разгруженных образцах гранита [Пономарев и др., 1991]

нагрузке 15 т, близкой к ее разрушающим значениям (образцы начинали частично разрушаться при нагрузке около 18 т), интенсивность эмиссии существенно выше, чем при нагрузке в 5 и 10 т.

В графиках 1 и 2 обращает на себя внимание то, что кумуляты, соответствующие эмиссии после снятия нагрузки 5 и 10 т, практически не различаются. То же явление отмечено при «ступенчатом» нагружении образцов гранита, когда образцы нагружались дважды: первый раз усилием 5 т (при выдержке под нагрузкой 10 мин) и повторно, после измерения эмиссии в течение нескольких часов, усилием 10 т (с той же выдержкой). Кумуляты, полученные в таких условиях, также практически не отличаются ни один от другого, ни от кумулятов, представленных на рис. 3.3 кривыми 1 и 2. Другими словами, интенсивность эмиссии при разгрузке имеет высокую стабильность в довольно большом диапазоне предваряющих нагрузок (5–10 т).

Кривые 4; 5; 6 (см. рис. 3.3) отражают результаты еще одного опыта, в котором выяснялось влияние выдержки образца под нагрузкой на уровень эмиссии при его последующей разгрузке.

Образец нагружался одной и той же нагрузкой 5 т три раза, но выдержки под нагрузкой во времени были разными: при первом нагружении 60 с (4), при втором 180 с (5) и при третьем 600 с (6). Приведенные кумуляты показывают, что полнота проявления эффекта Кайзера зависит от длительности выдержки образца под нагрузкой. Вместе с тем уже при первом, относительно коротком, нагружении структурные «емкости» образца, обеспечивающие поглощение им упругой энергии, в существенной мере заполняются.

Главный результат эксперимента состоит в наглядной иллюстрации того, что горная порода способна связывать в себе некоторое количество упругой энергии, сообщаемой ей внешним нагружением, и затем после устранения внешнего воздействия длительно поддерживать сейсмический процесс (в данном случае процесс излучения АЭ) уже за счет собственных энергетических ресурсов. Приведенные опыты показывают, что, помимо хорошо известного явления принудительной эмиссии, возбуждаемой прямым действием внешней нагрузки, возможно еще практически не изученное явление «самопроизвольной», спонтанной сейсмической эмиссии, возбуждаемой аккумулированной упругой энергией. Опыты также свидетельствуют в пользу того, что вещество, излучая импульсы, по всей видимости, испытывает необратимые структурные изменения, вследствие чего оно теряет способность связывать упругую энергию, что и находит свое выражение в существовании эффекта Кайзера.

Сущность эффекта Кайзера может быть проиллюстрирована характером разрушения на двухслойных моделях с эластичным основанием. Подробно особенности этого вида разрушения будут рассмотрены в главе 4. Пока же отметим, что при одноосном растяжении модели в блоке материала возникают трещины, субнормальные к оси растяжения. Если по окончании процесса образования трещин снять растяжение, а затем повторно растянуть материал на ту же величину, то новые трещины в материале не возникнут. Для того, чтобы процесс фрагментации продолжить, надо приложить растягивающее усилие, которое бы превышало величину предыдущего растяжения, в чем, собственно, сущность эффекта Кайзера и состоит. Перемена направления растяжения на 90° при той же его величине ведет к образованию новой системы субпараллельных трещин, ортогонально налагающейся на систему трещин, оформившуюся при прежнем направлении растяжения. Этим и может быть объяснено наблюдавшееся отсутствие эффекта Кайзера при смене осей нагружения.

3-4.5. Хрупкое последействие

Эффект расширения при пластическом деформировании, который считается важным для современной теории пластичности, открыл И. Баушингер в 1879 г. Это открытие теоретики и экспериментаторы игнорировали в течение почти целого столетия. Данный эффект заново открыл У.Ф. Хартман лишь в 1967 г. [Белл, 1984]. Причина эффекта, по всей видимости, обусловлена дислокационным разуплотнением вещества – известно, например, что в стали при ее пластическом деформировании плотность дислокаций возрастает на несколько порядков, – а также образованием микротрещин хрупкого отрыва. В явлении самоподдерживающегося хрупкого разрушения причиной возрастания объема разгруженного вещества является его структурная дезинтеграция.

Представление о хрупком самопроизвольном разрушении позволяет взглянуть и на сущность явления последействия под новым углом зрения.

Прежде всего, иллюстрируя изменение размеров тела в цикле «нагрузка–разгрузка», ход деформаций изображают в виде симметричных зеркальных кривых (см., например, [Работнов, 1979, с. 40]). В наших опытах длительность нагрузки не превышала 10 мин, разгрузка же, заметная по возбужденной ею эмиссии, длилась примерно на порядок дольше. Таким образом, ветви цикла «нагрузка–разгрузка» в наших опытах были резко несимметричными.

Если полагать, что в накоплении и высвобождении деформаций в геологической среде и геологических масштабах времени соблюдается подобие, то это означает, что упругая энергия, запасаемая средой в относительно коротких циклах роста сжимающих тектонических напряжений, впоследствии может обеспечить сейсмический процесс, длящийся намного дольше. Внешним образом это вступает в противоречие с обычным представлением, что упругие деформации, создающие запас энергии, необходимый для возникновения землетрясения, накапливаются долго, а их высвобождение происходит быстро. Противоречие это кроется в том, что в последнем случае рассматривается единичное землетрясение, а в первом речь идет о сейсмическом режиме множества землетрясений в целом. Фаза сейсмической активности каждого данного участка земной коры – это сравнительно кратковременный эпизод в ее общей геологической истории, как относительно коротки периоды тектонической активизации, перемежа-

емые продолжительными периодами тектонического покоя. Как мы покажем далее, это же касается и наведенной сейсмичности. Зарождаясь в какой-то части энергонасыщенного массива, максимальная активность сейсмического процесса подобно волновому фронту распространяется центробежно от первичного очага ее возбуждения. При этом в тыловых частях этого фронта сейсмичность угасает. Принимая во внимание такого рода факты, можно прийти к мысли, что и сейсмичность, и повышенная тектоническая активность являются заключительными этапами весьма длительной подготовки потенциальной возможности этих проявлений.

Далее. В системе принятых обозначений для явления растянутого во времени процесса высвобождения обратимых деформаций используется термин «последействие». С точки зрения физики последействие – типичный релаксационный процесс, который можно было бы назвать и релаксацией фиксированных деформаций с типичным для релаксационных процессов нелинейным, примерно экспоненциальным затуханием интенсивности этого процесса. Но в опытах с техническими материалами время последействия, т.е. время перехода системы к равновесию в процессе последействия, совершенно не соответствует тем временам релаксации, которые известны под этим названием и формально. В последействии, вступившем в фазу самопроизвольного разрушения, мы имеем дело со своего рода «быстрой» релаксацией, тогда как переход из упругого состояния в состояние вязкого течения – «медленная» релаксация – длится гораздо дольше. В нашем примере: времена релаксации для гранита имеют порядок 10 тыс. лет, но время последействия имеет порядок 1 ч. Совершенно очевидно, что хотя оба типа процессов – «медленный» и «быстрый» – по их общей физической сущности могут быть квалифицированы как процессы релаксации, механизм релаксации в этих случаях резко различен.

Поставленные нами опыты указывают и на возможную причину этого различия: «медленная» релаксация осуществляется посредством перехода материала в состояние вязкого течения, «быстрая» релаксация – в процессе хрупкого разрушения, в процессе структурной дезинтеграции материала, на что, собственно, и указывает интенсивная эмиссия разгруженных образцов гранита. Именно в последнем смысле понимается термин «релаксация», употребляемый иногда геологами, а чаще горняками. Так, в работе [Kieslinger, 1960] эффект расщепления гранита на плиты в процессе добычи гранита в карьерах определяется как ре-

зультат релаксации. Горняки под временем релаксации часто имеют в виду время стабилизации горного давления на крепь выработки, обычно имеющее порядок от нескольких десятков дней до года.

Таким образом, термин «время задержки», который мы употребляли выше и который соответствует инкубационному периоду, по существу определяет масштаб временны́х рамок, в которых и реализуется процесс «быстрой» релаксации. С точки зрения практики он возникает почти мгновенно вслед за разгрузкой и выражается в самопроизвольном хрупком разрушении. В реалиях геологической натуры его временны́е параметры практически полностью определяются скоростью разгрузки, которая, сама по себе, может протекать очень медленно, например разгрузка положительных форм рельефа за счет их эрозионного среза. При горных работах она соответствует скорости и интенсивности их ведения.

С точки зрения физической сущности процесс структурной дезинтеграции при разгрузке является релаксационным. Однако поскольку в понимание механизма релаксации традиционно вкладывается другой смысл, во избежание путаницы понятий мы и предпочли явление дезинтеграции энергонасыщенных твердых тел в процессе их разгрузки обозначить как «хрупкое последействие».

И еще один аспект опытов с эмиссией.

В опытах по изучению последействия различают два вида деформаций. Во-первых, мгновенную деформацию, которая возникает (исчезает) практически мгновенно при нагрузке (разгрузке). Во-вторых, деформацию, которая со временем растет при постоянной нагрузке и убывает в разгруженном теле. Однако, как об этом уже достаточно говорилось, латентная энергия может запасаться в реальных твердых телах не за счет непосредственного действия внешней силы, а за счет тех энергетических преобразований, которые протекают в субстрате этих тел. Примером может служить двухслойная система с жестким основанием, напряжения в которой могут достигать разрушающих значений за счет изменений температуры системы. К таким системам существующие представления об упругом последействии в их буквальном смысле вообще неприменимы. Таким образом, представление о хрупком последействии включает и смысл структурной дезинтеграции хрупких материалов за счет высвобождения латентной энергии.

3-4.6. Разрушение «принудительное» и «самопроизвольное»

В широком физическом смысле под релаксацией понимают процесс убыли энергии, запасенной системой сверх того количества, которым она может располагать в равновесном состоянии.

Говоря о «самопроизвольном» характере процессов релаксации, мы и имеем в виду то, что процесс перехода к равновесию достигается за счет высвобождения энергии, заблаговременно запасенной системой, за счет ее собственного энергетического потенциала, при ее отключении от внешних источников энергоснабжения.

В этой связи будем различать два вида разрушения твердотельных систем – *принудительное* и *самопроизвольное,* или, тождественно по смыслу, их *энергетически пассивное* и *энергетически активное* механическое поведение.

Подчеркнем, что рассмотренный выше случай самоподдерживающегося разрушения по существу происходит за счет релаксации упругой энергии, запас которой был создан ее предыдущим нагружением, т.е. его характер определяется предшествующей историей нагружения.

В геомеханике традиционно рассматривается пассивное деформирование твердотельных систем под действием сил, приложенных извне к этим системам. Между тем существуют основания полагать, что процессы релаксации, протекающие в объемах геологической среды за счет их собственных энергетических ресурсов, имеют широчайшее распространение, а в случае динамических явлений, сопровождающихся излучением упругих волн, и определяющее значение. В связи с особой важностью и недостаточной изученностью таких процессов, в настоящей работе основное внимание им и уделено.

В науках о Земле сейсмический процесс рассматривается как явление, отражающее потерю устойчивости геологической среды под действием внешних сил, при постоянном подтоке энергии. В главе 6 мы приведем данные, которые свидетельствуют в пользу того, что в действительности сейсмичность – это релаксационный процесс, который протекает за счет уже ранее накопленной энергии, без ее значимого поступления в систему, вступившую в стадию сейсмической активизации.

Это положение имеет принципиальное значение, поскольку механическое поведение систем при прямом воздействии внешних сил резко отличается от поведения систем релаксирующих.

Подчеркнем: процесс релаксации, сопровождающийся хрупкой дезинтеграцией, возможен только в сильно неравновесных системах, располагающих избытком энергии, заблаговременно накопленной системой ранее, и осуществляется за счет этой энергии. В квазиравновесных системах явление самопроизвольного разрушения невозможно.

Приводившийся выше критерий самопроизвольного развития трещин, введенный Дж. Гриффитсом, по существу относится к системам, у которых запас энергии достаточно велик или подвод энергии в область разрушения очень интенсивен. По существу в обоих случаях речь в неявной форме идет о разрушении энергонасыщенных тел, в которых запас энергии был создан до начала разрушения или же необходимый избыток энергии подводится в область разрушения «мгновенно» – со скоростью, достаточной для компенсации ее расхода.

3-4.7. Упругий потенциал

В механике деформируемого твердого тела потенциальной энергии упругой деформации, накопленной в теле, соответствует упругий потенциал U [Работнов, 1979]. Уточним, как согласуются используемые нами понятия о «собственном энергетическом потенциале» и «латентной энергии» с этим представлением.

Разделение упругих деформаций на «мгновенные» и фиксированные предполагает, что и упругий потенциал в общем случае представляет собой сумму двух слагаемых: упругого потенциала, обеспечиваемого «мгновенными» упругими деформациями, и собственного энергетического потенциала, представленного латентной энергией и обеспечиваемого фиксированными упругими деформациями.

Мыслимы крайние случаи, когда одна из указанных составляющих упругого потенциала равна нулю. Случай, когда равным нулю полагается собственный энергетический потенциал, рассматривается в рамках классических теорий упругости и пластичности. В настоящей работе рассматривается противоположный случай, когда упругий потенциал тела полагается равным его собственному энергетическому потенциалу.

В общем случае упругий потенциал в разных соотношениях содержит обе составляющие. Этому случаю, видимо, чаще всего и соответствует реальное механическое поведение твердых тел. Тем не менее в реальном поведении твердых тел в разных случа-

ях нередко обнаруживается преобладающее влияние того или иного сценария, обусловленного преобладанием той или иной составляющей упругого потенциала данного тела.

Возможна и другая трактовка упругого потенциала.

Различают два вида упругих деформаций: упругого изменения объема и формы. Соответственно, упругий потенциал тела U_Σ в общем случае представляет собой сумму потенциалов U_v и U_f, которые обеспечивают упругие деформации объема и формы, т.е. $U_\Sigma = U_v + U_f$.

Случай, когда $U_\Sigma = U_v$ и $U_f = 0$, соответствует гидростатическому равновесию. В этом случае упругий потенциал может сохраняться в теле без убыли бесконечно долго. Возможность его релаксации достигается только при нарушении гидростатического равновесия. При этом осуществляется переход $U_v \rightarrow U_f$ с дальнейшей релаксацией упругого потенциала, перешедшего в форму U_f. Условия для реализации перехода $U_v \rightarrow U_f$, в частности, создаются при разгрузке массивов горных пород. Такие случаи будут детально рассмотрены ниже.

РАЗРУШЕНИЕ ПО СЦЕНАРИЮ ФРАГМЕНТАЦИИ

Существует много работ, в которых рассмотрены вопросы фрагментации материалов: расчленения их на отдельные части. Они были выполнены главным образом в целях решения различных технических задач, например при взрыве или механическом дроблении. Рассматривалось явление фрагментации и в отношении геологической среды, в особенности его выраженность в различных статистиках. Были отдельные работы, в которых делались попытки уяснить и механизм фрагментации, реализующийся в природных условиях. Так, В.В. Белоусов [1986] рассматривал образование отдельностей в крыльях складок за счет рассредоточенного приложения внешних сил. Вместе с тем в основных общепринятых теориях разрушения механизм фрагментации, обусловленный релаксацией собственного энергетического потенциала, не рассматривается. Разработка этого вопроса, в частности, отсутствует в рамках кинетической теории прочности, теории неустойчивого лавинного трещинообразования, теории множественного разрушения Г.И. Баренблатта и др. В настоящей главе приведены материалы, в которых сделана попытка восполнить этот пробел.

В изучении проблемы фрагментации энергонасыщенной среды автор опирался на работы ряда предшественников: Е.М. Морозова, Я.Б. Фридмана, Б.Н. Достовалова, А.С. Зимова. Экспериментально сценарий фрагментации, по которому происходит разрушение энергонасыщенных материалов, изучался в опытах по разрушению различных модификаций двухслойных моделей, разработанных А.Н. Ромашовым и проведенных под его руководством.

Основной вид разрушения энергонасыщенных сред – образование трещин хрупкого отрыва.

В зависимости от способа энергоснабжения разрушаемой твердотельной системы, механизма накопления латентных напряжений и масштаба структурных связей, обеспечивающих их появление, разрушение может быть выражено: 1) образованием единственной «магистральной» трещины, расчленяющей тело на

две отдельности (например, самопроизвольное взрывное разрушение стальных балок на два продольных фрагмента); 2) множественным растрескиванием, при котором тело, теряя свою прочность, остается нерасчлененным (например, коррозионное растрескивание или растрескивание сварных швов); 3) образованием полигональных систем трещин отдельности, расчленяющих объем материала на фрагменты (в геологической среде – от крупных блоков земной коры до мелкодисперсной пылевидной фракции).

В дальнейшем нас будет интересовать именно последний случай, поскольку он имеет в геологической натуре широчайшее распространение. Сценарий разрушения, следующий этой схеме, мы в дальнейшем будем называть *сценарием фрагментации*.

Как будет показано в этой главе, разрушение, следующее сценарию фрагментации, резко, радикальным образом отличается от разрушения тел с относительно низким содержанием латентной энергии до впечатления, что природа задалась целью создать два сценария разрушения, которые ни в чем друг на друга не были бы похожи.

4-1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Описать разрушение, следующее сценарию фрагментации, используя традиционные методы, восходящие к механике сплошной среды, невозможно в принципе. Эти методы исходят из некоторых начальных условий, которые предопределяют жесткий, детерминированный характер получаемых решений. Что касается полигональных сеток трещин, то однозначно предсказать траектории и положение каждой из трещин всей их совокупности невозможно. Во всяком случае это невозможно по отношению к реальным материалам, неизбежно содержащим неоднородности, стохастически в них рассеянные.

Описание сценария разрушения, следующего схеме фрагментации, требует применения подходов, основанных на принципиально иных основаниях. В качестве одного из таких подходов может рассматриваться энергетический подход, одной из форм которого является уже описанный выше вариационный подход. Основные ограничения в его применении к анализу пространственной картины систем трещин хрупкого отрыва в том, что этот подход не учитывает кинетику процесса разрушения (он рассматривается как стационарный) и не учитывает изменения напряженного состояния при появлении и развитии трещины.

Указанные недочеты могут быть устранены в рамках представления о формировании во времени упорядоченных систем трещин в поле порогово-потенциальной функции [Зимов, 1993]. Этот аналитический аппарат был с успехом применен для описания систем трещин в вечной мерзлоте и не содержит в себе каких-либо принципиальных ограничений для его применения к описанию систем трещин отдельности, развитых в геологической среде. В дальнейшем мы используем его как базовый.

4-1.1. Потенциальные функции

Под потенциалом понимается ресурс, за счет которого может быть выполнено действие. Согласно работе [Зимов, 1993], действие понимается как образование некоей структуры. В обобщенный смысл потенциала входят ресурсы самой разной природы. Это может быть упругая энергия, факторы, за счет которых развиваются биологические системы, экономические ресурсы или потребность в транспортных магистралях. В зависимости от природы потенциала возникающие структуры отличаются качественным своеобразием. Однако при всем том им присущи и некоторые общие черты, которые зависят единственно от вида и соотношения потенциальной и пороговой функций.

В качестве иллюстрации сравним рисунки 4.1а и 4.1б [Зимов, 1993]: на первом показана схема железных дорог вокруг Москвы, на втором – система трещин на бумаге, покрытой тонким слоем стеарина. Система трещин возникает при надавливании на бумагу шарообразным предметом. Сходство обоих структурных

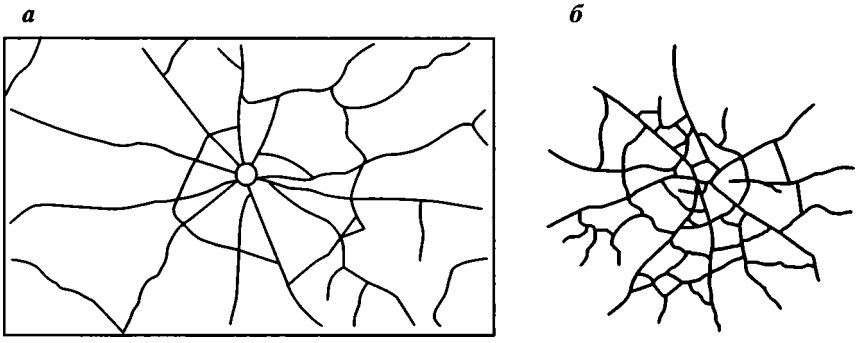


Рис. 4.1. Сходство структурных рисунков, образующихся при разгрузке формально сходных потенциальных функций, характеризующих объекты с разной природой [Зимов, 1993]

рисунков очевидно. Его причина – формальное сходство функций, описывающих реализацию ресурса развития, хотя, конечно, сами ресурсы развития в том и другом случае не имеют между собой ничего общего.

Под потенциальной функцией понимается меняющаяся во времени пространственная функция, характеризующая некоторый потенциал пространства – способность совершать или побуждать действие $E_x = f(x, T)$.

Говоря о «потенциальном поле», мы будем подразумевать, если нет специальных оговорок, поле плотности энергии, обусловленной наличием фиксированных упругих деформаций. Это значит, что каждая единица площади или элемент объема субстрата системы располагают автономным энергетическим ресурсом. Но, вообще говоря, принципиального значения это не имеет, поскольку в рамках принятого формального подхода исследуются общие особенности структурообразования, которые по отношению к конкретной природе ресурса инвариантны.

Это удобно в том отношении, что в анализе структур разрушения, возбуждающих сейсмичность, мы не привязаны жестко к определенной гипотезе о природе сил, за счет которых сейсмичность возбуждается, – вопросу, вообще говоря, дискуссионному. С другой стороны, выясняя рисунок структур разрушения, образующийся в результате сейсмического процесса, мы, исходя из этого, можем более обоснованно судить и о возможной природе ресурса, ответственного за появление этих структур.

Максимальные значения потенциальной функции не могут превышать некоторые пороговые значения, свойственные каждой точке рассматриваемого пространства, т.е. свойства пространства характеризуются некоторой пороговой функцией $P_x = f(x, T)$. В нашем случае – это поле энергетической прочности среды. Под энергетической прочностью понимается предельная плотность упругой энергии (e), которую субстрат может накопить в единице своего объема без разрушения.

Потенциальную и пороговую функции можно объединить в одну *порогово-потенциальную функцию* в виде $f(E_x, P_x) = E_x - P_x$. Эта функция не имеет положительных значений. По мере роста значений потенциальной функции или снижения значений пороговой функции значения суммарной функции возрастают – кривая (E_x, P_x) приближается к нулю. Первый структурный элемент появится в момент, когда эта функция примет нулевое значение.

Итак, пока $P_x > E_x$ структурные элементы не образуются. Но если со временем значения P_x в какой-либо точке (области) пространства достигнут уровня E_x, то в этой точке (области) воз-

никает структурный элемент – в нашем случае трещина. Появление структурного элемента влечет за собой уменьшение потенциала в этой точке и ее близкой окрестности – локальную «разгрузку» потенциальной функции, выражающуюся в локальном высвобождении упругой энергии.

Локальное изменение поля напряжений в зоне возникновения трещины схематически показано на рис. 4.2 [Зимов, 1993]. Из рисунка видно, что разгруженная область (заштриховано),

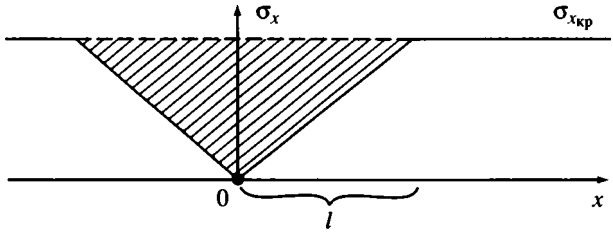


Рис. 4.2. Локальное изменение напряжений в зоне влияния трещины [Зимов, 1993]

обусловленная возникновением трещины, представляет собой сравнительно узкую полосу вдоль берегов трещины. На образовавшихся свободных поверхностях значения потенциальной функции равны нулю. По мере удаления в крылья трещины эти значения симметрично возрастают, достигая исходного уровня на некотором удалении l от оси трещины. Величина $2l$ – полная ширина зоны энергетической разгрузки.

4-1.2. Образование полигональных решеток

Представления о разгрузке потенциальных функций первоначально были применены к объектам геологии в попытках описать образование систем морозобойных трещин. Такого рода системы могут рассматриваться в качестве природных моделей полигональных систем трещин земной коры. Изучение механизма их образования оказалось существенно продвинутым – возможно, в какой-то мере по той причине, что рисунки, образованные этими трещинами, можно наблюдать непосредственно на земной поверхности, но главным образом потому, что очевидна причина появления систем трещин. Их невозможно объяснять, например, весом толщ налегающих пород, как это делается в отношении ореолов трещин в окрестности горных выработок, хотя эти трещины и их системные сообщества обладают совершенно явно выраженными признаками трещин разгрузки.

Представления, выработанные в процессе изучения механизма образования морозобойных решеток, – прежде всего представление о том, что они образуются за счет разгрузки собственного энергетического потенциала субстрата, – можно рассматривать как своего рода новый теоретический плацдарм для решения широкого круга проблем структурирования геологической среды.

Начало исследованиям морозобойных решеток положили работы Б.Н. Достовалова и В.А. Кудрявцева [1967]. В последующем некоторые выводы этих исследователей были дополнены или подвергнуты критике, но основной, базовый костяк созданных ими представлений существенных изменений не претерпел. Дальнейшее развитие исследований в этой области следовало вектору, обозначенному этими исследователями. Развернутую картину современного состояния проблемы морозобойных решеток, истолкованную в контексте представления о структурообразовании, обусловленном взаимодействием потенциальной и пороговой функций, можно найти в работе [Зимов, 1993]. Далее мы изложим интересующие нас моменты в форме компиляции из этой работы.

Морозобойные трещины широко и многообразно представлены на Крайнем Севере страны. В комплексе они образуют организованные структуры типа «битой тарелки», или «пчелиных сот». «Особенно впечатляют похожие на рисовые чеки строгие решетки прямоугольных полигонов, повторяющие очертания речных излучин. У берегов больших рек они непрерывно простираются на многие сотни метров» [Зимов, 1993. С. 5].

Морозобойные структуры возникают в результате того, что верхние горизонты грунта вследствие зимнего охлаждения стремятся сократить свой объем, а следовательно, и площадь. Однако этому сокращению препятствует более глубокая «подложка», сохраняющая свое прежнее состояние. В результате в верхнем слое такой природной двухслойной системы образуются трещины. Сходным образом возникают системы трещин при обезвоживании верхнего слоя грунта в засушливую пору.

Механизм образования трещин может быть объяснен следующим образом.

«Максимальные напряжения и, соответственно, трещины возникают у поверхности, так как она охлаждается в наибольшей степени. Свободная поверхность разгружает напряжения в перпендикулярном себе направлении, поэтому ситуацию можно рассматривать как двумерную, приравняв вертикальные компоненты нулю. В этом случае, как известно, максимальное напряжение равно $T_{max} = \pm(\sigma_1 - \sigma_2)/2$, где σ_1 и σ_2 – главные нормальные напряжения (они ориентированы взаимноперпендикулярно). Макси-

мальное касательное напряжение ориентировано под углом 45° к направлениям главных нормальных напряжений.

В однородном по составу и равномерно охлаждаемом плоском массиве во всех точках на поверхности и во всех направлениях растягивающие напряжения одинаковы ($\sigma_1 = \sigma_2$), при этом, как видно из формулы, $T_{max} = 0$, т.е. деформации сдвига невозможны. При неоднородных условиях в каком-то направлении напряжения преобладают – поле напряжений анизотропно ($\sigma_1 > \sigma_2$). Но при охлаждении массива главные нормальные напряжения одинаковы по знаку и сравнимы по величине – во всех направлениях растяжение. Поэтому касательные напряжения всегда меньше растягивающих, т.е. и в этом случае деформации сдвига не возникнут, будут только разрывные нарушения...

В соответствии с механикой разрушения, развитие морозобойных трещин на поверхности и их взаимодействие должны определяться следующими закономерностями.

1. Трещина возникает при достижении напряжениями величины, равной прочности среды на разрыв.

2. При однородной прочности материала возникает она и в последующем сечет массив в направлении, перпендикулярном направлению максимальных растягивающих напряжений.

3. За счет концентрации напряжений в вершине трещины она может в дальнейшем проникать и развиваться в массиве, напряжения в котором меньше, чем прочность грунтов на разрыв.

4. При образовании трещины в окружающей ее полосе происходит разгрузка напряжений. Чем глубже трещина, тем в более широкой от нее полосе происходит их разгрузка.

5. Вблизи трещины (у ее вертикальной стенки) напряжения в направлении, перпендикулярном трещине, разгружаются полностью, а в параллельном направлении – частично. Из этого следует, что в непосредственной близости от первоначальной образование параллельной ей трещины невозможно, но возможность перпендикулярной не исключается» [Зимов, 1993. С. 6, 7].

По Б.Н. Достовалову, образование полигональной решетки в однородных грунтах подчиняется двум законам: закону параллельности и закону перпендикулярности.

4-1.3. Закон параллельности

При охлаждении с поверхности массива, как только напряжения достигают прочности грунтов на разрыв, образуется трещина и массив разбивается ею на две части. В окружении трещины происходит разгрузка напряжений. С удалением от нее их

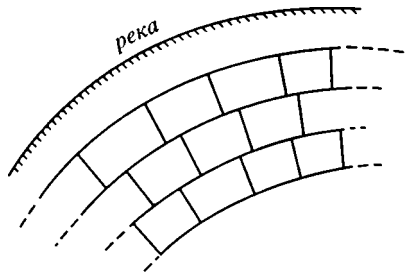


Рис. 4.3. Системы морозобойных трещин вдоль русла реки [Зимов, 1993]

величина возрастает и на каком-то расстоянии на границе зоны разгрузки они равны исходным – близким к прочности грунтов на разрыв. При однородности материала расстояния от первой трещины до границы зоны разгрузки будут одинаковы. Вследствие этого вторая трещина пойдет параллельно первой, повторяя ее конфигурацию. Далее цикл повторяется. Поверхность массива разбивается системой параллельных трещин.

Конфигурация первой трещины задает конфигурацию всей системы трещин в целом. Роль первой трещины часто выполняют уступы террас, берега рек и озер. Они, как и трещины, разгружают массив. В итоге конфигурация рисунка систем трещин повторяет конфигурацию исходных поверхностей разгрузки – уступов террас, берегов рек и озер (рис. 4.3) [Зимов, 1993].

Системы субпараллельных трещин могут быть названы *ориентированной трещиноватостью*. Такие системы широко распространены в геологической натуре. К ним могут быть отнесены системы трещин, возникающие при разгрузке за счет эрозионного среза положительных форм рельефа или при выемке котлованов. Параллельное простирание строго выдержано в системах планетарных трещин. Системы трещин, повторяющих контуры горных выработок и буровых скважин, являются универсальным структурным элементом зон дезинтегрированных пород. Эти зоны возникают в процессе ведения горных работ (см., например, [Христианович, Салганик, 1980]).

4-1.4. Закон перпендикулярности

Приведем цитату из работы [Достовалов, Кудрявцев, 1967. С. 157].

«Образовавшиеся трещины способствуют охлаждению массива. Поверхности равных температур располагаются параллельно стенкам трещин и горизонтальным поверхностям полос, а направления наибольших градиентов температуры – перпендикулярно им. Так как напряжения прямо пропорциональны градиентам, наибольшие напряжения должны развиваться в направлении

наибольших градиентов температуры и, следовательно, вторичные трещины должны образовываться перпендикулярно первичным – продольным». В результате формируется ортогональная сетка разрывных нарушений.

В работе [Зимов, 1993. С. 10] предлагаемое объяснение закона перпендикулярности трещин «мерзлотными» аргументами подвергается обоснованной критике. Однако сама эмпирическая закономерность сомнению не подвергается. Согласно С.А. Зимову, «вполне было достаточно сказать, что в полосе между двумя параллельными трещинами, зоны разгрузки которых перекрываются, в перпендикулярном им направлении происходит разгрузка напряжений, и при последующем снижении температуры новая трещина в этой полосе может пройти лишь перпендикулярно первоначальным трещинам, так что в этом направлении напряжения разгружены лишь частично».

К обсуждению обозначенного вопроса, дополненного результатами, полученными нами при одноосном растяжении двухслойных моделей, мы еще вернемся (глава 4, 4-2).

Заметим, что Б.Н. Достовалов [1965б], развив представление об объемно-градиентных напряжениях на примере формирования структур в вечной мерзлоте, обобщил его и применительно к проблеме образования полигональных систем разломов и поднятий земной коры.

4-1.5. Модель «бокового наращивания»

В работе С.А. Зимова [1993] развито представление о том, что упорядоченность структур является результатом последовательного их роста во времени. Взгляд на структуры разрушения геологической среды в их современном облике как на результат их предшествующей длительной структурной эволюции представляется нам исключительно плодотворным.

Решетки типа морозобойных обычны в нашей повседневности. Они, например, образуются на давно окрашенных поверхностях, на полотнах старых мастеров и т.д. Их можно получить в таком простейшем эксперименте: из порошка мела разводят жидкую однородную пасту, разливают ее одинаковым слоем в нескольких одинаковых плоскодонных чашках, пытаясь сохранить идентичные условия производства опытов и в других отношениях. В процессе высыхания пасты в отвердевшем слое мела возникают системы трещин самого разного рисунка. Добиться воспроизводимости одной и той же системы трещин в серии опы-

тов практически невозможно. С другой стороны, попытки математического описания систем трещин типа морозобойных решеток наталкиваются на существенные затруднения, поскольку каждый вновь появившийся элемент решетки меняет граничные условия, поля напряжений, что всякий раз требует новой формулировки задачи в целом.

«Если бы нам удалось разработать подробнейшую математическую модель или обеспечить абсолютную повторяемость опытов моделирования, исчерпывающее решение для речных решеток все равно найдено бы не было. Причина этого в том, что неверна традиционная постановка задачи, а именно – рассматривается массив с какими-то свойствами, границами и рассчитывается решетка, которая на нем возникает. Такая постановка большинству природных объектов не соответствует» [Зимов, 1993. С. 14].

По мнению цитируемого автора, означенные структуры, возникая вначале на некотором первичном локальном участке, затем постепенно наращивают исходный участок и центробежно внедряются во вмещающую среду, формируя в конечном счете рисунок, глобальный в масштабе данной системы и свойственный только ей. Стиль рисунка предопределяет конфигурация его исходной генетической матрицы – «зародыша» данной системы.

«Формирование рисунков, структур бокового наращивания – широко распространенное явление. Смещаются не только берега рек и озер, расширяются торфяные болота, смещается граница леса, смещаются границы физических и химических полей, например граница мерзлых пород, отступают берега морей, а вслед за ними тянется гидросеть – достраивается ее рисунок. Поля критических напряжений достигают величины прочности горных пород на небольшом участке, и лишь затем зона критических напряжений и, следовательно, зона деформаций расширяется. Да и сами литосферные плиты появились не сразу. Например, бесполезно рассуждать, какие из магистральных разломов на дне океана вблизи рифтовой зоны появились первые – перпендикулярные ей или параллельные. Литосферные плиты наращиваются здесь со скоростью несколько сантиметров в год, соответственно, с такой же средней скоростью достраивается и сеть трансформных разломов. А полосы между ними разбиты разломами, параллельными оси рифта» [Зимов, 1993. С. 18].

По тому же структурному стереотипу развиваются биологические структуры, наращивая клетки от точек, линий и поверхностей роста, или формируются кристаллы. «И здесь идет медленное наращивание, а если нет смещающейся границы структурообразования, то возникает аморфная структура, в ней нет

дальнего порядка ... После этих примеров напрашивается вывод, что пространственная упорядоченность возникает при пространственной и, следовательно, временной последовательности в образовании структурных элементов. Порядок в пространстве – это порядок во времени» [Зимов, 1993. С. 18].

Столь большую выдержку мы привели потому, что развиваемые нами далее представления о зонной релаксации и формировании зон разгрузки – основных структурных стереотипах, возникающих в процессе высвобождения собственного упругого потенциала геологической среды, укладываются в приведенную схему как частное в общее.

В цитируемой работе отмечены четыре механизма, обеспечивающие появление пространственно-периодических структур.

1. Наследование, повторение элементами новой структуры некоего структурного шаблона. 2. «Подгонка» элементов путем их многократного смещения в положение, равноудаленное от соседних элементов. 3. Последовательное деление пространственного отрезка и вновь образующихся частей пополам. 4. Последовательное причленение нового элемента к предыдущему через равные интервалы. Как мы увидим далее, при анализе образования структур разрушения двухслойных моделей и зон разгрузки в той или иной мере и форме проявлены все четыре механизма.

4-2. МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследованиях процесса фрагментации в условиях лабораторного моделирования можно различить две ветви. В одном случае исследуется проблема измельчения материала главным образом в производственно-технических целях внешними силовыми воздействиями, т.е. в условиях принудительного разрушения. Нас интересует другой случай, когда фрагментация материала осуществляется самопроизвольно.

Для изучения дезинтеграции энергонасыщенных тел применялись главным образом модели матричного типа. Примеры таких моделей рассматривались выше (опыты Д.Б. Бинза [Binns, 1962], Дж.Дж. Галлафера [Gallagher, 1971], Г. Райка–М. Вардара [Reik, Vardar, 1974]). С той же целью мы использовали двухслойные модели Ромашова. Источниками информации, полезной в указанном отношении, могут служить различные и многообразные случаи, почерпнутые из практики инженерного дела и материаловедения.

Действительность предоставляет в распоряжение исследователя обширнейший набор контактных (в их простейшем выраже-

нии – двухслойных) систем, разрушение которых также осуществляется по схеме фрагментации. Это сетки трещин, со временем образующиеся в пересыхающем грунте, на асфальтовых покрытиях, в штукатурке, трещины в слое масляной краски на полотнах старых мастеров и окрашенных поверхностях и т.д. Простейшие модели, на которых воспроизводятся сетки трещин этого типа, описаны в работе [Зимов, 1993].

Двухслойные системы являются простейшими и вместе с тем универсальными структурными элементами самых различных геологических образований. Это слои осадочных и метаморфированных комплексов, тектоническая расслоенность геологической среды, зоны контакта неоднородностей, от микроскопических зерен минералов, слагающих горную породу, до крупных геологических тел и таких мегаскопических образований, как литосферные блоки и плиты или оболочки Земли.

Физическая двухслойность может возникнуть в исходно однородной среде, если на одной из границ меняются термодинамические условия. С такого рода двухслойными системами часто сталкиваются в технике. Они, например, спонтанно возникают при изготовлении стекла или стального проката. Из общих соображений, нет сомнения в том, что двухслойные системы такой же физической природы могут возникать и в геологической среде.

Общей причиной появления сеток трещины во всех упомянутых случаях являются несогласованные деформации контактирующих слоев, хотя процессы, порождающие эти деформации, могут быть самыми различными. Трещины появляются всякий раз, когда сокращению площади достаточно хрупкого слоя препятствует менее податливая «подложка».

Изучение поведения двухслойных систем само по себе представляет собой экспериментальный ключ к пониманию обширнейшего класса систем, представленных в геологической натуре самым широким образом. Однако двухслойные системы – системы с параллельным энергоснабжением их элементов – обладают еще одним важным достоинством: они способны имитировать разрушение матричных энергонасыщенных систем, поскольку энергоснабжение контактных и матричных систем осуществляется по одной и той же схеме: независимого энергоснабжения. По какой частной схеме независимого энергоснабжения осуществляется разрушение – автономного или параллельного энергоснабжения – принципиального значения не имеет. В обоих случаях картины трещиноватости однотипны.

Применение двухслойных моделей как инструмента изучения разрушения энергонасыщенных матричных систем, таким образом,

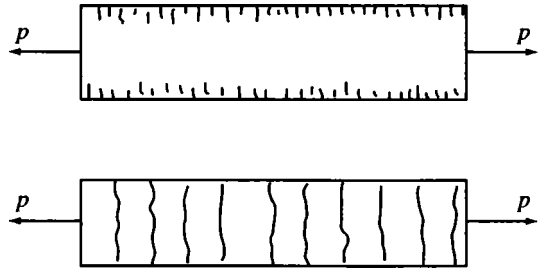


Рис. 4.4. Трещины в хрупком слое двухслойной модели (в начале и в конце опыта)

позволяет обойти технологические трудности в получении энергонасыщенного модельного материала и дает возможность гораздо более гибкого управления параметрами моделей. Закономерности, полученные на двумерных двухслойных моделях, могут быть распространены и на объемный случай, например на случай образования объемной блоковой делимости.

В предпринятых нами исследованиях использовались двухслойные модели двух типов – с эластичным и жестким основанием – с различными модификациями внутри каждого типа.

Постановка опытов по разрушению двухслойных моделей осуществлялась под общим руководством А.Н. Ромашова. Результаты анализа разрушения на двухслойных моделях с эластичным основанием освещены в работах [Кулюкин и др., 1983а, 1986, 1987; Кондратьев и др., 1985].

В общих чертах схема опытов на *двухслойных моделях с эластичным основанием* состояла в следующем. Лист резины толщиной около 1–2 см заливался расплавом легкоплавкого материала (воск, парафин, канифоль). Застывая, верхний слой толщиной 2–4 мм прочно сцеплялся с нижним, после чего резину растягивали с помощью системы домкратов. Поскольку упругие модули верхнего и нижнего слоев различны, на их контакте возникали напряжения, которые затем и предопределяли картину разрушения верхнего слоя. Были осуществлены модификации таких моделей с одно- и двухосным растяжением, а также с плоским всесторонним растяжением.

О картине разрушения двухслойной модели при ее одноосном растяжении дает представление рис. 4.4. На узкую полосу резины, размещенную на испытательном стенде, наносился слой эмали или лака. После застывания верхнего слоя и перехода его в хрупкое состояние резиновая подложка подвергалась одноосному

растяжению. Вначале (верхний рисунок) в хрупком верхнем слое вдоль его обоих краев возникало множество мелких «зародышевых» трещин, нормальных к оси растяжения. Впоследствии прорастали только некоторые из них. Они расчленяли материал верхнего слоя на примерно одинаковые по величине фрагменты. При этом остальные начальные трещины исчезали (нижний рисунок).

На рисунках 4.5; 4.6 приведены примеры сеток трещин, которые возникали в материале верхнего слоя модели при двухосном и плоском всестороннем растяжении.

Опыты в их стандартной постановке производились следующим образом.

Подготовленная модель с помощью натяжного устройства нагружалась до состояния, близкого к разрушению. Спустя некоторое время, без дополнительной закачки энергии в систему, в верхнем слое модели начинали возникать трещины отрыва, которые постепенно покрывали модельный материал все более

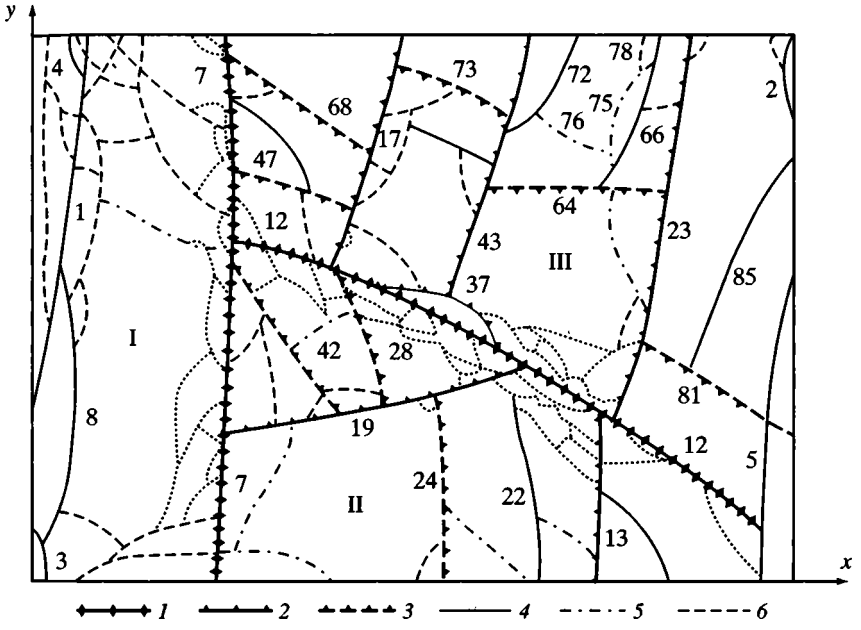


Рис. 4.5. Трещины в двухслойной модели при двухосном растяжении [Кондратьев и др., 1985]

1–6 – генерации трещин (первая, вторая,...); цифры при трещинах – порядковые номера их появления во времени; римские цифры – наиболее крупные отдельности, образованные трещинами первой генерации

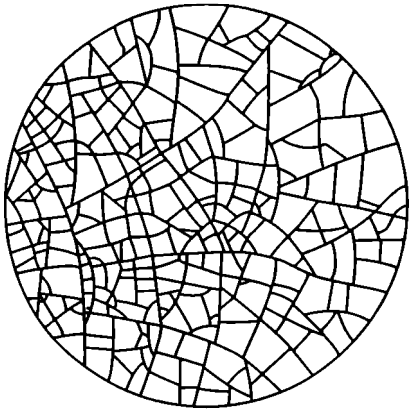


Рис. 4.6. Трещины в двухслойной модели при двухосном растяжении

частой сетью, расчленяя его на множество отдельностей («блоков»). Со временем интенсивность образования трещин убывала, но отдельные трещины, несмотря на прогрессирующую убыль энергии в системе, продолжали возникать даже спустя несколько часов после начала разрушения. Дополнительное нагружение вело к дальнейшему разрушению модельного материала. В круглом блоке материала диаметром около 50 см в модификации модели, создающей плоское всестороннее напряженное состояние, удавалось получать до 1500 трещин.

Использование двухслойных моделей с эластичным основанием для изучения морфологии, кинетики и динамики образования систем трещин удобно в нескольких отношениях.

Во-первых, полученная на них картина вскрывает весьма общие особенности разрушения систем с независимым энергоснабжением, параллельным и с автономным, в том числе и особенности разрушения энергонасыщенных, неравновесных систем.

Во-вторых, в двухслойных моделях возможно весьма гибкое управление их параметрами. Двухслойные модели, в частности, удобны для изучения взаимодействия пороговой и потенциальной функций в достаточно широком интервале варьирования их значений.

В-третьих, двухслойные модели дают весьма детальное представление о механическом поведении двухслойных систем – универсальных элементов структуры геологической среды.

В-четвертых. Обычным вопросом и вопросом трудным, который ставят перед экспериментаторами, моделирующими те или иные стороны механического поведения геологической среды, является вопрос о соблюдении условий подобия модулей с характеристиками геологической натуры (масштаб, свойства среды: прочность, вязкость, длительность воздействий и т.д.).

Достоинством двухслойных моделей является то, что особенности их разрушения инвариантны по отношению к варьированию условий подобия, поскольку они отражают весьма общие закономерности структурирования при разгрузке потенциальных функций.

4-3. ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ

Описание опытов с разрушением модельного материала одномерных двухслойных моделей приведено в работе [Садовский и др., 1982].

Двухслойная модель, в которой осуществлялись условия одноосного растяжения, представляет собой полосу вакуумной резины толщиной 9, шириной 90 и длиной 1200 мм, которая располагается на горизонтальном столе. Один конец ее жестко защемлен, а второй с помощью домкрата может перемещаться, обеспечивая этим деформацию нижнего слоя. Верхний слой изготовлялся из легкоплавкого материала (воск, парафин, канифоль), который в расплавленном состоянии заливался на поверхность резины. После застывания верхнего слоя он прочно скреплялся с резиной, причем связь эта хорошо сохранялась и в процессе деформирования нижнего слоя. Модуль упругости материала, использовавшегося в качестве верхнего слоя в большинстве опытов, имел величину порядка 1000, резины – 20 кг/см^2, т.е. $E_В/E_Н = 50$. Деформация блока измерялась с помощью тензодатчиков, вплавленных в блок материала. Тензодатчики на бумажной основе с базой 10 мм. В опытах исследовались блоки толщиной 3–15 мм.

При стандартной постановке опытов резиновую подложку и блок наплавленного материала растягивали до величины, заранее определенной из предыдущих опытов. Дальнейшее растяжение прекращали. Спустя время порядка первых минут, в полосе модельного материала возникала первая трещина, а за ней и другие трещины. Начиналось разрушение с концов блока материала. По истечении времени порядка 10 мин–1 ч блок материала расчленялся серией поперечных трещин на примерно одинаковые по размерам отдельности.

На размеры отдельностей l влияют следующие факторы.

1) Толщина слоя модельного материала h. Качественно зависимость $l(h)$ выражается в том, что характерный размер отдельности тем больше, чем больше мощность слоя. 2) Свойства материала. Блок канифоли, например, при прочих равных условиях разрушается бóльшим числом трещин, чем блок парафина. 3) Количество энергии, сообщенной системе, т.е. уровень напряжений, количество работы, затраченной на деформирование блока модельного материала. При прочих равных условиях сеть трещин, образующихся в блоке модельного материала тем плотнее, чем сильнее растянута подложка модели.

Еще раз подчеркнем. В случае одноосного растяжения образца на испытательной машине появление трещины, секущей сече-

ние образца, прекращает его дальнейшее энергоснабжение – образец разрушен. В нашем же случае появление трещины, секущей блок модельного материала, не приостанавливает процесс дальнейшего появления трещин. Они продолжают появляться до тех пор, пока энергетический ресурс, сообщенный системе растяжением, не будет исчерпан настолько, что дальнейшее разрушение станет невозможно. В этом смысле плотность трещин – их количество на единицу длины – по существу является структурной характеристикой интенсивности поля потенциальной функции, которое обеспечило энергией процесс их образования.

4-3.1. Самоорганизация структур разрушения

Под *самоорганизацией* в данном случае подразумевается образование упорядоченной системы трещин, расчленяющей полосу материала на примерно одинаковые фрагменты. Упорядоченность же выражается в выдержанности примерно одинаковых расстояний между соседними трещинами.

Механизм самоорганизации прост. Возникшая трещина разгружает потенциал в своей окрестности и тем самым делает невозможным появление в разгруженной зоне последующих трещин. Следующая трещина может возникнуть случайным образом в любом месте вдоль полосы, за исключением зоны разгрузки. Вследствие этого возникшая трещина «налагает запрет» на появление трещин того же масштабного уровня в некоторой своей окрестности. Запомним этот эффект – существование областей запрета на появление последующих событий в очагах уже возникших деструктивных событий. Эта особенность, как показано ниже, четко проявляется в качестве характерной особенности сейсмического режима.

Ритмичные серии трещин весьма обычны в геологической натуре. В качестве примера можно привести системы планетарных трещин: обычно это серии трещин одного простирания с четко выдержанными одинаковыми расстояниями между ними.

В целом: расстояния между трещинами соответствуют ширине зоны разгрузки, обусловленной образованием трещины, из которой и черпается вся или почти вся энергия, требуемая для ее образования. Если модель после завершения процесса ее разрушения нагрузить дополнительно, то в материале возникнет новая серия трещин, которые расположатся в промежутках между трещинами уже существующими.

Из общих соображений очевидно, что закон распределения трещин должен соответствовать закону распределения энергии.

При равномерном распределении энергии равномерной будет и сеть трещин тем более плотная, чем выше уровень энергии, запасенной системой. При неравномерном же распределении энергии должна быть неравномерной и сеть трещин. В частности, если значения потенциальной функции убывают по нормали к поверхности разгрузки (например, экспоненциально), то расстояния между трещинами, образующимися в процессе энергетической разгрузки, будут последовательно возрастать. Это простое до очевидности положение может быть применено в качестве теоретической схемы, объясняющей явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок. В настоящее время с этой целью применяются весьма сложные теоретические схемы.

4-3.2. Эффект локальности

Образование каждой единичной трещины понижает суммарный энергетический потенциал системы. Однако, несмотря на систематическую убыль энергии в системе, трещины продолжают в ней возникать. Этот эффект можно объяснить тем, что разгрузка, осуществляемая образованием трещины, локальна. За образование трещины «отвечает» какая-то часть системы, независимо от того, что происходит в ее других частях. Практически она изолирована от других частей системы, что, вообще говоря, и следует из того, что энергоснабжение частей системы осуществляется независимо, в данном случае по схеме параллельного энергоснабжения. При этом прекращение энергоснабжения одной части системы на энергоснабжении других частей существенным образом не сказывается. Назовем эту особенность *эффектом локальности.*

Эффект локальности невозможен в системах, подверженных действию внешней нагрузки по схеме последовательного энергоснабжения, т.е. в случаях, которые составляют фундаментальную основу построений традиционной механики. Проявления эффекта локальности характерны для систем, располагающих собственным энергетическим потенциалом. Эффект уже сам по себе свидетельствует о том, что разрушение осуществлялось при наличии такого потенциала и за его счет.

Полученная картина разрушения двухслойной модели при одноосном растяжении в общих чертах согласуется с выводами, которые были получены при анализе ряда теоретических моделей, приведенных в работе [Зимов, 1993].

Остановимся на одном из решений. Напряжения, равные нулю на поверхности трещины, при удалении по нормали к плоско-

сти разрыва экспоненциально асимптотически увеличиваются, стремясь на бесконечности к величине, равной напряжениям в ненарушенном массиве. Из этого следует, что четкую зону разгрузки выделить нельзя, теоретически трещина разгружает в той или иной степени весь массив. Другими словами, область динамического влияния трещины теоретически распространяется на всю систему. Если так, то вторая трещина должна возникнуть на бесконечном расстоянии от первой. То, что трещины все же возникают на конечных расстояниях друг от друга, можно объяснить следующим образом. При удалении от трещины напряжения растут очень быстро, и на расстоянии, в несколько раз превышающем глубину трещины, разгрузка напряжений почти незаметна, что и делает возможным появления здесь новой трещины.

4-3.3. Задержки времени

Подложку модели растягивают до определенной величины, установленной в предыдущих опытах, и далее модель оставляют в фиксированном растянутом состоянии. Трещины начинают возникать спустя некоторый промежуток времени, который мы будем называть *временем задержки*. Оно свидетельствует о том, что образованию трещины предшествует некоторый инкубационный период.

Логично было бы предположить, что этот период соответствует времени релаксации материала. Свойства блока модельного материала одинаковы повсюду. Следовательно, одинаковым во всех частях системы должно было бы быть и время релаксации, требуемое для того, чтобы материал подошел к черте предельного состояния. В этом случае инкубационный период перед возникновением каждой из трещин был бы одинаковым и трещины возникали бы «залпом», почти одновременно во всех частях блока материала. Тем не менее в обсуждаемых опытах этого нет. Процесс образования трещин сильно растянут во времени. Трещины, смежные в их временно́й последовательности, не возникают одновременно, а разделены промежутками времени, вследствие чего процесс их образования в каждом из опытов был растянут на десятки минут. Из этого можно заключить, что подобно тому как существует механизм, упорядочивающий появление трещин в пространстве, существует и механизм, регулирующий появление трещин во времени.

Можно предположить, что подобно тому как образование трещины налагает запрет на появление последующих трещин в

зоне ее разгрузки, трещина в какой-то временно́й окрестности своего появления также налагает запрет на появление последующих трещин. Наблюдая картину разрушения, создается впечатление, что в момент своего образования в процессе подготовки разрыва и некоторое время после его появления налагается временный запрет на появление трещин во всем пространстве блока материала.

Переходя на язык образов, можно было бы сказать, что для возникновения трещины в какой-либо части системы мобилизуется энергетический ресурс во всех остальных частях системы. Ее же возникновение «подсаживает» этот ресурс, и системе требуется определенное время для его восстановления.

Однако в процессе опыта дополнительная энергия в систему не поступает. Это может означать одно из двух: в системе происходит такое перераспределение энергетического ресурса, которое делает возможным появление следующей трещины, и на это требуется определенное время, либо в локальных участках модели происходит изменение свойств материала, выражающееся в том, что пороговая функция на этих участках достигает значений потенциальной функции, т.е. изменяется поле напряжений в пространстве блока материала либо изменяются его прочностные свойства. Существует и третья возможность: происходит и то и другое в комплексе.

Конкретная физическая подоплека происходящих изменений, тем не менее, неясна. Нам остается одно: наблюдать эмпирические факты. Наблюдения же обрисовывают следующую картину.

Запрет, налагаемый возникновением трещины на появление последующих трещин, во-первых, является временным, а во-вторых, с течением времени область дальнодействия во влиянии разрыва на свою периферию (область динамического влияния разрыва) центростремительно сокращается. На модели вначале снимается запрет на появление разрывов в более удаленных частях полосы материала и только затем – в его ближней зоне. В результате смежные по времени события редко бывают смежными и в пространстве.

4-3.4. Области динамического влияния

Из существования эффекта локальности следует, что события в разных частях системы независимы. Однако, как о том шла речь выше, существуют признаки, что в близкой временно́й окрестности каждого события оно оказывает влияние на ход событий во всей системе или ее части, существенно превышающей

размеры зоны разгрузки, обусловленной появлением события. Используя термин С.И. Шермана и Р.М. Лобацкой, условимся называть область, в которой сказывается влияние трещины на ход событий в ее окрестности, в том числе и в процессе ее подготовки, как *область ее динамического влияния*.

Феноменологическую картину, отражающую влияние «готовящейся» трещины на события в ее окрестности, можно представить следующим образом. В совокупности зародившихся трещин со временем некоторые трещины получают преимущественное развитие. Назовем их трещинами первого порядка. Развитие трещины первого порядка налагает запрет на зарождение и рост трещин меньших порядков в некоторой ее окрестности, которую по этому признаку мы и будем отождествлять с областью ее динамического влияния.

Область динамического влияния, как видно из опыта, начинает формироваться уже до образования трещины в ее полном формате.

Рассмотрим данные, полученные на двухслойной модели, верхним слоем которой являлась тонкая полоса краски (нитроэмаль). Данные взяты из работы [Моделирование..., 1985].

В опытах исследовалось поведение двух моделей с шириной полосы 20 и 60 мм. Разрушение полосы краски по всей ее длине полосы начиналось с краев в виде зарождения множества трещин примерно одинаковой длины, отчего на первом этапе разрушения полоса напоминала линейку с нанесенными на ее края миллиметровыми делениями.

Однако по мере развития разрушения одни трещины обгоняли в своем росте другие, причем развитие трещин, прораставших быстрее своих соседей, сопровождалось остановкой роста последних. Прорастание трещин, получивших в своем развитии преобладание, – трещин первого порядка – «подавляло» развитие соседних трещин меньших порядков, притом во все расширяющейся области.

В целом рассмотренная картина напоминает формирование областей сейсмических затиший перед возникновением больших сейсмических событий.

Сейсмические затишья проявляются следующим образом. Вначале в пространстве обычной «фоновой» сейсмичности возникает область с прогрессирующим уменьшением сейсмической активности, превращаясь со временем в область полного сейсмического молчания. Площадь области молчания со временем разрастается, постепенно распространяясь на площадь, которая по своим линейным размерам намного превосхо-

дит область будущего очага. Кинетика развития сейсмического затишья в общих чертах сходна с наблюдаемой при разрушении слоя краски.

У нас нет данных, которые бы позволили более обоснованно настаивать на глубоком внутреннем сходстве этих двух различных по своей природе процессов. Является ли приведенный пример простым внешним совпадением или же в нем проявлены черты автомодельности процесса разрушения, протекающего на разных масштабных уровнях, с определенностью сказать трудно. Однако этот пример допускает мысль, что проявление сейсмических затиший может быть обусловлено какими-то сравнительно несложными особенностями разрушения, которые до сих пор не установлены лишь по той причине, что во взгляде на разрушение геологической среды исходят из одной и той же общепринятой схемы, не принимая во внимание другие возможные сценарии.

Следует заметить, что эффект затишья, по-видимому, является весьма общей особенностью поведения различных материалов в период, предшествующий их разрушению. Так, С.Д. Виноградов [Виноградов и др., 1975] отмечал эффект затишья акустической активности незадолго до разрушения нагруженного образца. Затишье акустической активности наблюдалось в опытах, имитирующих развитие очага по схеме «трещина–барьер–трещина» [Салов и др., 1989].

Говоря о проявлении обсуждаемого эффекта в поле сейсмических явлений, отметим две особенности этого эффекта. Во-первых, область динамического влияния, возникающая в процессе подготовки главного события, – явление временное. Время его существования намного меньше времени существования локальных минимумов сейсмической активности в очаговых областях уже произошедших событий. Во-вторых, размеры затиший на 1–2 порядка больше размеров очаговых зон.

Опыты с разрушением слоя краски показывают, что сценарий развития трещиноватости в нем в принципе отличается от того, который мыслится в рамках ЛНТ или КТП: укрупнение, рост трещин происходит за счет индивидуального прорастания каждой трещины, постепенно внедряющейся в материал, который не содержит трещин, видимых невооруженным глазом. Уже образовавшиеся трещины не только не имеют тенденции к росту за счет слияния и объединения с другими трещинами, но, наоборот, развитие более мелких трещин приостанавливается.

4-3.5. Системный характер разрушения

Существование инкубационного периода, предшествующего разрушению, говорит о том, что сам по себе уровень напряжений, как бы он высок ни был, привести к мгновенному, абсолютно хрупкому разрушению не может. Материал должен еще «созреть» для разрушения. В дальнейшем к этому образу в силу его важности для понимания процессов разрушения, происходящих в геологической среде, мы будем возвращаться неоднократно.

Энергонасыщенные системы находятся в метастабильном состоянии. Процессы разрушения в них могут быть спровоцированы даже очень слабыми внешними воздействиями. Тем не менее, для того, чтобы система отреагировала на воздействие, требуется задержка времени, необходимая на «созревание» материала к разрушению. При этом в системе «сработают» первыми те ее элементы, которые уже были близки к критическому состоянию. В духе образа «созревания»: если сильно тряхнуть плодовое дерево, то с него упадут только созревшие плоды; незрелые так и останутся висеть на ветках до полного созревания. На пусковые импульсы, какими бы они ни были мощными, реагирует только часть элементов, которые и без этого находились уже вблизи критического состояния.

Коснемся существа процесса «созревания». В представлениях классической механики говорят о «пластическом потенциале» материала, ограниченном пределом текучести. Когда этот потенциал исчерпан, материал «готов» к хрупкому разрушению. С физической точки зрения в этом случае мы имеем дело с релаксацией материала, выраженной в форме его вязкого течения до определенного предела.

Хотя в начальный момент опыта энергия вдоль всей полосы материала, исключая его краевые части, распределена равномерно, в силу случайных флуктуаций процесс релаксации в разных частях системы протекает неравномерно. В соответствии с общеизвестными представлениями о разрушении, в этот начальный период может возникнуть множество локальных «зародышей» будущих трещин. Эти «зародыши» опережают в своем созревании остальной материал системы и со временем все в большей мере.

По мере развития зародышевых образований размеры зон их влияния возрастают, и по мере разрастания этих зон между ними начинается конкурентная борьба, в результате которой ускоренное развитие получает какое-то из зародышевых образований, обогнавшее в своем развитии все остальные. В этой стадии – ста-

дии предразрушения – область динамического влияния распространяется на всю систему. В целом же полоса материала, в которой протекает процесс разрушения, представляет собой систему сложного динамического взаимодействия очагов разрушения с самоускоренным развитием в превалирующем очаге и стагнацией процесса в остальных очагах, иными словами, материал представляет собой сложную систему, управляемую положительными и отрицательными связями.

На этот счет могут быть высказаны разные соображения. Одно же из них в том, что в «зародышах» будущих очагов процесс не только приостанавливается, но идет вспять, деградирует в направлении исходного состояния, как это, например, наблюдалось в исчезновении множества уже появившихся небольших трещин в полосе краски в поле динамического влияния трещины, вступившей в фазу своего интенсивного развития. Таким образом, «зародышам» трещин весьма трудно реализовать себя в виде трещины отдельности, секущей всю полосу материала. Даже те, которым удается этого достичь, вынуждены прежде «отстоять очередь», в результате чего процесс разрушения модели в целом оказывается сильно растянут во времени, и трещины в конце опыта возникают с такими временами задержки, которые намного превышают время задержки перед появлением первой трещины.

Из наблюдаемой картины мы приходим к тому, что «инкубационный период» в развитии разрушения определяется не только реологическими свойствами материала в месте образования будущего разрыва, но и динамическими взаимодействиями различных частей (элементов) самой системы, которые имеют в данном случае характер управляющих воздействий, спонтанно возникающих в системе в процессе ее разрушения.

В истории развития очага разрушения от его скрытой формы до образования трещины и ее последействия можно выделить две стадии. На первой из них область динамического влияния зародышевого образования, разрастаясь, к моменту образования трещины становится в масштабе модели глобальной. На второй стадии, после образования трещины, эта область в течение какого-то промежутка времени снимается, сокращаясь до размеров области разгрузки. Тем самым мы приходим к представлению, что в близкой временно́й окрестности события в его субстрате возникает ограниченный во времени *переходной процесс*. Его внешним проявлением является временно́е существование зоны динамического влияния, распространяющегося на всю систему или ее часть, значительно превышающую зону очага (последняя

в случае эксперимента ассоциируется с зоной разгрузки у берегов возникшей трещины).

Поскольку зоны динамического явления перекрываются и в системе невозможно состояние, когда бы процесс разрушения протекал в ее разных точках свободно, независимо от того, что происходит в остальных частях системы, то развитие разрушения вне рамок системы невозможно в принципе. Разрушение системы приобретает черты процесса осциллирующего в пространстве и времени. Эта особенность присуща и системам с последовательным энергоснабжением, но она в этом случае имеет «разовый» характер и предстает наблюдателю в упрощенном, вырожденном виде.

Осциллирующий характер процесса разрушения свойствен релаксирующим системам, в которых разрушение реализуется за счет собственных энергетических ресурсов системы без дополнительного притока энергии в систему в процессе разрушения, как мы видим на примере разрушения одномерной модели. Хотя модель и возникающая в ней картина разрушения выглядит простой до примитивности, выводы, к которым можно прийти из осмысления того, что в ней происходит, далеки от тривиальных. В частности, именно осциллирующий характер является типичной и едва ли не главной чертой сейсмического режима, а изложенное здесь представление является своего рода ключом к пониманию целого ряда проявлений этого режима.

4-3.6. Режим осцилляций

Длительное время изучение сейсмического режима, т.е. поведение больших совокупностей землетрясений с разной энергией в пространстве–времени, складывалось в рамках сейсмостатистики – научного направления, которое рассматривает совокупности землетрясений как совокупности случайных, независимых событий. В рамках этого представления само понятие «осцилляция» в практике его обычного употребления содержит подтекст, ассоциирующийся с пониманием осцилляции как элементарной флуктуации процесса чисто случайного.

Действительно, динамическое взаимодействие множества очагов разрушения в разной стадии их развития, притом выраженное на разных масштабных уровнях, производит впечатление процесса случайно блуждающего, не поддающегося какой-либо детерминации. И все же некоторые особенности течения сейсмического процесса при ближайшем рассмотрении указывают на то, что события не в полной мере независимы, что в какой-то

мере они подвержены взаимным динамическим влияниям либо влиянию каких-то общих управляющих воздействий.

Рассмотрим это на примере поисков эффекта миграции.

Физический смысл в таких поисках, если дело выходило за пределы чистой эмпирики, нередко ассоциировали с дискретным развитием смещений по одиночным разрывным нарушениям или их системам, с распространением своего рода «волн деформации», или «пластических волн».

Эффект миграции выражается в том, что очередность появления событий во времени совпадает с их последовательным возникновением вдоль некоторой пространственной линии. Случайные же флуктуации можно рассматривать как хаотическое перемещение частных максимумов активности.

Обозначим последовательность событий во времени рядом чисел 1, 2, ..., n, а последовательность событий вдоль некоторой пространственной оси, как 1, 2, ..., m. Экспериментальные данные представим в виде, когда последовательность единичных событий или их групп в пространстве обозначается опущенным индексом при числе, соответствующем очередности появления событий во времени. Тогда наличие миграционного ряда выразится упорядоченной последовательностью вида 1_1, 2_2, 3_3, 4_4... и т.д., а наличие флуктуаций – последовательностями вида 1_3, 2_1, 3_7, 4_5... и т.д. В этом случае опущенные индексы не упорядочены, а представляют собой наборы случайных чисел (в пределах их рассматриваемого множества).

Выше мы затронули тему о том, что образование трещины на некоторое время налагает запрет на образование последующих трещин во всем пространстве модели, вследствие чего весь процесс разрушения модели становится замедленным. Говоря более общо, между возникшей трещиной и потенциальными будущими разрывами существует обратная отрицательная связь. Существование обратной отрицательной связи приводит к тому, что миграционные последовательности при разрушении модели не наблюдаются. Однако появление трещин в пространстве–времени нельзя считать и полностью хаотическим. Оно подчинено более сложной зависимости.

Основные моменты этой зависимости сводятся к следующему.

В полностью сформировавшейся системе трещин расстояния между трещинами близки к l_{min}. Однако трещина, ближайшая в пространстве к уже возникшей, т.е. соседняя, как правило, образуется только после того, как в модели возникнет более удаленная трещина на расстоянии, которое не менее чем в 2–3 раза превышает минимальное. Смежная по времени появления трещина

«перепрыгивает» пространство, в котором в процессе опыта появится трещина, смежная в пространстве. В результате образуются последовательности, которые в идеализированном виде можно изобразить рядом 1_1, 2_3, 3_2 ... и т.д.

Строгая форма ряда нарушается тем, что следующая по времени появления трещина может возникнуть в любом месте модели, но на расстоянии, которое превышает минимальное не менее чем в два раза. Вместе с тем вероятность того, что смежная по времени появления трещина окажется по отношению к ранее возникшей трещине смежной с нею и в пространстве, невелика.

Мы остановились на обсуждении этой закономерности по той причине, что она является одной из универсальных, почти не изученных форм проявлений сейсмического режима. Она трудна для ее формального выражения даже в линейном случае, хотя, думается, специалистам по математической статистике задача создания соответствующей модели по плечу. Путь к ее решению видится, в частности, в использовании представления об условной вероятности в духе построений Байеса. Что касается сейсмичности, то задача усложняется еще и объемным характером ее проявлений, который чаще всего представляется в двумерном виде: в форме карт эпицентров сейсмических событий и разрезов по вертикали.

Высказанное соображение относительно наблюдаемой *чересполосицы сейсмических событий* отмечается не только для единичных событий, но и для их пространственно-временны́х групп.

Если разбить время появления совокупности слабых землетрясений на несколько интервалов и нанести на карту эпицентров события каждого из интервалов, выделив их, скажем, цветом, то обнаружится, что карта «одноцветных» событий примет пятнистый характер: события расположатся в своем большинстве пространственными группами. Нанесенные на ту же карту события другого цвета, соответствующего другому интервалу времени, расположатся на той же карте в группах, которые занимают места в промежутках между группами событий первого интервала, и т.д. Землетрясения последующих групп «избегают» возникать в тех местах, где возникали землетрясения предыдущих групп.

Механизм этого явления можно объяснить следующим образом.

Поле потенциальной функции, отражающее энергетический ресурс среды данного сейсмоактивного региона, имеет сложный

рельеф. Интенсивность сейсмических проявлений возрастает в частных максимумах этого поля. В этой фазе развитие совокупности активных очагов сейсмических событий подавляет, приостанавливает развитие очагов других событий, попавших в область их совокупного динамического влияния. Другими словами, локальная группа очагов событий налагает запрет на появление других сейсмических событий в окрестности места их локализации.

Появление сейсмических событий в области частных максимумов поля потенциальной функции высвобождает некоторое количество энергии. На месте бывшего частного максимума образуется локальная «впадина». Сейсмический процесс здесь замирает и перемещается в новые частные максимумы, сформировавшиеся в сейсмическом процессе. Сейсмический режим приобретает черты *осциллирующего* процесса, сочетающего в себе закономерную и случайную составляющие.

Несколько замечаний, касающихся проявления этой закономерности в сейсмическом режиме. Поискам миграционных цепочек очагов сейсмических событий, т.е. последовательного возникновения землетрясений вдоль определенного азимута, были посвящены усилия многих исследователей. В некоторых довольно редких случаях такие цепочки и были обнаружены. Однако, как правило, миграционные последовательности не отслеживаются. Иногда своего рода «волна миграции» прослеживается для некоторой совокупности землетрясений, очаги которых, перемещаясь в определенном направлении всей группой, внутри группы образуют пространственно-временны́е последовательности, которые формируются в возвратно-поступательном режиме.

Казалось бы, возникновение большого сейсмического события должно стимулировать появление последующих очагов. Возможно, это и происходит, но в более значительном охвате времени. Непосредственно же появление большого землетрясения налагает временный запрет на появление событий такой же величины в довольно широкой своей окрестности, намного превышающей размеры области его очага. Ориентировочной оценкой времени запрета могут служить интервалы времени между появлением событий одного уровня в их одной пространственно-временно́й группе.

В работе [Лукк, Пономарев, 1972] было развито представление о существовании *областей динамической связности* (ОДС), характеризующихся синхронными изменениями уровня сейсмического фона, представленного слабыми землетрясениями в их

разных частях, причем эти изменения оказались связаны с возникновением значительных сейсмических событий. Так, последние возникали в пределах данной ОДС только при высоком уровне активности фоновой сейсмичности или при тенденции к ее росту. Высокий уровень активности сейсмического фона свидетельствует о переходе ОДС в критическое состояние, когда становится возможным появление больших сейсмических событий. События, после которых наблюдалось общее для всей ОДС снижение уровня фона, получили название «критических землетрясений». Хотя очаговые зоны таких землетрясений занимают ничтожную часть площади всей ОДС, критические землетрясения понижают ее энергетический потенциал настолько, что она переходит в состояние сейсмического покоя и дальнейшее появление в ней значительных сейсмических событий становится невозможно. В случае, если значительные события, снижая потенциал в своей близкой окрестности, не «подсаживают» потенциал ОДС в целом, высока вероятность группового появления последующих значительных событий.

Потенциальные очаги будущих землетрясений того же масштаба не детонируют тотчас от произошедшего сильного сейсмического события, хотя и размещаются в среде, созревшей до критического состояния, о чем свидетельствует уже хотя бы одно то, что они имеют склонность возникать пространственно-временны́ми группами.

Появление значительного события, видимо, провоцирует появление других событий примерно той же величины. Во всяком случае, вероятность появления последующих событий того же уровня в активизированной ОДС резко возрастает. Но последующие сильные землетрясения одной и той же группы возникают одно после другого с определенной задержкой времени и на достаточно больших расстояниях между их очагами. В природе, на счастье человечества, существует механизм саморегуляции, который не допускает лавинообразного развития сейсмического процесса. Геологическая среда расходует свой энергетический ресурс весьма экономно – дозированно и локально, с достаточно большими пространственно-временны́ми паузами между отдельными событиями в их серии, что в упрощенном виде весьма наглядно демонстрируют особенности образования систем трещин в двухслойной модели.

Опускаясь или подымаясь по ступеням энергетической иерархии сейсмических событий, наблюдатель увидит черты той же картины на каждом масштабном уровне, отличающейся только значениями пространственно-временны́х параметров.

4-4. ДВУМЕРНЫЕ МОДЕЛИ

На двумерных моделях при двухосном растяжении подвод энергии к верхнему слою осуществлялся, как и в случае одномерной модели, за счет деформации эластичного нижележащего слоя, но в двумерных моделях рассматривались более сложные варианты «закачки» энергии в систему: растяжение по двум осям и плоское всестороннее растяжение. При этом исследовались общий характер деформирования и расчленения на фрагменты верхнего слоя (блока), картина перераспределения деформаций при образовании в нем одиночных трещин, морфология, кинетика и некоторые другие закономерности разрушения верхнего слоя.

4-4.1. Двухосное растяжение

Описание опытов с деформированием и разрушением модельного материала двумерных двухслойных моделей при двухосном растяжении приведено в работе [Кондратьев и др., 1985].

Роль нижнего слоя выполнял лист вакуумной резины размерами 1200 × 800 мм² и толщиной 9 мм. Он располагался на горизонтальном столе, а по краям захватывался с помощью жестких зажимов, соединенных с домкратами, установленными на жесткой раме. Растяжение по каждому из двух перпендикулярных направлений осуществлялось двумя домкратами, которые растягивали лист резины в противоположные стороны. Такая схема может обеспечивать одинаковые и различные натяжения нижнего слоя по двум осям.

Верхний слой в форме прямоугольного или квадратного блока представлен легкоплавким материалом (воском), который в расплавленном состоянии заливался на поверхность резины. Характер деформаций изучался на блоках разного размера. В плане размеры блоков 200 × 200–480 × 660 мм², толщина 2–15 мм.

Как и в случае одномерной модели, нижний слой модели растягивался с помощью домкратов, но по двум осям до величины, установленной в предыдущих опытах. Спустя некоторое время, в модели начинался процесс образования трещин. Со временем количество образующихся трещин убывает примерно по экспоненте. Однако процесс можно продлить дополнительным нагружением модели. При этом образуются новые генерации трещин. Далее мы рассмотрим данные, полученные при многократном последовательном нагружении. Каждый дополнительный цикл нагружения осуществлялся при ослабевании процесса образова-

ния трещин. Каждое дополнительное нагружение активизировало процесс дальнейшей дезинтеграции модели. При этом материал модели расчленялся на все более мелкие отдельности, но целостность модели, вследствие связи образующихся фрагментов с нижним слоем, сохранялась.

Типичную картину разрушения верхнего слоя модели при двухосном растяжении см. на рис. 4.5.

4-4.2. Плоское всестороннее растяжение

Экспериментальная установка, на которой осуществлялись условия плоского всестороннего растяжения, представляла собой подобие поршня. Выдвигаясь вертикально вверх с помощью масляного домкрата, круглый стол с плоской поверхностью вызывал растяжение круглого листа резины, жестко закрепленного над ним в неподвижной обечайке. Как и в других опытах, до начала нагружения на резину заливался расплав модельного материала, который, застывая, прочно сцеплялся с подложкой. В процессе подъема стола резина вместе со слоем модельного материала центробежно «растекалась» по поверхности стола, чем условие плоского всестороннего растяжения и достигалось. Процесс разрушения можно было продолжить, сообщая модели дополнительное нагружение. Таким образом удавалось, например, при разрушении круглого блока материала с диаметром 500 мм получать около 1500 отдельностей.

Процесс образования трещин регистрировался с помощью киносъемки, что позволило затем установить последовательность их появления.

Типичная картина разрушения верхнего слоя модели при плоском всестороннем растяжении приведена на рис. 4.6.

4-4.3. Модели с жестким основанием

Кроме моделей с эластичным основанием, исследовались разрушения двумерных моделей с жестким основанием. Описание опытов по разрушению модельного материала двухслойных моделей с жестким основанием приведено в работе [Пономарев и др., 1995]. Принцип устройства таких моделей прост. На плоский дюралевый лист при температуре 18–20 °С заливается расплав канифоли (150–170 °С), сформированный в виде круга. Переходя в твердую фазу, материал модели прочно сцепляется с подложкой. По мере охлаждения модель переходит в критическое состо-

яние и взрывается, образуя в верхнем слое сетку трещин отдельности. Дальнейшее охлаждение провоцирует дальнейшую фрагментацию ранее образовавшихся блоков. В конечном результате поверхность модельного материала покрывается сеткой трещин с тенденцией к их статистически равномерному распределению. Причиной разрушения являются тепловые латентные напряжения, которые возникают вследствие несовместных деформаций двухслойной системы «канифоль–дюраль», поскольку модули температурных изменений объема канифоли и подложки различаются примерно на порядок.

В моделях с эластичным основанием разрушение протекало в форме замедленного прогрессирующего. Образование каждой трещины сопровождалось излучением упругого импульса, однако трещины по порядку их появления во времени появлялись через промежутки от нескольких секунд до десятков минут. В моделях же с жестким основанием процесс образования трещин развивался лавинообразно, в форме взрыва. Поэтому модели этого типа мы использовали главным образом для изучения динамики разрушения. Основные закономерности разрушения модельного материала за вычетом второстепенных особенностей в основных чертах были те же, что и в случае разрушения на моделях с эластичным основанием.

4-5. МОРФОЛОГИЯ СИСТЕМ ТРЕЩИН ОТДЕЛЬНОСТИ

Основная форма разрушения блоков модельного материала в двухслойных моделях – образование систем трещин хрупкого отрыва, которые расчленяют материал на отдельные фрагменты. Рассмотрим те факторы, которые определяют полигональную фрагментацию разрушаемых блоков материала.

4-5.1. Эффект «отдельности»

Особенностью трещин, возникающих в двухслойных моделях, является то, что каждая из них, зародившись, далее не испытывает остановок в процессе роста. Она не заканчивается в материале «слепо», а одноактно прорастает до выхода ее концов на края блока либо на границы той отдельности, в которой возникла. Этим концентрация напряжений на концах трещин снимается, и дальнейший их рост, продолжающий тенденцию развития данной трещины по простиранию, становится невозможен.

Для сравнения напомним основные положения разрушения, следующего «классическому» сценарию. Именно этот сценарий разрушения с различными нюансами рассматривается во всех принятых теориях разрушения: кинетической теории прочности (КТП), диффузно-дилатансионной теории (ДД), теории перколяции, теории лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ), теории множественного разрушения, включая и недавно оформившуюся мезомеханику.

По классическому сценарию разрушение тела, нагруженного внешней силой, достигается прорастанием единичной «магистральной» трещины, глобальной в масштабе тела. Формирование магистральной трещины происходит не одноактно, а имеет длительную предысторию, основным моментом которой является возникновение множества «подготовительных» трещин. Трещины эти заканчиваются в материале «слепо». Со временем они прорастают в материале, постепенно укрупняясь. Укрупнение происходит также за счет их слияния. Укрупнение «подготовительных» трещин сопровождается их концентрацией в самом ослабленном сечении тела, в зоне будущего магистрального разрыва.

Нетрудно видеть, что ничего подобного в процессе фрагментации не происходит. Разрушение тел с независимым энергоснабжением их элементов следует совсем другому сценарию. Его результат – сетка трещин, распределенных в пространстве тела статистически равномерно. В плоском случае это полигональные системы трещин отдельности, в трехмерном случае – объемные системы трещин, расчленяющие тело на отдельные блоки. Именно таков характер трещиноватости, наблюдаемой при разрушении двухслойных моделей: они расчленяют материал на отдельные полигональные фрагменты. При разрушении, следующем классическому сценарию, материал, насыщаясь трещинами, тем не менее, полигональных структур в их развитой форме не образует. Способность материала к полигональному разрушению характерна для систем релаксирующих, в которых разрушение осуществляется за счет собственного энергетического потенциала, или для систем с независимым энергоснабжением. Это разрушение в рамках традиции обычно не рассматривается.

В деталях сравнение двух сценариев разрушения показывает следующее.

Трещины в двухслойной модели прорастают одноактно. Их прорастание сопровождается излучением упругого импульса. В картине разрушения не наблюдается случаев, когда бы образовавшиеся трещины укрупнялись. Они никогда не подставляют

друг друга по простиранию и не сливаются. Они не концентрируются со временем в каких-либо зонах или частях блока модельного материала, а, наоборот, со временем стремятся покрыть пространство модельного материала статистически равномерной сеткой. Наибольшие трещины, глобальные в масштабе блока материала, возникают не как завершение процесса разрушения, а в самом его начале. В период времени, предшествующий появлению этих трещин, какие-либо «сателитные» трещины, которые бы «готовили» появление трещин «магистральных», не наблюдалось.

Случаи «проскока» трещины через границу отдельности с ее продолжением в следующей отдельности практически отсутствуют. Этот эффект может быть объяснен просто. Каждая трещина разгружает энергетический потенциал в узкой зоне вдоль своих берегов. Поскольку каждая новая трещина черпает энергию, необходимую для ее развития, на пути ее распространения, то при вторжении в энергетически разгруженную область ранее возникшей трещины ее дальнейший рост прекращается. По этой же причине трещины не могут друг друга «подставлять» или друг с другом «сливаться».

4-5.2. Эффект «делимости»

Каждая исходная «материнская» отдельность в процессе последующего дробления расчленяется на две «дочерние» отдельности примерно пополам.

Этот эффект может быть объяснен следующим образом. Каждая из возникающих трещин разгружает энергетический потенциал в зоне своего динамического влияния. В результате поверхность поля потенциальной функции приобретает сложный рельеф, элементами которого являются своего рода «возвышенности», где ее значения наиболее велики, и «впадины», где ее значения понижены. Очевидно, что осевые части «возвышенностей», где рельеф потенциальной функции достигает своих частных максимумов, будут располагаться на наибольшем расстоянии от смежных трещин, т.е. посредине между ними. Поскольку энергетические условия наиболее выгодны для развития последующих трещин в осевых частях частных максимумов рельефа потенциальной функции, там они и возникают. Если расстояния между трещинами превышают ширину их зон влияния, образуя в рельефе потенциальной функции возвышенные плато, то последующая трещина может возникнуть не строго между предыдущими трещинами, а в любой части этого плато. В результате исходная

материнская отдельность может быть расчленена на не вполне симметричные отдельности.

Подводя итог сказанному, мы приходим к представлению, что возникшая трещина налагает запрет на появление других трещин в некоторой ее окрестности. Появление последующей трещины возможно только за пределами зоны влияния предыдущей трещины или, во всяком случае, там, где оно минимально. Этим автоматически предопределяется регулярный характер систем трещин, выдержанность определенных расстояний между трещинами в их субпараллельных системах или определенных размеров образующихся отдельностей.

Столь же естественным образом объясняется и парадокс блочной делимости земной коры, состоящий в том, что каждая отдельность, каждый блок отделены от своих соседей трещинами во всех трех пространственных измерениях. Если допустить, что объемные системы трещин отдельности возникают под действием внешних сил, то задача понять механизм того, как это делается, приобретает черты мистической загадки. Постановка этой проблемы и обзор безуспешных попыток ее разрешить приведены в работе [Земля..., 1974]. Между тем, если допустить, что образование таких систем трещин осуществляется за счет собственных энергетических ресурсов рассматриваемого объема материала, то механизм того, как это происходит, представляется простым до самоочевидности.

4-5.3. Закон перпендикулярности

Каждая трещина стремится подойти к границе той отдельности, в какой она зародилась, под прямым углом. Если при зарождении трещины она ориентирована по отношению к границе блока произвольным образом, то ее траектория затем корректируется таким образом, чтобы трещина подошла бы к границе блока по нормали. По этой причине трещины, первоначально отклонявшиеся от нормали, принимают слегка дугообразный вид.

Причину этого явления можно видеть в том, что именно такие траектории движения «предписывает» оптико-механическая аналогия. Если трещина прорастает в градиентном поле упругой энергии, то она стремится прорастать по линиям, соответствующим максимальному градиенту поля, – по нормали к изоэнергетическим поверхностям – «по линии ската воды». Вследствие этой особенности среда расчленяется на блоки «правильной» прямоугольной формы даже в случае всестороннего растяжения или всесторонней разгрузки. И хотя, исходя из принципа минимума

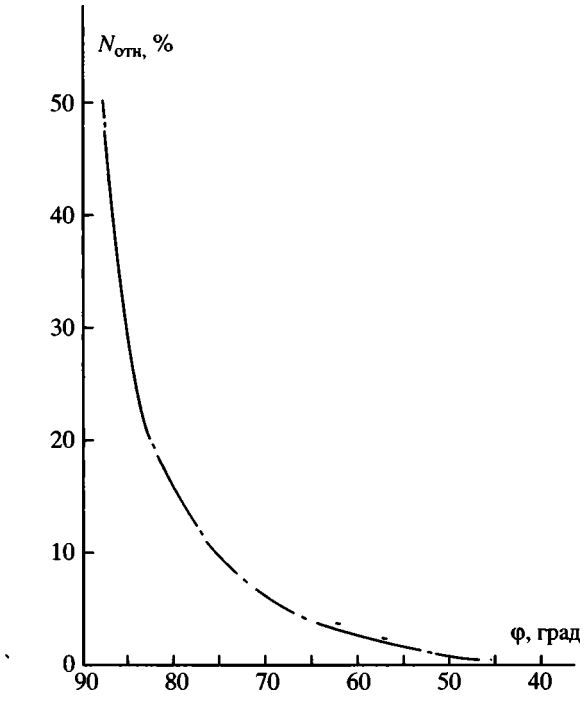


Рис. 4.7. Гистограмма распределения числа трещин в зависимости от угла их встречи

энергии, форма образующихся отдельностей может отличаться от тетрагональной, например пространство субстрата может быть заполнено шестиугольными фрагментами, вследствие указанной особенности преобладают все же отдельности, внутренние углы которых близки 90°.

Как это видно на рисунках 4.5; 4.6, главным структурным элементом, определяющим структурный мотив трещин отдельности, являются отдельности тетрагональной формы. Такая форма отдельностей, в свою очередь, предопределяется тем, что угол встречи трещин φ° тяготеет к 90°. По данным одного из опытов, из 1406 случаев встречи трещин на долю диапазона 60–90° приходится около 90% случаев, на долю диапазона 30–60° – около 10%. Встреча под меньшими углами почти отсутствует. В более дробной градации (по 10° в одном диапазоне) данные по этому опыту отражены гистограммой на рис. 4.7. Приведенные данные типичны и для других опытов разрушения круглых блоков модельного материала при их всестороннем растяжении.

4-5.4. Структурирующая роль трещин первой генерации

Для понимания закономерностей разрушения материала верхнего слоя при двухосном растяжении нижнего слоя вначале изучался характер перераспределения деформаций (напряжений) при образовании одиночной трещины. Для этого на поверхности блока устанавливали тензодатчики, которые в каждой точке регистрировали деформацию по трем взаимно перпендикулярным направлениям (рис. 4.8, [Кондратьев и др., 1985]). Блок подвергался равномерному двухосному растяжению, при котором деформации этого блока были далеки от предельных (разрушающих) значений. Разрушение блока осуществлялось искусственно, путем создания одиночных надрезов: блок с поверхности прорезался ножом примерно на треть его толщины, после чего в нем развивалась сквозная трещина за счет имеющихся напряжений.

Результаты проведенных наблюдений показали, что при появлении трещины, которая разделяет некоторый блок на две части,

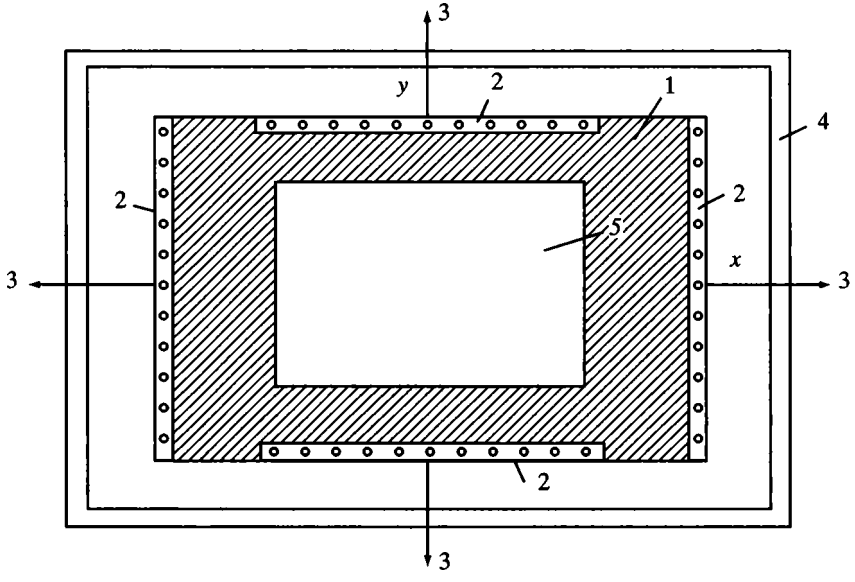


Рис. 4.8. Схема устройства двухслойной модели с двухосным растяжением [Кондратьев и др., 1985]

1 – лист вауумной резины; *2* – зажимы; *3* – домкраты; *4* – жесткая рама; *5* – верхний слой

происходит перераспределение деформаций (напряжений) в половинках, прилегающих к трещине, и в соседних блоках, причем в прилегающих половинках усиливается составляющая деформации, параллельная трещине, а в соседнем блоке происходит увеличение перпендикулярной составляющей. Соответственно, появление последующих трещин, уже самопроизвольное, будет параллельным первично заданной трещине или ей перпендикулярным.

Процесс последующего разрушения будет сопровождаться аналогичными перераспределениями напряжений и деформаций в каждом акте образования трещины, в результате чего и сформируются упорядоченные (преимущественно ортогональные) системы трещин. Таким образом, появление первичной случайно ориентированной трещины затем предопределяет структурный рисунок всей дальнейшей картины разрушения.

4-6. КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТРЕЩИН

В опытах по двухосному растяжению резиновой подложки энергия, расходуемая на работу по образованию трещин, в процессе разрушения не пополнялась, т.е. процесс разрушения блока по своему физическому существу представлял собой процесс релаксационный.

Процесс разрушения начинался с появления небольших маргинальных трещин преимущественно около углов и краев блока материала. После них возникала крупная трещина, которая разделяла блок на две части, сравнимые по размерам. Как правило, вслед за первой крупной трещиной появляются и другие крупные трещины, в результате чего начинается относительно более интенсивный процесс разрушения. Эти трещины на рис. 4.5 нанесены сплошными линиями. Цифры около трещин соответствуют порядковым номерам их появления.

В целом закон изменения числа трещин во времени является логарифмическим. Процесс разрушения блока можно разделить на два этапа, на каждом из которых зависимость числа трещин n от времени t в первом приближении можно представить формулой вида $n = A(\lg t - B)$.

4-6.1. Группирование трещин во времени

В работе [Кондратьев и др., 1985] приведены табулированные данные о значениях коэффициентов A и B в двух опытах, из которых видно, что на первом (начальном) этапе скорость образования трещин намного меньше, чем на втором. Второй этап основной. Он может быть разбит на более мелкие участки, которые различаются скоростями образования трещин. Процесс образования трещин идет своеобразными импульсами: с появлением некоторой трещины скорость резко возрастает, в результате чего за сравнительно короткий отрезок времени образуется серия трещин. Далее наступает относительное затишье, в течение которого трещины совсем не образуются либо их появляется мало. Период затишья сменяется новым периодом активизации трещинообразования, за которым следует новая пауза, и т.д. В целом весь второй этап разрушения, который начинается с образования крупных магистральных трещин, можно рассматривать как период активного разрушения, который сменяет первый этап относительно медленного разрушения.

4-6.2. Стадии развития разрушения

Развитие разрушения во времени обычно многостадийно. В развитии пластической деформации выделяются четыре периода: инкубационный, торможения, квазистационарный, самоускоряющийся. Первые три периода докритические, четвертый закритический (ускорение положительно и не убывает) [Фридман, 1960].

Представление о четырех кинетических периодах разрушения, к которому приводит развитие в твердых телах пластической деформации, имеет широкое распространение. В качестве еще одного примера приведем более позднюю работу [Павлова, 1970]. В ней выделены инкубационный, или начально-ускоренный, период; торможения, в процессе которого происходит структурное упрочнение; стационарный, обусловленный взаимодействием встречных процессов упрочнения и разупрочнения, что приводит к равномерному развитию процесса; ускоренный, протекающий в стадии разупрочнения материала при непрерывном увеличении скорости процесса вплоть до разрушения.

Заметим, что указанная четырехстадийная схема развития процесса разрушения разработана, во-первых, к случаю разрушения твердых тел внешним силовым воздействием и, во-вторых, к случаю разрушения тел пластичных. За этой схемой стоит

эмпирический материал, полученный при изучении разрушения металлов. Что же касается энергонасыщенных сред, то они разрушаются за счет собственных запасов упругой энергии, притом в силу только своей энергонасыщенности разрушаются хрупко. Поэтому в разрушении энергонасыщенных материалов указанная стадийность проявляется нечетко, в вырожденном виде. Обычно при этом с определенностью выделяются только два периода: инкубационный и закритический. Стационарный рост трещины без ускоряющейся завершающей стадии можно наблюдать в материалах с невысоким уровнем запасенной энергии либо в очень пластичном материале. Каких-либо данных о стадии упрочнения в энергонасыщенных телах у нас нет. При разрушении модельного материала в двухслойной модели уверенно можно говорить только о двух стадиях: об инкубационном периоде и о стадии динамического прорастания трещины.

4-6.3. Инкубационный период

Инкубационный период в особенности отчетливо проявляется в виде задержки времени между пусковым импульсом и началом макроскопически выраженного разрушения. Это эффект регулярный, наблюдающийся во многих случаях. Приведем несколько характерных примеров.

При самопроизвольном разрушении глыб породы, добытых при проходке Симплонского туннеля, оно происходило спустя какое-то время после их выемки уже в отвалах. В работе [Остаточные..., 1957] приведен случай, когда стальные шарикоподшипники, подверженные тяжелым повторным ударам при полировке в барабане, вследствие появления в них значительных деформационных латентных напряжений, спустя некоторое время после удаления их из машины раскалываются, как от взрыва. Зиннер указывает на факт распада головки снаряда спустя некоторое время после пробивания брони. Ряд эффектных примеров разрушения с задержкой времени после пика инициирующего воздействия приведены в работе [Остаточные..., 1957]. Один из них – взрывообразное разрушение свободно лежащей стальной балки спустя сутки после огневой резки ее торцов. Другой случай – разрушение моста в Хассельте (Бельгия) спустя несколько дней после экстренной нагрузки. Как уже отмечалось, задержки времени, предваряющие разрушение, наблюдались и на двухслойных моделях.

Факторы, влияющие на длительность времен задержки при разрушении энергонасыщенных сред, не изучены. Можно было

бы высказать некоторые более или менее конструктивные соображения на этот счет, однако этот вопрос требует более основательного изучения, поскольку он может иметь принципиальное значение для понимания целого ряда особенностей сейсмического режима.

Один пример. При изучении тонкой структуры сейсмического режима в период времени, предшествующий появлению сильных землетрясений, было выяснено, что вблизи будущих очагов этих землетрясений их появлению предшествуют локальные аномально интенсивные всплески активности слабых землетрясений. Такие всплески названы были *предвестниковыми роями*. Изучение показало, что рои наблюдаются перед подавляющим большинством больших землетрясений, однако времена задержки между появлением предвестникового роя и последующего сильного толчка лежат в пределах от нескольких до многих месяцев. В ряде случаев наблюдались очень интенсивные рои, активность которых постепенно нарастала вплоть до главного толчка без заметной задержки времени. При этом выяснилось одно интересное обстоятельство: в геологических структурах, сложенных более консолидированными породами, времена задержки больше, а сами рои более компактны во времени и пространстве. В сравнительно же рыхлых осадочных мезозойских отложениях активность предвестниковых роев длилась вплоть до появления главного толчка (с точностью, определяемой статистической представительностью материала), сами же рои были «размазанней» во времени и пространстве [Тейтельбаум, Пономарев, 1980].

Известно, что сильные землетрясения часто сопровождаются всплесками активности слабых землетрясений на больших расстояниях от их очаговых зон. Такие всплески называют «удаленными афтершоками». В местах их появления спустя некоторое время возникает следующее большое землетрясение. В этом отношении удаленные афтершоки играют роль предвестникового роя.

4-7. СТАТИСТИКИ ПРОЦЕССА ФРАГМЕНТАЦИИ

Картина разрушения на двухслойной модели от опыта к опыту, какие бы меры ни предпринимались к выдержке сходства начальных условий в проведении опытов, получается разной в том смысле, что буквальное повторение одного и того же рисунка в двух опытах невозможно. Но вместе с тем статистики, отражающие процесс фрагментации в разных опытах, поставленных по

одному сценарию, обладают сходством, притом значительным. При обязательных индивидуальных различиях структурных рисунков на уровне принадлежности к одной серии опытов сходство их статистик велико.

Основной статистической характеристикой делимости (дробления, фрагментации) материала является распределение числа структурных элементов, образующихся при дроблении, по их величине. В качестве характеристик структурных элементов фрагментированного материала использовались длина трещин l, площадь отдельностей S и средний размер отдельностей $\lambda = \sqrt{S}$. Качественно сходный вид со статистиками, представленными этими характеристиками, имеют и статистики, в которых вместо величины структурных элементов берутся другие характеристики, например энергия упругих импульсов, излучаемых при образовании трещин.

Распределение числа фрагментов отдельностей геологической среды, образовавшихся естественным путем, в зависимости от их величины чаще всего подчиняется одному из двух видов статистик: *логарифмически нормальному распределению* или *закону повторяемости*.

График первой закономерности в координатах «число частиц–логарифмы размеров частиц» имеет колоколообразную форму. Интерес к ней возник в 30-е гг. XX в., после того как Н.К. Разумовский привел ряд случаев, в которых логарифмы размеров частиц (например, золотин в золотоносных россыпях) подчиняются нормальному закону. А.Н. Колмогоров, рассмотрев общую схему процесса последовательного дробления частиц, установил существование такого закона теоретически.

График второй закономерности в двойных логарифмических координатах выглядит прямой линией. Закон повторяемости в обобщенном виде отражает иерархическую структуру самых разных сообществ. Ему подчиняется распределение числа звезд по их величине, числа землетрясений в зависимости от их энергии. С.Д. Виноградов [1989] обнаружил, что этой универсальной статистике соответствует распределение сейсмических импульсов, излучаемых твердым телом при его нагружении, а М.В. Гзовский показал, что этим же законом описывается зависимость между количеством трещин, обнаруженных в обнажениях, и их протяженностью.

Связаны каким-то образом между собой эти статистики или нет? Почему в одних случаях статистики разрушения следуют закону повторяемости, а в других – логарифмически нормальному

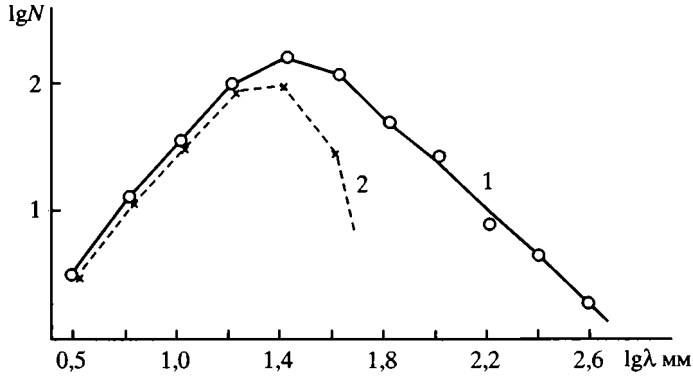


Рис. 4.9. Распределение числа фрагментов разрушения в зависимости от их размеров

распределению? Имеет ли график повторяемости ограничение слева, или он прямолинейно уходит в область микромира? Эти вопросы были дежурными в прениях на симпозиумах и совещаниях, посвященных изучению сейсмического режима уже по одной той причине, что закон повторяемости является важнейшей характеристикой сейсмического режима. Она, в частности, заложена в основу метода количественного сейсмического районирования. Опыты на двухслойных моделях позволили ответить на эти вопросы исчерпывающим образом.

Эмпирическое распределение, представленное на рис. 4.9 кривой 1, построено по сумме всех структурных элементов, возникших в процессе разрушения круглого блока модельного материала от начала разрушения до той стадии, на которой оно было приостановлено. Условно распределения такого типа можно назвать распределениями с «памятью».

Кривая 2 соответствует картине дробления, зафиксированной на последнем кадре отснятого на кинопленку процесса дробления. Распределения такого типа могут быть получены по отношению к любому другому кадру. В дальнейшем распределения этого типа будем называть «мгновенными». Из приведенных распределений «с памятью» видно, что экспериментальные точки в его правой части довольно хорошо аппроксимирует прямая линия, так как в области относительно больших значений λ распределение $\lg N$ ($\lg \lambda$) подчиняется закону повторяемости.

Сопоставление «мгновенных» эмпирических распределений с теоретическими показало, что первые соответствуют нормальному и логарифмически нормальному распределениям. При этом

оказалось, что чем более неоднородной была толщина слоя, т.е. чем более неоднородно разрушался слой, тем эмпирическое распределение лучше аппроксимировало логарифмически нормальное распределение, а при возрастании степени однородности разрушения – нормальное распределение. Причину этого можно видеть в том, что в неоднородном материале разрушение протекало в одно и то же время в разных частях модели частично на разных стадиях. Если «мгновенное» эмпирическое распределение близко к нормальному, то оно представлено практически одним этапом дробления во всех частях блока модельного материала. В случае же близости эмпирического распределения к логарифмически нормальному оно представлено набором отдельностей нескольких неполно выраженных этапов дробления. Распределение же «с памятью» указывает этап, до которого дошел процесс дробления. В целом же существование ниспадающей левой ветви эмпирических распределений обоих типов свидетельствует о развитии процесса дробления по схеме развития процесса разрушения «от больших трещин к малым». Связь между рассмотренными статистиками очевидна: «мгновенной» картине процесса соответствует логарифмически нормальное распределение, а картине, обобщенно отражающей тот же процесс дробления, но развернутый во времени, – закон повторяемости. Последний, таким образом, соответствует случаю, когда эмпирическая совокупность данных отвечает фрагментам разных стадий дробления.

Закону повторяемости будут подчиняться и совокупности данных, отражающих разные стадии дробления, развернутые не во времени, а в пространстве (например, при распространении процесса разрушения по схеме бокового наращивания) [Кулюкин и др., 1983б].

Столь же очевидно, что график повторяемости, отражающий иерархическое сообщество отдельностей, образовавшихся при развитии разрушения по схеме «от больших трещин – к малым», имеет четкое ограничение слева: предел раздробленности материала определяется точкой перегиба графика. Чем больше затрачивается работы на разрушение материала в данном процессе, тем точка левее и выше.

Минимальные расстояния между трещинами отдельности в скальных обнажениях обычно составляют от нескольких сантиметров до нескольких десятков метров. Количество трещин с расстоянием между ними порядка сантиметров или долей сантиметра резко сокращается, или же такие трещины отсутствуют вовсе. Удельное количество трещин, приходящееся на единицу пространства (их плотность), определяется (при прочих равных

условиях) энергетическими возможностями процесса, вызвавшего разрушение. Эта закономерность открывает возможности для анализа энергетики процессов образования различных систем трещин, например систем планетарных трещин. Более густые сети трещин с меньшими расстояниями между ними, чем наблюдаемые, говорят о существовании предела энергетического ресурса, необходимого для образования трещин. Если построить распределение числа планетарных трещин геологической среды в зависимости от их протяженности подобно тем распределениям, которые получил М.В. Гзовский для тектонических трещин, то это распределение будет иметь резкий загиб слева. В область микромира оно не продлится.

Как в таком случае объяснить, что сетки трещин отдельности вновь появляются в том же объеме породы на микроскопическом уровне? Видимо, на микроуровне энергоснабжение процесса разрушения осуществляется за счет процессов другой природы. Во всяком случае график закона повторяемости не уходит прямолинейно в область микромира. В нем появляется «зияние» в области трещин с длиной порядка сантиметров и миллиметров.

Следуя логике изложения, можно предположить, что системы трещин отдельности, формирующие блоковую делимость земной коры, определяются не одним «трансмасштабным» процессом, а несколькими процессами разной природы, каждый из которых действует в своей масштабной области. При этом график закона повторяемости на границах масштабного определения разных процессов испытывает «изломы», «скачки», «провалы» или иные нарушения его прямолинейности. Исследования тонкой структуры такого рода эмпирических статистик показывают, что такие «особые точки», нарушающие монотонность закона повторяемости в определенном пространственном ритме, действительно существуют [Пономарев, Ромашов, 1994].

Распределение числа отдельностей по их размерам представляет интерес не только для сейсмологии. Характеристика массива пород по размерам составляющих его блоков считается важной для инженеров-геологов и геологов-нефтяников [Ривз и др., 1994]. Соответствующие изыскания показывают, что частость шага трещин отдельностей может быть описана разными законами распределения: логарифмически нормальным, отрицательным экспоненциальным или в более редких случаях нормальным. «Почему в одном случае имеет место одно распределение, а в ином другое – остается необъяснимым» (с. 328). Причиной этого может быть специфика методик, используемых при подготовке массивов данных соответствующих измерений, и различные

условия формирования систем трещин. В последнем случае использование результатов, касающихся кинетики образования систем трещин по схеме фрагментации, может иметь для решения означенной проблемы ведущее значение.

4-8. ДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ

Под динамическим разрушением будем понимать разрушение, в процессе которого излучаются упругие импульсы. Явления, которые сопровождаются излучением упругих импульсов, относят к динамическим.

Характеристики излучаемых упругих волн – их периоды, частоты, амплитудные характеристики и структура волновых пакетов – зависят от мощности импульсов и условий их возбуждения. Соответственно, различают целый ряд частных случаев. Так, импульсы, излучаемые нагруженным образцом породы, называют акустической эмиссией, сейсмические шумы, излучаемые породами в окрестности горных выработок, – шумностью пластов, волны, возбуждаемые землетрясениями или взрывами, – сейсмическими. К динамическим явлениям относят шелушение горных пород, их стреляние, микроудары и горные удары, шахтные землетрясения – «толчки» и, наконец, землетрясения.

Существует громадное количество работ, посвященных разрушению под действием химических или ядерных взрывов, а также при динамическом, ударном приложении внешних нагрузок. Однако здесь нас будет интересовать динамическое разрушение, которое возникает самопроизвольно и осуществляется за счет запасов энергии, которая содержится непосредственно в субстрате разрушаемой твердотельной системы. Такое разрушение может быть названо *релаксационным*. Во всяком случае, такова его физическая природа.

Особенности динамического разрушения мы изучали на двухслойных моделях с жестким основанием, устройство которых рассматривали выше.

4-8.1. Пороговый эффект

Первая трещина в модели, очевидно, зарождается на одной из неоднородностей, которые наиболее вероятны на краю остывающего диска. Она может быть инициирована также ударом (уколом). Далее модель разрушается уже в самопроизвольном режиме, при котором каждая предыдущая трещина обеспечивает

такое перераспределение напряжений, при котором становится неизбежным возникновение последующей. Однако такое лавинообразное разрушение становится возможным только в том случае, если диск, хотя уже и твердый, остынет до некоторой пороговой температуры, при которой он переходит в энергонасыщенное состояние. Таким образом, переход системы в энергонасыщенное состояние определяется тем, что определяющий параметр системы достигает некоторого порогового значения.

Подчеркнем: граница между неэнергонасыщенным и энергонасыщенным состояниями не постепенна, а по достижении температуры порогового значения изменяется скачком. Такое скачкообразное изменение свойств системы при определенном значении ее определяющего параметра далее мы будем называть *пороговым эффектом*. Соответственно, скачком изменяется и характер поведения сред, находящихся в этих разных состояниях.

4-8.2. Метастабильное состояние

В промежутке между пороговой температурой и предельной температурой, при которой материал модели взрывается самопроизвольно, состояние системы *метастабильное*. Его можно сравнить с состоянием перенасыщенного раствора или переохлажденной жидкости. В таком метастабильном состоянии система становилась особо чувствительной к различным инициирующим воздействиям, в том числе и весьма слабым.

Количество трещин, возбуждаемых во «взрывоопасном» интервале температур, различно. Оно тем больше, чем до более низкой температуры охлаждается модель. По мере охлаждения модельный материал взрывается все более динамично, с образованием все большего количества фрагментов разрушения. Разрушение становится все более «бризантным».

Механизм перераспределения напряжений, возбуждаемого появлением трещины, видится в следующем.

Ранее на примере моделей с эластичным основанием было установлено, что при образовании первой трещины материал блока разгружается лишь в узкой зоне, прилегающей к берегам образовавшейся трещины, в зоне ее разгрузки. При этом происходит не только разгрузка напряжений в этой зоне, но и перераспределение деформаций в ее окрестности, причем напряжения достигают максимума на некотором удалении от трещины, где и становится возможным появление следующей трещины, субпараллельной первой. Та же ситуация репродуцируется появлением следующей трещины и т.д., создавая в материале своего рода

волну разрушения. Если же общий уровень энергии в системе недостаточен, то первая трещина, перераспределяя напряжения в своей окрестности, новых трещин не порождает.

Это в опытах и наблюдалось.

На рис. 4.10 (линия 1) показана зависимость трещиноватости слоя от времени, прошедшего с момента заливки модели. Трещиноватость определялась как число магистральных трещин, которые пересекают диаметр модели. Данные были получены на

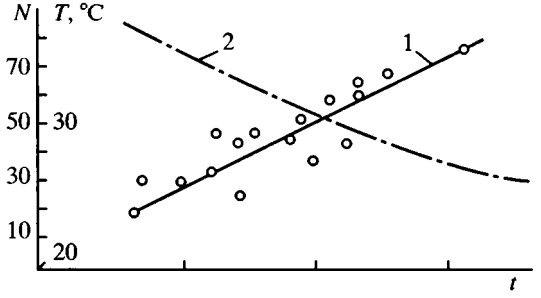


Рис. 4.10. Зависимость числа фрагментов разрушения от температуры модели в момент разрушения

1 – разброс экспериментальных значений относительно среднего значения; 2 – изменение температуры в зависимости от времени

моделях диаметром 255 мм при толщине слоя 2–3 мм. Зависимость была получена в серии опытов, в которых разрушения инициировались слабым ударом (уколом) по краю модели. Линия 2 отражает изменения температуры поддона, на который заливалась канифоль. Хотя значения температур поддона и слоя канифоли могут отличаться, вероятней всего, что ход их изменений примерно одинаков. Из сравнения приведенных графиков видно, что взрывное разрушение модели наблюдается при 37–27 °С при комнатной температуре 18–19 °С. До более низких температур модель «не доживает», самопроизвольно разрушаясь. В дальнейшем, по мере охлаждения, происходит дополнительное самопроизвольное дробление крупных фрагментов, своего рода «целиков», сохранившихся на первом, основном этапе разрушения.

Что касается верхней температурной границы, то она, очевидно, определяется уровнем запасенной энергии. Попытки разрушить модель на более ранней стадии приводят лишь к появлению одиночных трещин.

Изложенные условия перехода разрушения в его динамическую форму связаны с тем, что «точка» около 37 °С определяет нижний предел латентной энергии, запасенной системой, при достижении которого материал блока становится энергонасыщенным. При более высокой температуре материал находится в своем «обычном», квазиравновесном состоянии. Процесс разру-

шения на этой стадии опыта подчиняется традиционной схеме. Однако по достижении порогового значения плотности энергии в системе, определяемого температурой около 37 °С, картина разрушения скачкообразно и коренным образом изменяется. Далее оно уже протекает динамично, с дезинтеграцией материала на множество отдельных фрагментов, с практически одновременным образованием в каждом опыте не менее 15 магистральных трещин.

Состояние материала во «взрывоопасном» интервале является метастабильным. В этом состоянии материал, хотя и не разрушается самопроизвольно, становится очень чувствительным к различного рода инициирующим воздействиям. Обращает на себя внимание то, что способность сейсмического отклика среды на слабые воздействия – «тензочувствительность», как иногда определяют эту способность в геофизике, является характернейшей особенностью природного сейсмического процесса и сейсмичности, наведенной различными техногенными воздействиями. Она свидетельствует о метастабильном состоянии геологической среды в местах ее проявления. К обсуждению этого явления мы возвратимся в главе 6.

4-8.3. Структуры динамического разрушения

Картину разрушения определяют два основных вида трещин хрупкого отрыва: магистральные и боковые.

Магистральные трещины начинаются на одном из периферийных участков модели и затем прорастают, ветвясь, до противоположного края модели. Они более или менее равномерно заполняют блок материала по всей его поверхности.

Боковые трещины образуются на магистральных, как мелкие веточки на более крупных ветвях дерева. В результате поверхность блока покрывается статистически равномерной сеткой трещин отдельности, расчленяющей материал на близкие по размерам фрагменты.

Картина разрушения в ее общих чертах следует сценарию фрагментации, уже рассматривавшемуся выше на примере двухслойных моделей с эластичным основанием. Однако она обладает и определенной спецификой, которая обусловлена динамическим, взрывообразным разрушением модельного материала. Эта специфика выражается в следующем.

Основным отличием картины динамического разрушения модельного материала в моделях с жестким основанием, в процессе которого трещины возникают «залпом», от разрушения на

моделях с эластичным основанием, когда возникновение трещин разделено большими промежутками времени, состоит в ветвлении трещин в процессе их развития.

Явление ветвления динамично развивающихся трещин, наблюдаемое в самых различных материалах, его физика, а также история изучения этого явления рассмотрены в работе [Финкель, 1970]. Здесь мы лишь заметим, что тенденция к ветвлению проявляется в том случае, если скорость развития трещины становится соизмеримой со скоростью распространения упругих волн в данном материале. Качественная схема формирования боковых трещин приведена в работе [Пономарев и др., 1995].

Магистральные трещины частью прорастают от участка, на котором было инициировано разрушение, но частью – через развитие боковых трещин. Обращает на себя внимание довольно равномерное расположение боковых трещин вдоль каждой магистральной трещины. В целом сетка трещин напоминает куст, разросшийся от исходной точки, причем трещины стремятся покрыть блок материала статистически равномерно, как это имело место и в отношении картины разрушения, наблюдаемой при последовательном возникновении одиночных трещин. Механизм фрагментации в сравниваемых двух случаях был разным, но цель процесса, если так можно выразиться, в обоих случаях была одной и той же: покрыть пространство материала статистически равномерной сеткой трещин отдельности.

4-8.4. Двухслойная модель с жестким основанием как энергетический преобразователь

Модели с жестким основанием являются наглядной иллюстрацией того, что причиной появления напряжений в системе может служить не механическое воздействие, а протекающий в ней физический процесс, в данном случае ее охлаждение. По существу модель представляет собой очень просто устроенный энергетический преобразователь. Однако принцип его действия дает повод к размышлению.

Зададимся вопросом: какой вид энергии переходит при охлаждении модели в потенциальную энергию ее упругих фиксированных деформаций? Ответ, казалось бы, очевиден: тепловая энергия. Однако процесс охлаждения – это убыль тепловой энергии в системе: она диссипирует, рассеивается в окружающем пространстве, а вовсе не поглощается веществом модели. Вещество ее излучает. Мы становимся перед нонсенсом: в упругую энер-

гию преобразуется дефицит тепловой энергии – энергия, так сказать, с отрицательным знаком. Вещество модели становится энергонасыщенным за счет понижения энергии системы.

Попытаемся разобраться с этой проблемой на примере столь же простой двухслойной системы: биметаллической пластинки. Такие пластинки широко применяются в тепловых реле, в частности в бытовых холодильниках. В механике их называют биметаллическими термостатами.

Термостат состоит из двух прочно без проскальзывания скрепленных между собой пластинок с разными модулями теплового расширения. При номинальной окружающей температуре напряжения в системе пластинок отсутствуют. Однако при любом отклонении температуры от номинальной биметаллическая пластинка изгибается: при охлаждении в одну сторону, при нагревании в противоположную. Если при этом жестко зафиксировать пластинку, не давая ей возможности свободного изгиба, в ней возникнут весьма значительные напряжения. Таким образом, напряжения в системе есть результат ее отклонения от равновесного состояния, в данном случае вследствие изменения одного из ее внешних параметров – температуры. Знак изменения параметра, если это изменение не влияет существенно на свойства материала, значения не имеет. Отклонения параметра от номинала, т.е. от условий, при которых система была создана, влечет за собой и отклонение системы от состояния равновесия, а следовательно, и появление в системе латентной энергии, которая, собственно, и является мерой этого отклонения. Если отклонение от состояния равновесия происходит за счет убыли энергии, которую обеспечивают значения определяющего параметра, упругая энергия системы будет возрастать.

Пример модели приводит к другому заключению, не менее важному для понимания природы процессов, протекающих в твердотельных системах: уровень энергии в системе сам по себе еще не является условием ее перехода в неравновесное состояние. Для этого необходимо, чтобы в поле энергии возникли градиенты энергии или области, оконтуренные зонами с достаточно большими ее градиентами.

Пример модели показывает, что упругая энергия в системе возникла не вследствие внешнего силового воздействия на систему, как это было в случае моделей с эластичным основанием, а явилась следствием *физического* процесса – ее охлаждения. К тем же следствиям могут вести практически любые физические, химические или механические процессы, которые влекут за собой неоднородные деформации отдельных частей системы.

Другими словами, системы с неоднородной реакцией их структурных составляющих на изменения внешних условий представляют собой энергетические преобразователи, в которых происходит преобразование энергии различных видов в латентную энергию.

Выше мы говорили о том, что разрушение двухслойных моделей *имитирует* разрушение энергонасыщенных тел, поскольку внешние силы сообщают им энергию по схеме независимого (параллельного в данном случае) энергоснабжения. В двухслойных моделях с жестким основанием мы имеем примеры систем, которые запасают упругую энергию непосредственно в форме латентной энергии вплоть до перехода этих систем в энергонасыщенное состояние. Двухслойные природные системы организованы именно по принципу устройства моделей с жестким основанием, состоящем в структурном единстве частей, разнородных по своим свойствам или по природе протекающих в них процессов.

Пример модели иллюстрирует, почему мы ввели представление о фиксированных упругих деформациях вместо того, чтобы использовать принятое представление о наследственной упругости: эффекты последействия в системе традиционно рассматриваются как реакция среды на снятую внешнюю нагрузку. В случае же двухслойных моделей с жестким основанием внешней силовой нагрузки нет. Упругие фиксированные деформации возникают в системе вследствие разнородных деформаций составляющих ее частей, по мере охлаждения системы подрастают до критических значений и далее снимаются в процессе структурной дезинтеграции системы. Налицо процесс, который трудно вогнать в традиционную схему без аберраций, в корне искажающих его физический смысл.

Опыты на двухслойной модели с жестким основанием демонстрируют следующие важнейшие свойства твердых сред в их энергонасыщенном состоянии.

Во-первых, причиной повышенного содержания латентной энергии в твердой среде, обеспечивающего динамический характер ее разрушения, могут быть и немеханические процессы.

Во-вторых, переход в энергонасыщенное состояние происходит нелинейно, скачком. При этом механические свойства среды резко изменяются.

В-третьих, в энергонасыщенном состоянии среда становится метастабильной и особо чувствительной к внешним воздействиям.

В-четвертых, степень фрагментации материала, возникающей в процессе его энергетической разгрузки, тем выше, чем выше уровень его исходной энергонасыщенности.

гию преобразуется дефицит тепловой энергии – энергия, так сказать, с отрицательным знаком. Вещество модели становится энергонасыщенным за счет понижения энергии системы.

Попытаемся разобраться с этой проблемой на примере столь же простой двухслойной системы: биметаллической пластинки. Такие пластинки широко применяются в тепловых реле, в частности в бытовых холодильниках. В механике их называют биметаллическими термостатами.

Термостат состоит из двух прочно без проскальзывания скрепленных между собой пластинок с разными модулями теплового расширения. При номинальной окружающей температуре напряжения в системе пластинок отсутствуют. Однако при любом отклонении температуры от номинальной биметаллическая пластинка изгибается: при охлаждении в одну сторону, при нагревании в противоположную. Если при этом жестко зафиксировать пластинку, не давая ей возможности свободного изгиба, в ней возникнут весьма значительные напряжения. Таким образом, напряжения в системе есть результат ее отклонения от равновесного состояния, в данном случае вследствие изменения одного из ее внешних параметров – температуры. Знак изменения параметра, если это изменение не влияет существенно на свойства материала, значения не имеет. Отклонения параметра от номинала, т.е. от условий, при которых система была создана, влечет за собой и отклонение системы от состояния равновесия, а следовательно, и появление в системе латентной энергии, которая, собственно, и является мерой этого отклонения. Если отклонение от состояния равновесия происходит за счет убыли энергии, которую обеспечивают значения определяющего параметра, упругая энергия системы будет возрастать.

Пример модели приводит к другому заключению, не менее важному для понимания природы процессов, протекающих в твердотельных системах: уровень энергии в системе сам по себе еще не является условием ее перехода в неравновесное состояние. Для этого необходимо, чтобы в поле энергии возникли градиенты энергии или области, оконтуренные зонами с достаточно большими ее градиентами.

Пример модели показывает, что упругая энергия в системе возникла не вследствие внешнего силового воздействия на систему, как это было в случае моделей с эластичным основанием, а явилась следствием *физического* процесса – ее охлаждения. К тем же следствиям могут вести практически любые физические, химические или механические процессы, которые влекут за собой неоднородные деформации отдельных частей системы.

Другими словами, системы с неоднородной реакцией их структурных составляющих на изменения внешних условий представляют собой энергетические преобразователи, в которых происходит преобразование энергии различных видов в латентную энергию.

Выше мы говорили о том, что разрушение двухслойных моделей *имитирует* разрушение энергонасыщенных тел, поскольку внешние силы сообщают им энергию по схеме независимого (параллельного в данном случае) энергоснабжения. В двухслойных моделях с жестким основанием мы имеем примеры систем, которые запасают упругую энергию непосредственно в форме латентной энергии вплоть до перехода этих систем в энергонасыщенное состояние. Двухслойные природные системы организованы именно по принципу устройства моделей с жестким основанием, состоящем в структурном единстве частей, разнородных по своим свойствам или по природе протекающих в них процессов.

Пример модели иллюстрирует, почему мы ввели представление о фиксированных упругих деформациях вместо того, чтобы использовать принятое представление о наследственной упругости: эффекты последействия в системе традиционно рассматриваются как реакция среды на снятую внешнюю нагрузку. В случае же двухслойных моделей с жестким основанием внешней силовой нагрузки нет. Упругие фиксированные деформации возникают в системе вследствие разнородных деформаций составляющих ее частей, по мере охлаждения системы подрастают до критических значений и далее снимаются в процессе структурной дезинтеграции системы. Налицо процесс, который трудно вогнать в традиционную схему без аберраций, в корне искажающих его физический смысл.

Опыты на двухслойной модели с жестким основанием демонстрируют следующие важнейшие свойства твердых сред в их энергонасыщенном состоянии.

Во-первых, причиной повышенного содержания латентной энергии в твердой среде, обеспечивающего динамический характер ее разрушения, могут быть и немеханические процессы.

Во-вторых, переход в энергонасыщенное состояние происходит нелинейно, скачком. При этом механические свойства среды резко изменяются.

В-третьих, в энергонасыщенном состоянии среда становится метастабильной и особо чувствительной к внешним воздействиям.

В-четвертых, степень фрагментации материала, возникающей в процессе его энергетической разгрузки, тем выше, чем выше уровень его исходной энергонасыщенности.

4-8.5. Процессы с обратной отрицательной связью

Общим местом в теории процессов является то, что движение к равновесию в системе по ее разным параметрам может достигаться с разной скоростью, так что система, близкая к равновесию по одним ее параметрам, может оставаться сильно неравновесной по другим параметрам. Вместе с тем при разной скорости направленность процессов одна: достижение равновесного состояния.

Модель с жестким основанием демонстрирует особый случай, когда движение к равновесию системы по одному параметру провоцирует возрастающее нарушение ее равновесия по другому параметру: остывание модели после заливки расплава канифоли, т.е. релаксация системы по параметру температуры, симметрично сопровождается ростом латентных напряжений. Можно было бы сказать, что в данном случае тепловая энергия преобразуется в энергию упругих деформаций. Однако процесс роста упругих деформаций – приращение латентной энергии системы – происходит в условиях диссипации тепловой энергии в окружающее пространство, т.е. при уменьшении суммарной энергии системы. Можно сказать так: убыль энергии в системе по одному параметру сопровождается ее ростом по другому параметру. Так что, строго следуя факту, мы должны высказать абсурдное с физической точки зрения предположение, согласно которому в латентную энергию преобразуется не тепловая энергия, а все возрастающий ее дефицит – энергия, так сказать, взятая с ее отрицательным знаком. На примере двухслойной модели с жестким основанием можно видеть, как охлаждение модели, т.е. потеря ее суммарной энергии, переводит модельный материал в энергонасыщенное состояние. Процесс охлаждения может создать в субстрате системы столь значительный собственный энергетический потенциал, что он может стать причиной самопроизвольного взрывообразного разрушения модели.

Продолжим рассуждение о возможной природе этого парадоксального явления на примере уже обсуждавшейся выше двухслойной системы – биметаллического термостата. Как отмечалось, система состоит из двух жестко, без проскальзывания, соединенных между собой металлических пластин с разными коэффициентами температурного расширения. При *номинальной температуре*, т.е. температуре, при которой термостат был сделан, напряжения в нем отсутствуют. Он находится в состоянии, которое практически можно считать равновесным. В любом же случае дальнейшего отклонения температуры системы от номи-

нала независимо от знака отклонения в ней появятся тепловые латентные напряжения, которые могут изогнуть биметаллическую пластину. Различия лишь в том, что при нагревании пластины она изгибается в одну сторону, а при охлаждении – в другую. Таким образом, притекает ли энергия в систему или она из системы истекает, фактором, определяющим ее состояние, является не прирост или убыль энергии в ней сам по себе, а ее отклонение от номинала, т.е. от условий, при которых система была образована. Возможность механических процессов в системе определяет не уровень энергии системы, а отклонение системы от равновесия с вмещающим пространством.

Энергию понимают как потенциал системы, за счет которого она может выполнить определенную работу. Но, в свою очередь, мерой этого потенциала является отклонение системы от равновесия. Система не обязательно достигает равновесия при убыли энергии. Если повышение энергии в системе направлено на восстановление ее равновесия, то по мере поступления энергии в систему процессы в ней будут затухать. (Если, например, биметаллическая пластинка изогнулась вследствие понижения температуры, то нагревание пластинки – сообщение ей тепловой энергии – будет способствовать ее переходу в ненапряженное состояние). В терминах силовой механики движение к равновесию представляет собой стремление девиаторных напряжений к нулю. Если девиаторные напряжения в системе отсутствуют, механические процессы в ней становятся невозможны. При этом изотропная составляющая напряжений может быть сколь угодно большой.

Так что, несмотря на элементарную простоту модели с жестким основанием, а отчасти именно поэтому, она может служить отправной точкой для понимания динамики взаимодействия процессов, протекающих в неравновесных системах. Модель демонстрирует тот факт, что переход системы к равновесию по одному параметру – ее температуре – может сопровождаться прогрессирующим нарушением равновесия по другому ее параметру – содержанию упругой энергии. Или, переходя к общей формулировке, переход системы к равновесию по одному параметру может сопровождаться прогрессирующим нарушением равновесия по другому ее параметру. Это явление мы далее будем обозначать как *отрицательное динамическое взаимодействие системно связанных процессов*, или, коротко, как *встречные процессы*.

Как бы мы не объясняли эту особенность поведения реальных систем, выраженную противоположными тенденциями в их движении к равновесию по различным параметрам, это – эмпи-

рическая данность, которая существует независимо от наших рассуждений. Мы же уделили здесь внимание этому явлению по той причине, что ситуации, когда движение к равновесию по одному параметру симметрично сопровождается прогрессирующим нарушением равновесия по другим параметрам, в геологических ситуациях являются штатными.

В качестве примера кратко коснемся существа представлений о возможной тектонической роли изостатических систем, изложенных в работе [Пономарев, Тейтельбаум, 1978]. В ней предпринята попытка построения изостатической модели, учитывающей встречно направленные преобразования, сообщающие природной системе свойства систем, которые в биологии определяют как гомеостатические.

Цепочка последовательных парагенетических процессов выглядит следующим образом. Процессы денудации стремятся придать геоиду форму эллипсоида, т.е. привести поверхность Земли в равновесие по рельефу. Но процессы денудации, нивелируя положительные формы рельефа и впадины, в своем стремлении к выработке равновесного рельефа нарушают изостатическое равновесие, т.е. равновесие масс. Нарушение изостазии стимулирует процессы, стремящиеся ее восстановить, что выражается в латеральном перетоке вещества астеносферы из областей осадконакопления в области денудации – из областей с возросшим давлением в области с давлением понизившимся. В результате литодинамический поток «закольцовывается» с потоком астеносферного вещества, образуя замкнутую динамическую систему. Создается некоторый аналог конвективной ячейки, но представленный в недрах Земли лишь одной астеносферной ветвью. Другая ветвь, встречная по направленности массопереноса, представляет собой литодинамический поток.

Далее события развиваются по такой схеме: подток глубинного вещества в области дефицита массы, т.е. процесс восстановления изостазии, восстанавливает высоту уже эродированных положительных форм рельефа. В результате в соответствии с парадоксом встречных преобразований вновь нарушается равновесие по рельефу, что активизирует процессы денудации, и т.д. Процесс приобретает циклический характер.

Роль изостазии как возможного тектонического фактора, начиная с работ Даттона в конце XIX в., привлекала внимание многих исследователей. Боуи (1938 г.) придал ей значение ведущего фактора тектогенеза. Другие исследователи того времени (в частности, Архангельский) восприняли это положение как переоценку роли изостазии. Обратная реакция на построения Боуи

была массированной и весьма жесткой, вплоть до почти полного отрицания самой идеи изостазии.

Впоследствии основания, с позиции которых велась критика концепции изостатической тектоники, оказались артефактами, однако ведущие тектонисты, в особенности после того, как они были вовлечены в орбиту построений тектоники плит, а затем и плюм-тектоники, серьезного внимания тектоническим возможностям изостазии не уделяли.

Между тем дальнейшее совершенствование методов гравиметрии показало, вопреки представлению, бытовавшему ранее, что области горных сооружений находятся в состоянии, близком к изостазии (см., например, [Артемьев и др., 1985]). Это означает неизбежность существования потоков внутреннего вещества Земли, которые в геологическом масштабе времени очень быстро восполняют постоянно образующийся дефицит массы вещества, уносимого литодинамическими потоками.

Хотя возможность изостатической природы поднятия блоков земной коры не отрицалась, существовало представление, ограничивающее тектонические возможности изостазии. Одним из ведущих соображений, отрицающих слишком значительную роль изостазии в тектонике, было следующее. Легкая, разуплотненная фракция, удаляемая денудацией, компенсируется подтоком в основание размываемых горных сооружений более тяжелой глубинной фракции, вследствие чего со временем их высота неуклонно снижается. Если бы природа поднятий была только изостатической, то со временем замена легкой фракции земной коры более тяжелым глубинным веществом привела бы к постепенному снижению высоты горных сооружений и, в конечном счете, к выработке равновесного рельефа.

Однако этот аргумент теряет свою силу, если допустить, что плотность компенсирующего вещества в восходящей ветви по мере его эскалации в вышележащие горизонты подвергается разуплотнению. Оно сопряжено с приращением объема исходной массы вещества, вовлеченного в восходящее движение. Это предположение придает циркуляционной изостатической тектонике новое качество, имеющее под собой достаточно веские физические соображения.

В свете этого соображения компенсирующее вещество не просто перетекает в соответствии с законом Паскаля из мест с более высоким давлением в места с давлением более низким – оно при этом *разуплотняется*. Разуплотнение обеспечивается самим фактом латерального течения, вязкого или пластического, и в особенности тем, что давление на объем вещества, вовлечен-

ного в восходящую ветвь компенсирующего потока, по мере его движения к земной поверхности последовательно уменьшается. Это неизбежно должно возбуждать взаимосвязанные механические, физические и геохимические процессы, которые столь же неизбежно должны вести к приращению объема вещества восходящей фракции, соответствующим структурным перестройкам и появлению латентных напряжений. Процессы денудации, таким образом, стремясь восстановить равновесие рельефа, во-первых, нарушают равновесие по массе – изостазию, а во-вторых, нарушают равновесие вещества по основным термодинамическим параметрам, в первую очередь по параметру давления.

В частности, в главе 6 мы покажем, что геологическая среда, освобожденная от веса налегающих пород в процессе их денудации, переходит в энергонасыщенное состояние и тем самым становится, видимо, основным резервуаром, из которого черпает энергию континентальная коровая сейсмичность.

Следует обратить внимание и на следующее обстоятельство. В восходящем потоке появляется дополнительная движущая сила, своего рода «тяга», которая в механике известна как явление *эрлифта*, состоящее в том, что вещество, разуплотняющееся в процессе его вертикальной эскалации, начинает двигаться с самопроизвольным ускорением от пастообразного «выдавливания» до перехода движения в фазу активного фонтанирования и даже взрывообразного разрушения, как это в особенности ярко проявлено при фонтанировании газонасыщенной нефти, извержениях грязевых вулканов, эксплозивных извержениях. Движущей силой в этом случае становится не только архимедова сила, но и составляющая, которая свойственна движению тел с переменной массой. Восходящее движение в своем развитии приобретает черты процесса автокаталитического.

Мы здесь изложили соображения, которые с точки зрения физики неоспоримы. Дискуссионным является то, насколько они применимы к конкретным геологическим ситуациям. Мы далеки от того, чтобы вслед за Боуи настаивать на том, что изостазия играет ведущую роль в тектогенезе. Но вместе с тем мы привели дополнительные физические основания, которые в противовес взглядам, отрицающим значимую роль изостазии в тектонической жизни Земли, могут способствовать более взвешенной оценке ее возможной роли в этом отношении.

Если говорить об интуитивных предпочтениях, то нам представляется, что с позиций изостатической тектоники можно прийти к сравнительно простым решениям целого ряда проблем региональной тектоники, в особенности внутриплитной. В рамках изо-

статической тектоники предстают в динамическом единстве и латеральные движения блоков литосферы, увлекаемых компенсационными потоками. Для этого не требуется весьма дискуссионная гипотеза о существовании конвективных ячеек в мантии. Особенная привлекательность этой модели видится в том, что она синтетически объединяет в себе положительные моменты «фиксизма» и «мобилизма». Однако насколько эта модель себя оправдает покажут будущие исследования. Мы же здесь привели ее в качестве примера того, каким образом представление о встречных преобразованиях может быть применено к конкретной геологической ситуации. Нам представляется, что двигателем изостатического кругооборота вещества Земли являются именно циклические встречные преобразования. Источником энергии, который питает этот двигатель, является поток солнечной энергии, активизирующий процессы денудации и включающий в действие литодинамический поток.

СТРУКТУРА И ФОРМИРОВАНИЕ ЗОН РАЗГРУЗКИ

Под *нагрузкой* понимают силовое воздействие на тело независимо от знака приложенных к нему сил. Под *разгрузкой*, соответственно, понимают частичное уменьшение или полное снятие силовой нагрузки – независимо от знака нагрузки, т.е. независимо от того, например, создавалась нагрузка тела силами растяжения или сжатия. В частном случае, применительно к геологической среде, под разгрузкой чаще понимают состояние объема горных пород, которое возникает в том случае, если действовавшая исходная гравитационная нагрузка в силу природных или искусственных причин убывает на некоторую величину ΔP.

Процесс перехода в состояние термодинамического равновесия системы, выведенной из такого состояния, в физике понимают как процесс релаксации. Достигается равновесие посредством убыли свободной энергии системы, т.е. энергии, обусловленной отклонением системы от равновесия, теоретически до нуля, а в действительности до некоторой минимальной величины. Самопроизвольную убыль свободной внутренней энергии до ее равновесных значений мы далее будем называть *энергетической разгрузкой*.

Таким образом, энергетическая разгрузка представляет собой частный случай релаксации, рассматриваемой только по одному из ее параметров, – высвобождению собственного энергетического потенциала среды. Этот потенциал представлен упругой энергией формоизменения, в частном случае латентной энергией.

Наличие латентной энергии в геологических телах является признаком и мерой отклонения состояния этих тел от статистического (термодинамического) равновесия. Движение систем, располагающих запасами латентной энергии к восстановлению равновесия, достигается в процессе высвобождения этой энергии, т.е. в результате снятия упругих деформаций, фиксированных структурой этих тел. По этой причине в понимании особенностей механического поведения энергонасыщенной геологической среды процессы релаксации выходят на передний план.

5-1. ЗОННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ

5-1.1. Масштабный фактор

Процессы релаксации сложны для аналитического описания даже в простейших системах. Так, в одноатомном газе равновесие устанавливается не одновременно во всем объеме, а вначале в небольших локальных объемах. Эти объемы взаимодействуют с окружением лишь на своей поверхности и поэтому являются частично изолированными, процесс достижения общего равновесия постепенно замедляется. Влияние размеров такой системы на время релаксации отражает выражение $T \sim \tau(L/l)^2$, где l – характерный размер локального объема, L – размер всей системы, τ – время установления локального равновесия, T – время установления равновесия во всей системе. Сходную форму имеет и выражение для оценки времени релаксации в жидкости (см., например, [Яворский, Детлаф, 1963]). В этом состоит смысл одного из основных утверждений статистической физики, согласно которому время релаксации тем больше, чем больше размеры релаксирующей системы [Ландау, Лифшиц, 1976].

Обычно в экспериментальных оценках времен релаксации, принятых в материаловедении, а затем и применительно к горным породам, неявно предполагается, что процесс релаксации происходит одновременно с одинаковой интенсивностью во всех точках релаксирующего тела. Однако в действительности в объемных телах процесс релаксации начинается не во всех их точках одновременно, а вначале локализуется вблизи их граничных поверхностей и лишь затем медленно мигрирует в глубину этих тел. Мы разработали *модель зонной релаксации*, учитывающую эту особенность процесса релаксации. С учетом этого оценки времени релаксации больших геологических тел возрастают на порядки.

Если в материаловедении пренебрежение величиной релаксирующих тел не вносит в оценки времени релаксации значимые для практики погрешности, поскольку в технике имеют дело со сравнительно небольшими объектами, то в применении к оценке времен релаксации больших геологических тел это приводит к погрешностям огромным. Но значение модели зонной релаксации выходит за рамки оценки времен релаксации. Как показано далее, модель вскрывает принцип организации структурных композиций, которые образуются в процессе релаксации, и дает представление о закономерностях развития этих структурных образований в пространстве–времени. Тем самым мы получаем

структурный критерий, который позволяет судить о том, какого рода силами вызваны наблюдаемые деформации – внешними или внутренними. Этот критерий радикальным образом разрешает проблему идентификации вида напряжений, действующих в породном массиве.

5-1.2. Общее представление о зонной релаксации

Существо зонной релаксации можно выразить следующим наглядным сравнением: достаточно выпасть кислотному дождю и на блестящей рабочей поверхности рельса образуется пленка ржавчины. Время образования этого тончайшего слоя исчисляется минутами или десятками минут. Однако, чтобы полностью проржавел и рассыпался в труху весь рельс, потребуются десятки, если не сотни лет. Процесс окисления рельсовой стали является тем же процессом зонной релаксации, но проявленным в его химической ипостаси. По существу это процесс перестройки структуры системы на уровне ее химических связей, т.е. на атомно-молекулярном уровне. Процесс этот устремлен к тому, чтобы привести химический потенциал системы к равновесию с окислительной внешней средой.

В обсуждаемом примере процесс ржавления не начинается одновременно во всех точках релаксирующей системы. Он сосредоточен в ее тонком поверхностном слое и затем лишь постепенно, на больших отрезках времени, проникает в ее более глубокие части. Примерно та же картина наблюдается и при разгрузке массивов геологической среды. Но в этом случае индикатором процесса релаксации является дезинтеграция горной породы, выраженная в хрупких породах в форме ее хрупкого разрушения. Вокруг релаксирующих тел со временем образуются более или менее мощные ореолы (зоны) дезинтегрированной горной породы.

5-1.3. Модель зонной релаксации

Представление о том, как размеры релаксирующих геологических объектов влияют на время релаксации напряжений в этих объектах, а также на те структурные преобразования, которые при этом протекают, мы разработали в рамках *модели зонной релаксации*. Полученные при этом результаты отражены в ряде публикаций [Пономарев, 1981, 1985; Пономарев, Ромашов, 1986а, б].

Переход большого массива вещества в состояние вязкого течения при нарушении равновесия массива изучался на следующей модели.

Битум марки 3 заливался в емкость длиной 150, шириной 25, высотой 75 см. Остывая, битум отвердевает и образует блок, который затем и использовался в качестве модельного массива породы, подвергаемого действию разгрузки. Разгрузка блока достигалась тем, что одна из торцевых стенок емкости снималась. Натурным аналогом такой схемы разгрузки может служить разгрузка приподнятого блока по бывшей поверхности контакта со смежным блоком, которая стала свободной поверхностью вследствие дифференцированного смещения блоков по вертикали.

Время релаксации битума марки 3 при обычных комнатных температурах имеет порядок 10 мин. По истечении этого времени освобожденная грань блока вспучивалась и затем начиналось медленное истечение битума из емкости, вследствие чего уровень его в емкости постепенно понижался. Вначале истечение становилось заметным лишь вблизи разгружаемой поверхности, а затем процесс постепенно распространялся и на более удаленные от этой поверхности части блока. Распространение процесса фиксировалось по понижению уровня битума в емкости относительно исходного и отражено графиком (рис. 5.1). Здесь по оси ординат отложены номера пунктов измерения (ПИ), которые располагались вдоль емкости через каждые 5 см, а по оси абсцисс – моменты времени, когда становилось заметным понижение уровня в данном ПИ. Пороговым значением «заметности» принималось понижение уровня на 2 мм.

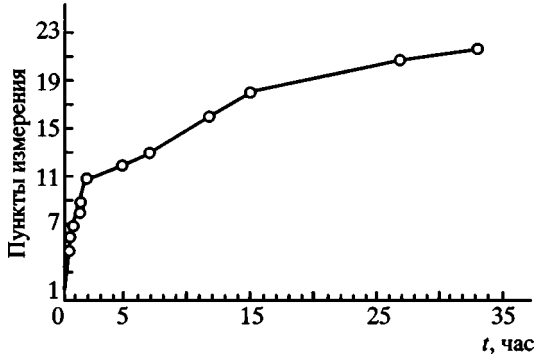


Рис. 5.1. Понижение уровня битума при разгрузке модельного блока в зависимости от времени

Из приведенного графика видно, что блок материала реагирует на разгрузку не одновременно во всех сечениях. Ее влияние последовательно распространяется от поверхности разгрузки к последующим сечениям. При этом скорость распространения такой своего рода волны разгрузки вначале относительно велика, но затем быстро уменьшается, и спустя короткий промежуток времени волна разгрузки начинает распространяться со скоростью, близкой к постоянной.

Физический смысл наблюдаемой картины может быть объяснен следующим образом. После заливки битума в нем устанавливается гидростатическое напряженное состояние. Интуитивно очевидно, что изотропные напряжения в битуме, обусловленные его весом, будут сохраняться неограниченно долго.

При снятии стенки равновесное состояние блока нарушается, поскольку напряжения на освобожденной (разгруженной) грани, нормальные к ее поверхности, становятся равными нулю. Прежде равнокомпонентное напряженное состояние становится неравнокомпонентным.

В рассматриваемом случае действие разгрузки эквивалентно растягивающей силе, наложенной на гидростатическое напряженное состояние. Вначале (при $t < \tau$) оно локализуется в краевой части блока – в зоне разгрузки с начальной мощностью l_0, в соответствии с принципом Сен-Венана о локальности напряжений, согласно которому действие силы, приложенной к поверхности тела, уравновешивается в близкой окрестности места ее приложения [Безухов, 1953]. В течение $t < \tau$ материал в зоне разгрузки воспринимает давление со стороны внутренних частей массива подобно упругому твердому телу. Образовавшаяся зона разгрузки, представленная и как зона измененного напряженного состояния, «заменяет» снятую стенку. Она играет роль прочностного барьера, предохраняющего внутренние части блока от разгрузки, почему исходное равнокомпонентное напряженное состояние во внутренних частях блока за вычетом зоны l_0 остается неизменным.

Однако по мере возрастания продолжительности опыта (при $t > \tau$) приращение остаточной деформации становится все более значимым. Функцию прочностного барьера принимают на себя части, все более удаленные от поверхности разгрузки. Процесс нарушения равновесного состояния и переход материала в состояние ползучести постепенно распространяется в глубь блока.

До начала опыта и в его процессе реологические свойства материала, поскольку они зависят от температуры, остаются теми же в любом элементе его объема. Однако сам процесс релакса-

ции начинается в разных частях блока не одновременно с разгрузкой его грани, а в зависимости от расстояния рассматриваемого элемента объема до этой грани. Пусть L – протяженность блока за вычетом l_0. Тогда, если $L \gg l_0$, упругая энергия и соответствующее ей гидростатическое напряжение во внутренних частях блока сохранятся без сколько-нибудь заметных изменений в течение времени T, которое намного превышает время τ. Экспериментальная зависимость между T и τ приближенно соответствует выражению $T \approx k\,(L/l_0)\tau$.

В серии проведенных опытов значения $k = 10 \div 30$. Подчеркнем, что переход в состояние ползучести, оцениваемый временем T, еще не означает полного снятия напряжений. Он указывает только порядок времени, в течение которого напряженное состояние всего блока материала становится неравнокомпонентным. В ситуации, соответствующей схеме опытов, напряжения в материале создаются непосредственно весом материала, и, следовательно, их полная релаксация соответствовала бы истечению из емкости всего содержащегося в ней битума. Очевидно, что на это потребовалось бы время гораздо большее, чем время T.

5-2. СТРУКТУРА ЗОН РАЗГРУЗКИ

5-2.1. Определения

В опытах с истечением битума из емкости исходное изотропное напряженное состояние блока модельного материала нарушалось разгрузкой одной из его боковых граней. Разгруженная грань блока в данном случае играла роль *поверхности разгрузки*. В общем случае под поверхностью разгрузки далее будет пониматься граничная поверхность любой конфигурации, на которой произошло нарушение исходного термодинамического (статистического) состояния системы, в результате которого энергия системы оказалась избыточной по отношению к энергии внешней среды. В самом обобщенном виде под «разгрузкой» мы будем понимать высвобождение упругих деформаций независимо от того, какими процессами созданы условия для этого, а под «зонами разгрузки» – те локальные зоны, в которых высвобождение упругих деформаций в силу тех или иных причин становится возможным.

Поверхности разгрузки могут быть *свободными*, как в случае разгрузки блока битума, или же *несвободными*. В последнем случае они представляют собой граничные поверхности внутри тела, разделяющие его части, находящиеся в различном состоянии.

Примерами образования свободных поверхностей разгрузки могут служить эрозионный срез положительных форм рельефа, выработка речных долин, выемка карьеров или подземных полостей. Примеры несвободных поверхностей – зоны разрывных нарушений или зоны контакта блоков пород с разной историей их геологического развития.

Структурные изменения в зоне разгрузки могут выражаться в форме вязкого течения, как в случае истечения битума, либо в форме появления структур разрушения, являющихся следствием хрупкого последействия. Говоря о структуре зон разгрузки, именно последний случай мы и будем иметь в виду. Но зоны разгрузки могут существовать и в структурно не проявленной форме в виде *зоны измененного напряженного состояния*. Если исходное напряженное состояние системы было изотропным, то действие разгрузки выражается в том, что в зоне разгрузки появляются девиаторные напряжения. Равнокомпонентное напряженное состояние нарушается. Девиаторные напряжения в этом случае являются показателем и мерой нарушения равновесного состояния, локализованного в зоне разгрузки. В энергетической форме зоны разгрузки могут рассматриваться как зоны, в которых осуществляется переход упругой энергии изменений объема в упругую энергию формоизменения ($u_v \rightarrow u_f$).

5-2.2. Структурная релаксация

Латентные напряжения, как отмечалось, понижают прочность субстрата и способствуют его хрупкому разрушению. Это утверждение выведено из данных наблюдений над механическим поведением твердых тел, содержащих латентные напряжения, т.е. оно имеет характер эмпирической закономерности.

Коснемся физической стороны этого явления.

Термодинамически равновесному состоянию системы соответствует ее определенная структура. Переход к новому равновесию, вызванный изменением внешних условий, и состоит в перестройке структуры системы на различных уровнях ее структурной организации. Этим система приспосабливается к новым внешним условиям ее существования. Процесс перестройки структуры системы при ее движении к новому равновесию может быть назван *структурной релаксацией*.

Движение к равновесию, как это рассматривалось, – набор множества сцепленных между собой различных процессов. В общем случае процессы эти протекают с разной скоростью, вследствие чего система может находиться в состоянии неполного рав-

новесия. В этом состоянии одни параметры имеют значения, отличные от равновесных, тогда как по другим параметрам релаксация уже произошла.

Формы, в которых выражается структурная релаксация на разных уровнях организации системы, многообразны. Это перегруппировка молекул и их комплексов в результате их теплового движения к такому взаимному расположению, при котором энергия системы принимает минимальные значения (см., например, [Гуревич, 1974]). Это вещественные, фазовые и полиморфные изменения вещества, его перекристаллизация, изменение соотношения фазовых и вещественных составляющих и т.д. Мы здесь рассматриваем лишь один из видов перестройки структуры геологической среды в ее стремлении к состоянию равновесия – ее структурную дезинтеграцию.

Дезинтегрированные области при разных масштабных осреднениях и разных средствах их выявления имеют разную выраженность. Они могут иметь структурную выраженность в виде систем трещин, доступных непосредственному наблюдению, от микротрещин до трещин отдельности, сообщающих земной коре блочное строение («блоковую делимость»). Таковы же трещины, которые определены как «диаклазы», а также системы планетарной трещиноватости, проявленные повсеместно в огромном масштабном диапазоне. При наблюдении средствами волновой геофизики дезинтегрированные объемы могут проявляться в различных особенностях строения земной коры, таких как геофизическая «мутность», «корни гор», геофизические границы типа поверхности Конрада, слои пониженной скорости в земной коре («волноводы»).

Системы трещин, возникающие в процессе структурной релаксации, хотя этот процесс и может быть спровоцирован теми или иными внешними воздействиями, в дальнейшем мы будем называть *структурами самопроизвольного разрушения*. По своему физическому существу они являются структурами хрупкого последействия. Их морфология, кинетика и динамика будут детально рассмотрены далее.

Независимо от теоретических подходов в попытках объяснить образование трещин хрупкого отрыва в условиях относительного растяжения само это явление является фактом, установленным в эксперименте и натурных наблюдениях. То, что системы трещин хрупкого отрыва имеют самое широкое распространение в зонах разгрузки, притом в самых различных геологических ситуациях, является фактом, который имеет значение универсальной эмпирической закономерности.

В последнее время ряд структурных форм, прежде считавшихся разными по своему происхождению, стали рассматриваться как генетически связанные звенья последовательных структурных преобразований, возникающих в процессе релаксации, – «структурные парагенезы» [Талицкий, 1987, 1991]. Энергия, запасенная на глубинном уровне вещества, в соответствии с законом сохранения, не может исчезнуть из системы бесследно. Нарушение равновесия на одном уровне вызывает нарушение равновесия на смежном уровне, и так деформация передается по цепочке масштабных уровней, качественно видоизменяясь на каждом уровне, создавая тем самым генетические последовательности структурных парагенезов. Возникает своего рода волна структурной переорганизации, область распространения которой – одно и то же вмещающее пространство, но на разных уровнях его структурной организации.

5-2.3. Основной структурный стереотип

Переход к новому равновесию системы в целом достигается в процессе дезинтеграции пород в зоне разгрузки. Мощность последней при этом со временем возрастает, что выглядит как перемещения в глубь релаксирующего массива своего рода волны деструкции.

Структурный стереотип зоны разгрузки соответствует следующей общей схеме. Раздробленность пород наиболее значительна у поверхности разгрузки и постепенно убывает в глубину массива, нередко по закону, близкому к экспоненциальному. Ориентировка трещин в *зоне интенсивного дробления* обычно хаотична. Далее следует зона менее интенсивной, но более упорядоченной трещиноватости. В этой зоне – *зоне ориентированной трещиноватости* – трещины по своей ориентировке следуют как наложенному шаблону форме поверхности разгрузки.

Рост каждой из трещин ограничен размером той отдельности, в которой она зародилась. Чем более фрагментирована среда, тем короче «путь свободного пробега» трещины, т.е. тем короче возникающие трещины. По этой причине зона интенсивного дробления представлена большим количеством относительно мелких трещин, тогда как при переходе в зону ориентированной трещиноватости доля крупных трещин постепенно возрастает. Далее следует *упругая зона*, где исходное напряженное состояние массива изменено, но структурно еще не проявлено. Наконец, далее располагается ненарушенное *ядро* массива.

Образование трещин в зоне разгрузки, в свою очередь, может оказывать сильное влияние на локальное состояние массива, например вести к его дегазации, изменению порового давления в пространстве, вмещающем дезинтегрированное тело, к изменению режима циркуляции подземных вод и флюидов и т.д. Трещины изменяют физико-механические свойства пород, возбуждают и активизируют самые разнообразные геохимические, гидротермальные процессы, ведут к различным энергетическим преобразованиям. Массы раздробленного вещества вовлекаются во вторичные деформационные процессы, связанные с перемещением этих масс под действием тектонических сил. Вся совокупность такого рода факторов нередко нарушает исходный стереотип в его «классическом выражении». Тем не менее, ситуации, когда ядро массива окружено по своей периферии структурно измененным материалом, наблюдаются не просто часто: этот структурный стереотип имеет в геологической среде широчайшее распространение. Первоначально это наблюдение и послужило в качестве натурного прототипа модели зонной релаксации.

Ниже мы сделаем попытку разобраться в механизме этого явления. Однако существование рассматриваемого структурного стереотипа является эмпирическим обобщением. Оно не зависит от того, каким образом его можно объяснить.

5-3. ФОРМИРОВАНИЕ ЗОН РАЗГРУЗКИ

5-3.1. Конфигурация зон разгрузки

Энергия, необходимая для образования трещин, может сообщаться среде действием внешних сил либо черпаться из собственного энергетического потенциала, накопленного заблаговременно. В зависимости от способа энергоснабжения процесс разрушения развивается по «классическому» сценарию либо по сценарию фрагментации. Формирование зон разгрузки происходит в соответствии со сценарием фрагментации.

Реакция массива на разгрузку его граничной поверхности вначале выражается в том, что у этой поверхности возникает зона градиентных изменений поля потенциальной функции (зона измененного напряженного состояния), не проявленная в структурном отношении. Однако в дальнейшем в результате квантованного высвобождения потенциала системы, акты которого сопровождаются возникновением структурных элементов, по-

степенно происходит структурирование этой зоны, образование деструктивного тела. Энергетический потенциал системы, аннигилируя, в зоне разгрузки воплощается в организованной системе трещин. В процессе формирования зоны разгрузки в разных и непрерывно изменяющихся соотношениях представлены определенный энергетический потенциал и «овеществленная» его разгрузкой структурная составляющая. Таким образом, подобно тому, как геологическая деятельность прошлого оставляет свой след в форме слоистых толщ осадочных пород, процессы релаксации, обусловленные разгрузкой, оставляют свой след в виде систем трещин разгрузки.

Зону разгрузки в стадии ее становления можно представить как эволюцию системы между двумя крайними ее состояниями. В первом из них, начальном, энергетический потенциал системы еще не израсходован и пока структурно не проявлен. Во втором, конечном, потенциал израсходован полностью и структурно проявлен в форме структуры разрушения, саморазвитие которой далее невозможно. Системы, достигшие такого крайнего состояния, мы будем называть *энергетически вырожденными*, или *энергетически истощенными*.

С точки зрения физической сущности структурирование среды за счет разгрузки ее энергетического потенциала представляет собой переход системы из метастабильного состояния к новому равновесию. При этом процесс протекает в разных частях системы неоднородно, так что в стадии формирования в системе имеются и элементы ее объема, все еще сохраняющие достаточно высокий потенциал, и объемы, энергетически истощенные. Последние маркируются трещинами и примыкающими к ним локальными зонами разгрузки, из которых трещины черпали энергию на свое возникновение. В целом эволюцию изначально энергонасыщенной системы можно охарактеризовать как движение от энергетического изобилия к полному энергетическому истощению.

Конфигурация деструктивного тела, возникшего в процессе разгрузки потенциальной функции, и предопределена конфигурацией этой функции.

Рассмотрим простейший случай – образование систем трещин в одномерной двухслойной модели при одноосном растяжении ее нижнего слоя. Как освещалось выше, при этом рабочее тело модели расчленяется системой субпараллельных трещин, нормальных к оси растяжения, на отдельные фрагменты, примерно одинаковые по своим размерам.

Потенциал системы вдоль полосы рассредоточен равномерно. Это можно выразить графиком, по оси абсцисс которого от-

ложены значения протяженности полосы, а по оси ординат – значения E_x, характеризующие форму потенциальной функции вдоль x. В данном случае последняя выразится прямой линией, параллельной оси x. В процессе образования трещина черпает энергию из узкой полосы вдоль своих берегов, симметричной по отношению к оси трещины, образуя локальную зону разгрузки с шириной $2l$.

Количество энергии, которое трещина черпает на свое развитие, не зависит от значений потенциальной функции, поэтому, чем выше значения функции, тем у́же зона локальной разгрузки. Символически это можно выразить, обозначив количество энергии, затрачиваемой на образование трещины, прямоугольником с площадью $S = E_x \cdot 2l = \text{const}$.

Характерно, что размеры фрагментов, образующихся при разрушении модели, были примерно одинаковы, хотя последние из них (по времени появления) возникали в ситуации, когда интегральная энергия системы была уже в существенной мере исчерпана образованием предшествующих трещин. Это подчеркивает тот факт, что на образование трещины расходуется энергия из полосы, ширина которой $2l$ в течение опыта сохраняется постоянной. Это явление в своем месте мы обозначили как *принцип локальности*.

Локальность разгрузки трещиной является четким признаком того, что единичный акт разрушения был осуществлен не под действием внешней силы, действующей на систему в целом, а за счет собственного энергетического потенциала системы. Принцип локальности, как мы покажем далее, характерен для проявлений сейсмичности, что и указывает на то, что сейсмичность по своему физическому существу является процессом релаксационным. Это означает, что современные тектонические силы, действующие на сейсмогенный объем среды, могут выполнять функцию управляющего воздействия, но саму сейсмогенность среды обеспечивает ее собственный энергетический потенциал, существующий в ней независимо от современных тектонических нагрузок.

Поскольку ширина локальной зоны разгрузки у берегов образовавшейся трещины полностью определяется (при прочих равных условиях) значениями потенциальной функции, то при переменной конфигурации функции будет переменной и плотность трещин, в данном случае выражающаяся изменением соответствующих расстояний между трещинами.

Пусть значения функции E_x максимальны в начале системы координат («гребень функции») и далее убывают вдоль прости-

рания полосы материала по линейному закону. График функции в этом случае изобразится прямой линией, наклонной к оси абсцисс. Поскольку на образование каждой трещины затрачивается одно и то же количество энергии, то расстояния между трещинами по мере уменьшения значений E_x будут возрастать, отражая закон убывания потенциальной функции. Таким образом, мы получаем картину распределения трещин, в которой их число по мере удаления от «гребня функции» убывает, или, что одно и то же, толщина пластин, заключенных между субпараллельными трещинами, по мере удаления от начала координат возрастает. В принципе это картина, по своей структурной основе сходная с той, которой соответствует распределение трещин в зоне разгрузки, наблюдаемое в натурных ситуациях.

«Периодичность» образования трещин в зонах разгрузки вблизи дневной поверхности и вокруг горных выработок была и остается камнем преткновения для теоретических разработок, в которых предприняты попытки описать образование систем трещин такого рода средствами «классической» геомеханики, в частности – как результат горного давления. При этом создавались весьма сложные теоретические конструкции. Как мы видим, допустив существование в среде собственного энергетического потенциала, освобождающегося при разгрузке, можно прийти к элементарно простому решению этой задачи.

Таким образом, чтобы понять механизм образования трещин в зоне разгрузки, требуется отступить от «классического» канона, допустив существование в среде ее собственного энергетического потенциала. Пространственное распределение потенциала в зоне разгрузки, описываемое потенциальной функцией, и предопределяет конфигурацию образующихся здесь деструктивных тел.

5-3.2. Формирование структурного стереотипа зон разгрузки

В своей развитой форме зоны разгрузки характеризуются определенной структурой, имеющей настолько универсальное распространение, что структурный стереотип, свойственный зонам разгрузки, может рассматриваться как канонический.

Задавая различные формы потенциальной функции, можно получить и различные системы трещин, в своей совокупности образующие деструктивные тела. Столь же доступна решению и обратная задача: по конфигурации зон трещиноватости можно определить и форму обусловившей ее потенциальной функции.

В рассмотренном выше случае разрушения полосы материала при одноосном растяжении активного слоя потенциальная функция имела лишь одну составляющую – E_x. В этом случае структурный элемент «не имел права выбора ориентации». Система трещин представляла собой систему субпараллельных линий, направленных по оси y. При дальнейшем наращивании потенциала за счет дополнительного нагружения модели возникали трещины следующей генерации, которые заполняли промежутки между трещинами первой генерации и были им параллельны.

Прямоугольные (тетрагональные) структуры проявляются, когда линейный элемент (трещина) может возникнуть как в направлении x, так и y. В моделях с двухосным растяжением нижнего слоя потенциальная функция имеет уже две составляющие – E_x и E_y. Их соотношение было равным – $E_x/E_y = 1$ и одинаковым по площади верхнего слоя. В результате возникла статистически равномерная сетка трещин, расчленяющая материал верхнего слоя на площадки, близкие к тетрагональным.

Случай, когда график функции потенциального рельефа представляет собой наклонную прямую, на моделях мы не воссоздавали, но теоретически он рассмотрен в работе [Зимов, 1993] наряду с другими случаями образования систем трещин при самых различных конфигурациях потенциальной функции. По существу этот случай отражает механизм формирования основного структурного стереотипа, в соответствии с которым возникают системы трещин в зонах разгрузки.

В общих случаях решение задачи сводится к тому, что в блоке материала образуются прямоугольные решетки, фрагментирующие материал на тетрагональные площадки, так что в целом структура дезинтегрированного блока материала напоминает таковую, построенную по принципу «кирпичной кладки» с тем, однако, отличием, что размеры фрагментов возрастают по мере удаления от гребня функции. При этом процесс образования трещин эволюционирует во времени, так что могут быть выделены трещины первой, второй и последующих высших генераций. В пределе в материале создается сеть трещин, соответствующая основному структурному стереотипу.

Таким образом, само по себе описание механизма образования трещин, интегрально выраженного существованием структурного стереотипа, сложной научной проблемы не составляет. Задаваясь различными наклонами рельефа потенциальной функции, будь это прямая линия или иные линии, значения которых последовательно убывают от начала координат (например, это может быть экспонента), а также задаваясь различными значе-

ниями соотношения E_x/E_y, можно добиться того, что теоретические решения будут достаточно близко соответствовать наблюдаемой картине распределения трещин в зоне разгрузки.

Проблемой является другое: ответ на вопрос, какие условия формируют закон изменения потенциальной функции в зоне разгрузки?

Вникнем в суть этой проблемы. Предположению о том, что напряжения растяжения, направленные по нормали к поверхности разгрузки, достигают наибольшей величины на поверхности разгрузки, противостоит одно из фундаментальных положений классической механики, противоположное по смыслу. Согласно этому положению, на контуре выработки нормальная к ней составляющая равна нулю. С углублением в массив ее значения постепенно возрастают, тогда как касательные напряжения на контуре максимальны и затем убывают. Из этого следует, что предельное состояние выработки определяется касательными напряжениями и возникающие здесь трещины являются трещинами сдвига.

Примечательно, что в работе [Кацауров, 1961, с. 63], одной из многих, где изложено представление о примате трещин сдвига, есть следующие строки, указывающие не на теоретическую, а на фактическую сторону дела: «При обнажении сжатой породы стволом она получает возможность расширяться в сторону выработки, причем физические свойства самой породы изменяются: она делается хрупкой, ломкой, расслаивается и растрескивается». Налицо все признаки разрушения породы в условиях растяжения, а не сдвига. Тем не менее, хотя положение о возможности расширения породы, освобожденной от сжатия, являются общим местом в высказываниях множества горняков и геологов, картина «расширения» в ее теоретическом аспекте, за исключением замечаний общего предположительного характера, как правило, не рассматривается.

Укажем на «аномальные» точки зрения, которые, на наш взгляд, открывают нетрадиционные возможности в решении обсуждаемой проблемы.

Мы уже упоминали об опытах П. Бриджмена, из которых следует, что при уменьшении объемного сжатия по одной из осей в образцах возникают трещины хрупкого отрыва даже в том случае, если по нормали к берегам образовавшейся трещины действуют высокие сжимающие напряжения.

Далее. Г.А. Смирнов-Аляев, обобщая значительный объем опытных данных, высказал положение, согласно которому материал в условиях двухосного сжатия претерпевает деформацию

полноценного растяжения. Представления Г.А. Смирнова-Аляева были расценены как экзотические и не получили широкого распространения. Тем не менее, вся совокупность огромного фактического материала, относящегося к характеру деформаций в зонах разгрузки, наблюдаемых в геологической среде в самых различных ситуациях, приводит к тому, что высказанное им положение фактам соответствует. Об этом же свидетельствует и поведение материала в условиях разгрузки, обозначенное нами как хрупкое последействие. При обнажении сжатой породы она ведет себя так, как если бы к поверхности разгрузки было приложено нормальное к ней растягивающее напряжение, максимальное у свободной поверхности и убывающее в глубину массива или образца. С точки зрения принятых теоретических представлений это выглядит странно, но, тем не менее, это соответствует фактам.

На уровне нынешнего понимания этой проблемы можно принять в качестве эмпирического обобщения, что в зонах разгрузки действует фиктивная растягивающая сила, направленная по нормали к поверхности разгрузки. Она равна по модулю величине снятой нагрузки и противоположна ей по направлению, достигая максимального значения на свободной поверхности и убывая по мере удаления от нее примерно по экспоненте. При этом на качественном уровне, в духе опытов П. Бриджмена, значения не имеет, происходит ли на поверхности разгрузки полное снятие нагрузки или частичное.

5-3.3. Распределение энергии в зоне разгрузки

Нарушение равнокомпонентного состояния массива в зоне разгрузки в энергетическом выражении можно представить как переход в этой зоне потенциальной энергии упругого сжатия объема в упругую энергию изменения формы, т.е. $u_v \rightarrow u_f$.

Напомним, что энергия изменения объема не релаксирует в принципе. Релаксации подвергается только та ее часть, которая переходит в энергию изменения формы. Со временем количество энергии формоизменения, постепенно релаксируя, убывает, стремясь к нулю как к пределу, т.е. $u_f \rightarrow 0$. Таким образом, в данном случае энергия изменения формы выступает в качестве меры отклонения системы от равновесия.

На рис. 5.2 приведена схема распределения упругого потенциала в зоне разгрузки. Предположим, что до начала разгрузки массив находился в гидростатическом равновесии, т.е. суммарный упругий потенциал был равен упругой энергии изменения

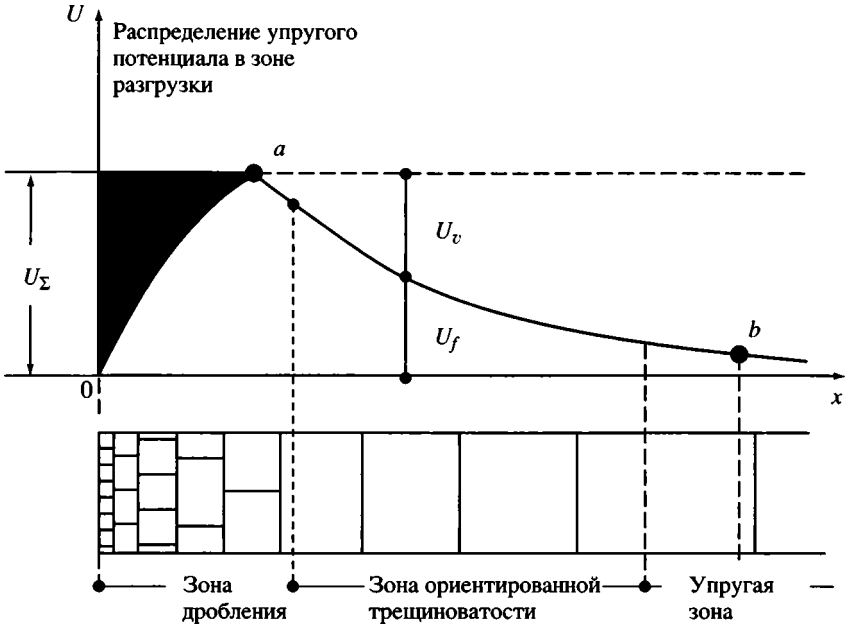


Рис. 5.2. Схема распределения упругого потенциала в зоне разгрузки и его связь с формированием структурного стереотипа разгрузки

объема ($U_\Sigma = U_v$). Образование свободной поверхности в точке 0 вызовет резкое нарушение гидростатического равновесия на этой поверхности, вследствие чего здесь осуществится переход $U_v \rightarrow U_f$, локализованный в образовавшейся зоне разгрузки.

Дальнейшее перемещение зоны разгрузки в глубину массива (вдоль оси x) символически можно представить как перемещение вдоль оси x функции U_f, представляющей собой потенциальную функцию как движение в глубину массива своего рода «волны разгрузки».

Тотчас после появления разгрузки в первоначально образовавшейся зоне разгрузки начинается процесс релаксации U_f, который сопровождается образованием трещин хрупкого отрыва. Трещины первой генерации субпараллельны поверхности разгрузки, однако среди трещин второй и последующих генераций возникают трещины, которые дробят образовавшиеся пластины на трехмерные отдельности, – прорелаксировавшая среда, по мере ее энергетического истощения, приобретает структуру блоковой делимости, а гребень функции U_f смещается далее в глубину массива.

Предположим, что закон изменения функции U_f в начальный момент времени был экспоненциальным. Этот закон задает и долю энергии U_v, переходящей в энергию U_f с ее последующей релаксацией. Соответственно, частость трещин, возникающих при релаксации U_f, от гребня функции в глубину массива также убывает по экспоненте.

Рассмотрим энергетическую структуру массива в зоне разгрузки спустя некоторое время после начала разгрузки, когда гребень функции U_f переместился от первоначальной поверхности разгрузки в точку *a*.

Левая ветвь соответствует состоянию среды, в которой переход $U_v \rightarrow U_f$ осуществился полностью, причем значительная часть энергии U_f уже прорелаксировала. Среда здесь, которую можно определить как *зону дробления*, раздроблена трещинами широкого спектра их генераций, придающими среде структуру блоковой делимости. Несмотря на то что значительная доля энергетического потенциала в этой зоне уже высвобождена, он частично сохраняется в образовавшихся отдельностях. И хотя содержащаяся в них энергия относительно невелика, здесь велики ее градиенты, поскольку каждая из отдельностей попадает в условия трехмерной разгрузки, т.е. в резко неравновесные, что создает дополнительные условия для дальнейшей дезинтеграции образовавшихся отдельностей.

Интенсивность процесса дробления близка к нулевой вблизи начальной поверхности разгрузки и возрастает до максимума в области гребня функции в точке *a*. Окрестность точки *a* можно определить как *область интенсивного дробления*.

Правая ветвь соответствует состоянию среды, в которой переход $U_v \rightarrow U_f$ осуществился лишь частично, причем доля энергии U_f в общем балансе упругого потенциала по мере движения в глубину массива убывает по экспоненциальному закону. Соответственно, в этой зоне возникают трещины первой генерации, распределенные по тому же закону. Эту зону по ее структурной выраженности можно назвать *зоной ориентированной трещиноватости*.

Схема структурирования среды в зоне разгрузки отражена в нижней части рис. 5.2. Она соответствует основному структурному стереотипу зон разгрузки. Принципы структурирования просты. Они подчинены уже обсуждавшимся выше закономерностям образования полигональных решеток, таким как закон параллельности, закон перпендикулярности и сценарий бокового наращивания (см. главу 4, 4-1).

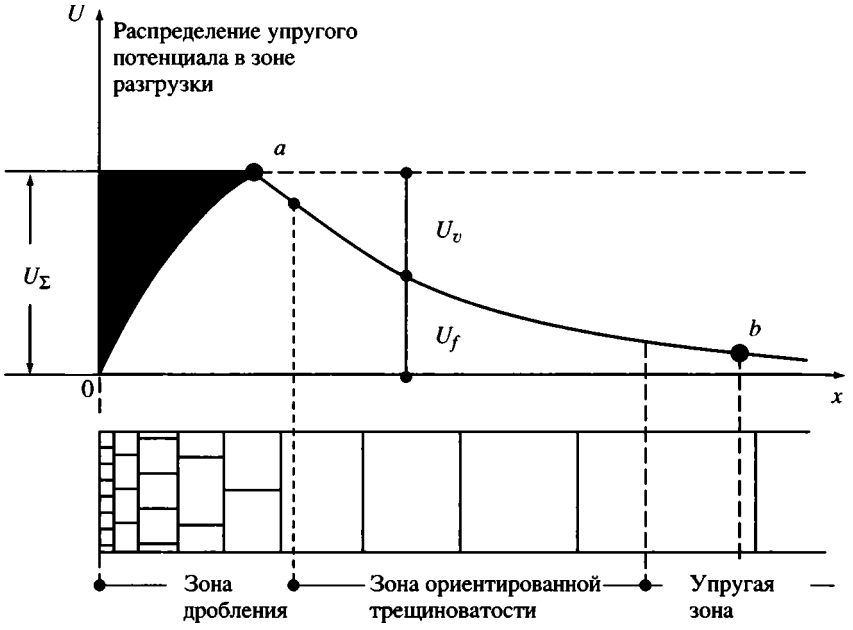


Рис. 5.2. Схема распределения упругого потенциала в зоне разгрузки и его связь с формированием структурного стереотипа разгрузки

объема ($U_\Sigma = U_v$). Образование свободной поверхности в точке 0 вызовет резкое нарушение гидростатического равновесия на этой поверхности, вследствие чего здесь осуществится переход $U_v \rightarrow U_f$, локализованный в образовавшейся зоне разгрузки.

Дальнейшее перемещение зоны разгрузки в глубину массива (вдоль оси x) символически можно представить как перемещение вдоль оси x функции U_f, представляющей собой потенциальную функцию как движение в глубину массива своего рода «волны разгрузки».

Тотчас после появления разгрузки в первоначально образовавшейся зоне разгрузки начинается процесс релаксации U_f, который сопровождается образованием трещин хрупкого отрыва. Трещины первой генерации субпараллельны поверхности разгрузки, однако среди трещин второй и последующих генераций возникают трещины, которые дробят образовавшиеся пластины на трехмерные отдельности, – прорелаксировавшая среда, по мере ее энергетического истощения, приобретает структуру блоковой делимости, а гребень функции U_f смещается далее в глубину массива.

Предположим, что закон изменения функции U_f в начальный момент времени был экспоненциальным. Этот закон задает и долю энергии U_v, переходящей в энергию U_f с ее последующей релаксацией. Соответственно, частость трещин, возникающих при релаксации U_f, от гребня функции в глубину массива также убывает по экспоненте.

Рассмотрим энергетическую структуру массива в зоне разгрузки спустя некоторое время после начала разгрузки, когда гребень функции U_f переместился от первоначальной поверхности разгрузки в точку *a*.

Левая ветвь соответствует состоянию среды, в которой переход $U_v \rightarrow U_f$ осуществился полностью, причем значительная часть энергии U_f уже прорелаксировала. Среда здесь, которую можно определить как *зону дробления*, раздроблена трещинами широкого спектра их генераций, придающими среде структуру блоковой делимости. Несмотря на то что значительная доля энергетического потенциала в этой зоне уже высвобождена, он частично сохраняется в образовавшихся отдельностях. И хотя содержащаяся в них энергия относительно невелика, здесь велики ее градиенты, поскольку каждая из отдельностей попадает в условия трехмерной разгрузки, т.е. в резко неравновесные, что создает дополнительные условия для дальнейшей дезинтеграции образовавшихся отдельностей.

Интенсивность процесса дробления близка к нулевой вблизи начальной поверхности разгрузки и возрастает до максимума в области гребня функции в точке *a*. Окрестность точки *a* можно определить как *область интенсивного дробления*.

Правая ветвь соответствует состоянию среды, в которой переход $U_v \rightarrow U_f$ осуществился лишь частично, причем доля энергии U_f в общем балансе упругого потенциала по мере движения в глубину массива убывает по экспоненциальному закону. Соответственно, в этой зоне возникают трещины первой генерации, распределенные по тому же закону. Эту зону по ее структурной выраженности можно назвать *зоной ориентированной трещиноватости*.

Схема структурирования среды в зоне разгрузки отражена в нижней части рис. 5.2. Она соответствует основному структурному стереотипу зон разгрузки. Принципы структурирования просты. Они подчинены уже обсуждавшимся выше закономерностям образования полигональных решеток, таким как закон параллельности, закон перпендикулярности и сценарий бокового наращивания (см. главу 4, 4-1).

5-3.4. Влияние энергонасыщенности

Говоря о формировании зон разгрузки и об их развитии во времени, мы полагали исходное состояние массива гидростатическим. В качестве источника необходимой для этого энергии формоизменения принимался переход $u_v \rightarrow u_f$, инициированный нарушением гидростатического равновесия. При этом предполагалось, что трансформированная энергия достаточна для того, чтобы обеспечить процесс дезинтеграции, т.е. что она достигает значений пороговой функции.

Но, прежде всего, можно ли полагать, что энергия формоизменения в этом случае и является собственным энергетическим потенциалом среды в зоне разгрузки?

Среда до начала разгрузки располагала упругой энергией в форме энергии объемного сжатия, обусловленного весом пород, т.е. внешней нагрузкой. В этом смысле упругий потенциал пород нельзя полагать ее собственным потенциалом, запасенным в форме латентной энергии. Это и выражается в том, что на поверхности разгрузки нормальная составляющая напряжений, обусловленных разгрузкой, принимается равной нулю. Действующими здесь считаются напряжения, касательные к поверхности разгрузки. Их значения определяются коэффициентом Пуассона или функцией от этого коэффициента, которая у горняков называется *коэффициентом бокового отпора*. Не высвобожденная в процессе разгрузки тангенциальная составляющая упругой деформации массива и обусловливает запас энергии формоизменения. Такова картина с точки зрения принятых представлений.

Однако эта картина предполагает поведение массива чисто упругим. Как мы видели в опытах с акустической эмиссией разгруженных образцов, и в соответствии с представлением о наследственной упругости, из разгружаемого массива высвобождается не вся упругая энергия, а лишь ее доля, соответствующая «мгновенной упругости». Ее доля, соответствующая «запаздывающей упругости», остается в массиве. Она-то и обеспечивает собственный энергетический потенциал субстрата в зоне разгрузки, который входит как составляющая в общий баланс энергии формоизменения в зоне разгрузки, и, что в особенности важно, обеспечивает энергией процесс хрупкого последействия, который развивается в разгруженных породах.

Наконец, мы подошли к возможности разрешения вопроса о природе фиктивной растягивающей силы, действующей по нормали к разгружаемой поверхности. Это нормальная составляющая поля латентных напряжений, элементарными системами

которых насыщен материал в зоне разгрузки. Разгрузка способствует переходу субстрата в энергетически активное состояние.

Ответ на вопрос о том, достаточна ли энергия для того, чтобы обеспечить процесс дезинтеграции, т.е. что она достигает значений пороговой функции, зависит от ряда конкретных условий. В их числе можно назвать прочность среды, величину разгрузки, но, прежде всего, наличие в среде латентной энергии, которой она запаслась в процессе своей геологической истории и которая имеет в ней место уже до начала разгрузки.

При разгрузке сред энергетически пассивных структурные изменения в зоне разгрузки могут проявляться в вырожденных, зачаточных формах, а сама зона разгрузки существовать только в структурно не проявленной форме как зона измененного напряженного состояния. Самопроизвольное возникновение динамических явлений в этом случае невозможно.

Картина резко изменяется при разгрузке среды энергонасыщенной.

Напомним, что, согласно принципу суперпозиции, среда «в точке» не различает природу действующих на нее напряжений и реагирует на их сумму. При внедрении в энергонасыщенную среду, находящуюся в метастабильном состоянии, добавочное воздействие, обусловленное разгрузкой, нарушает это равновесие и провоцирует динамично развивающийся процесс, внешним выражением которого является широкий спектр динамических явлений и структурная дезинтеграция. Другими словами, разгрузка энергонасыщенных объемов среды играет роль своего рода управляющего воздействия, которое инициирует потерю их устойчивости.

В простейшем случае механизм влияния разгрузки на состояние элементарных полей латентных напряжений можно представить себе следующим образом. Элементарные поля представляют собой системы, в которых уравновешены напряжения разных знаков, например сжимающие и растягивающие. Составляющая сжатия, помимо прочности структурных связей, препятствующих растяжению, включает в себя и внешнее давление, обусловленное весом пород. Если вес пород в процессе разгрузки уменьшается, то «сдерживающую» функцию, соответствующую доле снятой внешней нагрузки, принимает на себя прочность структурных связей. Напряжения растяжения возрастают и, в конечном счете, рвут перенапряженные структурные связи.

Задачи такого рода рассматриваются в инженерных приложениях, например при создании предварительно напряженных материалов и конструкций. Нагрузки создают в таких системах

напряжения, противоположные по знаку. Вследствие этого суммарные напряжения уменьшаются, что, на первый взгляд, кажется парадоксальным. Так, в шпалах рельсового пути из предварительно напряженного железобетона при прохождении по ним поезда напряжения уменьшаются.

В принципе, нетрудно сконструировать подобную систему таким образом, чтобы даже небольшая дополнительная нагрузка на нее или разгрузка вела бы к ее взрывному разрушению. Несмотря на то что создание таких конструкций не представляется особенно сложным, нам, за исключением «батавских слезок», неизвестны случаи их осмысленного создания скорее всего вследствие того, что надобность в подобных изделиях представляется весьма проблематичной. Но зато сама природа и многие технологические процессы поставляют такие системы в удручающем изобилии.

5-4. ЗОНЫ РАЗГРУЗКИ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

5-4.1. Разгрузка при врезе речных долин

В работе [Кутепов, 1973] приведены данные, полученные при детальных инженерно-геологических исследованиях створа Токтогульской ГЭС. Место створа – каньон, образованный в процессе выработки речной долины (рис. 5.3). Борта каньона оконтурены зоной дробления, мощность которой переменна и определяется возрастом склона. Она составляет 2–5 м в пределах современного вреза и постепенно достигает 60–100 м на высоких отметках в пределах среднечетвертичного вреза. Это значит, что мощность зоны разгрузки со временем увеличивается, со временем она поражает все более глубокие части массива. На более древних частях склона, где процесс релаксационной деструкции начался раньше, мощность зоны дробления больше. Со среднечетвертичного времени, т.е. за время около 0,5 млн лет, «волна деструкции» продвинулась в глубину массива на 60–100 м.

Склон речного каньона створа Токтогульской ГЭС сложен известняками. В более прочных породах развитие зоны дробления протекает медленнее. Так, в метаморфических сланцах и роговиках участка створа Саяно-Шушенской ГЭС мощность зоны дробления в пределах средне- и верхнечетвертичного времени составила 2–5 м.

Попутно подчеркнем следующее.

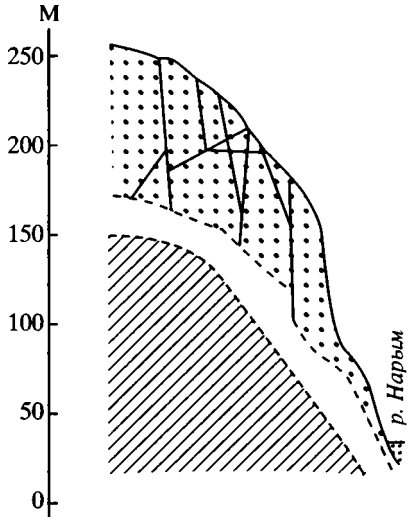


Рис. 5.3. Структурная зональность бортов каньона Токтогульской ГЭС [Кутепов, 1973]

Можно было бы полагать, что горные породы реагируют на разгрузку образованием трещин хрупкого отрыва при быстрой разгрузке, как это, например, иллюстрирует уже неоднократно приводившийся нами случай самопроизвольного разрушения глыб породы, извлеченных из забоя на дневную поверхность, или образование дезинтегрированных ореолов вокруг горных выработок. Однако натурные наблюдения показывают, что точно так реагируют горные породы и на разгрузку, протекающую в геологически медленном темпе. Так, борта каньонов реагируют на разгрузку появлением трещин хрупкого отрыва даже равнинных рек, таких, например, как р. Дон, выработка долины которого осуществляется очень медленно. (Согласно работе [Брылев, 1984], интенсивность денудации за среднемиоцен-четвертичное время по берегам Дона составляет по правому берегу менее 0,001, по левому – около 0,01–0,02 мм/год).

5-4.2. Разгрузка за счет денудации

После того как было обнаружено, что латеральная составляющая естественного поля напряжений может многократно превышать вертикальную, возникло предположение, что она есть выражение перманентных тектонических сил. Наряду с этим появилась точка зрения, согласно которой «избыточные» горизонтальные напряжения есть следствие эрозионной разгрузки положительных форм рельефа. Мысль об этом неоднократно высказывалась разными исследователями и в разное время [Богданович, 1909; Voight, 1966; Пономарев, 1969б; Марков, 1980].

Схема разгрузки за счет денудационного среза рассмотрена в работе [Пономарев, 1971]. Смысл ее в следующем.

На рис. 5.4 точка O_I соответствует уровню рельефа в прошлом, до начала его разгрузки в процессе денудации, точка O_{II} –

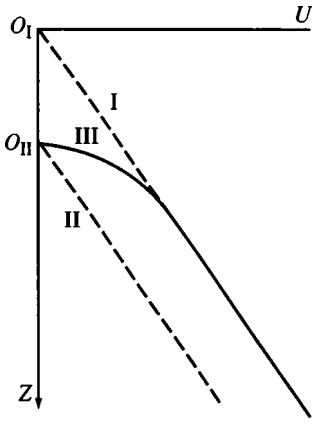


Рис. 5.4. Схема изменения напряженного состояния в верхней части земной коры вследствие денудации положительных форм рельефа

уровню рельефа в настоящем. Ось Z вертикальна. Величина O_I–O_{II} соответствует мощности денудированного слоя. Если бы упругий потенциал среды U определялся только «мгновенными» упругими деформациями, то разгрузка массива выразилась бы в перемещении прямой из положения I в положение II. Однако в действительности часть упругого потенциала, соответствующая той его части, которая при разгрузке перешла в латентную энергию, сохранится в теле, придав суммарной функции U вид, соответствующий положению кривой III. Здесь криволинейный участок соответствует мощности зоны разгрузки, т.е. зоны, в которой протекает процесс релаксации латентной энергии с ее соответствующими структурными последствиями.

Трещины первой генерации соответствуют разгрузке по оси Z. Следовательно, вначале, на первом этапе, высвобождается вертикальная составляющая поля латентной энергии, тогда как горизонтальные составляющие по осям x и y остаются не освобожденными. Измерения, проведенные в массиве на этой стадии его энергетической разгрузки, покажут резкое преобладание горизонтальных напряжений над вертикальными, причем соотношение вертикальной и горизонтальной составляющих с глубиной будет стремиться к 1 и станет равным 1 при углублении за пределы зоны разгрузки. Очевидно, что превышение горизонтальной составляющей над вертикальной будет наиболее значительным под срезанными в процессе денудации положительными формами рельефа. Поскольку же реальный рельеф дифференцирован, то, соответственно, дифференцированным будет и поле напряжений, возбужденное эрозионной разгрузкой.

Как показывает структура полей измеренных напряжений, это, в общих чертах, и наблюдается. Однако действительная картина может осложняться тем, что, помимо латентных напряжений, обусловленных переходом $U_v \rightarrow U_f$, среда, впоследствии подверженная разгрузке, находилась в энергонасыщенном состоянии уже до начала разгрузки. В этом случае энергетика процесса

разгрузки будет определяться также реликтовым запасом латентной энергии. Роль разгрузки в этом случае сведется к роли инициирующего воздействия.

Описывая системы трещин разгрузки, обусловленные денудацией, обычно рассматривают трещины, которые образуются в приповерхностном этаже земной коры на глубинах, не превышающих нескольких десятков метров от разгруженной поверхности. Естественно, что при таких масштабах явления его возможная тектоническая роль видится ничтожной. Поэтому среди геологов существует тенденция рассматривать трещины разгрузки как явление, которое имеет к коренным проблемам геологии весьма отдаленное, второстепенное отношение. И хотя с описательной стороны это явление освещено во многих работах, механизм образования трещин разгрузки, как и физическая сущность этого явления, остались почти не изученными.

Кратко очертим такой аспект этой проблемы.

Зададимся вопросом: что произойдет, если разгрузке будет подвержена не малая локальная область полупространства, как это обычно принимается во внимание, а гораздо более значительная его часть?

Это не умозрительное предположение, а реальная геологическая ситуация, что, прежде всего, относится к обширным областям, которые на протяжении значительного отрезка их геологической истории были областями устойчивого поднятия, например Балтийский щит. В течение истории своего геологического существования денудацией на нем срезан слой пород с мощностью около 50 км на площади в десятки тысяч квадратных километров. То же рассуждение применимо к обширным орогенным областям, примером которых могут служить структуры Памира или Тянь-Шаня.

Если положить объемный вес породы равным 2,5, то вес ее 1 м^3 составит 2,5 т, а вес одного кубокилометра – $2{,}5 \cdot 10^9$ т. Продолжая вычисления в том же духе, нетрудно установить, что по своей грандиозности масштабы разгрузки, обусловленной денудацией, а также объемы дальнейшего перемещении вещества Земли в литодинамическом потоке, задействованном денудацией, среди других тектонических факторов выходят в первый ряд. Рассматриваемый в таких масштабах, процесс разгрузки за счет денудации приобретает значение мощного структурирующего фактора, который играет важную, если не ведущую, роль в тектонической жизни регионов. Он, в частности, сообщает геологической среде ее *первичную латеральную расслоенность*, которая в дальнейших тектонических трансформациях играет роль

наложенных кинематических связей, предопределяющих структурные очертания последующего тектонического формотворчества.

Будь наше построение чисто умозрительным, мы бы не стали о нем здесь упоминать. Но существуют достаточно веские сейсмологические доказательства того, что эта схема действительно реализуется, и что она предопределяет основной структурный мотив континентальной земной коры, по крайней мере в сейсмоактивных регионах. В своем месте эти доказательства будут рассмотрены.

5-4.3. Разгрузка блоков пород при их воздымании

Существует разновидность трещин, механизм возникновения которых связывается с расширением блоков фундамента, испытавших уменьшение нагрузки в процессе вертикального подъема. Так, в работе [Wise, 1964] подобным образом объяснены микротрещины в докембрийском фундаменте Скалистых гор. Они имеют ориентировку, близкую к ориентировке обычных трещин, но являются независимыми по возрасту.

Образование трещинных структур типа «кирпичной кладки» в процессе воздымания гранитоидных массивов рассмотрено в работе [Тихомиров, 1983]. Трещины возникают в результате разрядки напряжений, заключенных в горных породах. По мере денудации плутон постепенно выходит на поверхность и, лишаясь кровли, перестает испытывать петростатическое давление. В результате при разгрузке происходит упругое расширение вверх с образованием пологих трещин отрыва, нормальных к действующей вертикальной силе. «Та же сила, вызывая расширение и выпирание гранитного массива из своей рамы, приводит к формированию в другой, вертикальной плоскости еще одной группы трещин отрыва и скалывания, входящих в общую структуру «кирпичной кладки», – ортогональных и сопряженных с ними диагональных трещин» [Тихомиров, 1983. С. 37].

В работе [Пономарев, 1971] рассмотрена схема разгрузки боковой грани блока, приподнятого по отношению к смежному вследствие их дифференцированного смещения по вертикали.

Суть схемы в том, что блоки пород, контактирующие в плоскости разделяющего их разрывного нарушения, находясь в исходном положении, до начала их относительного смещения по вертикали, на одной и той же уровенной поверхности, подвержены одинаковому литостатическому давлению $P = \gamma h$, где γ – объемный вес пород, h – глубина от поверхности. Однако при смещении

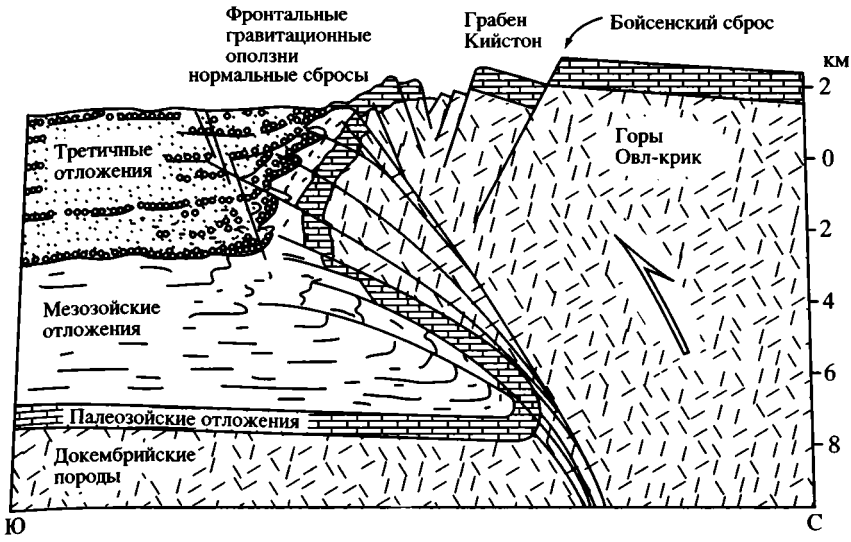


Рис. 5.5. Веерообразное разваливание приподнятого блока [Ажгирей, 1956]

относительно друг друга контактирующие объемы пород на одной уровенной поверхности окажутся подвержены разным давлениям: в приподнятом блоке оно будет больше на величину, пропорциональную амплитуде смещения.

Рис. 5.5 иллюстрирует случай относительного смещения двух блоков по вертикали с амплитудой смещения около 10 км [Ажгирей, 1956]. Смещение такой амплитуды может обеспечить разность давлений в разных блоках на одной уровенной поверхности около 2,7 кбар. На рисунке видна зона деструкции на периферии приподнятого блока, попавшего в условия разгрузки. Ее мощность при выходе на контакт с осадочными породами опущенного блока постепенно возрастает, образуя типичную для таких геологических ситуаций структуру «веерообразного разваливания». Возрастание мощности зоны дробления можно объяснить ее развитием во времени: на контакте консолидированных пород приподнятого блока с осадочными породами опущенного блока создаются условия для расширения первого.

В целом условия формирования напряженного состояния в зоне контакта блоков соответствуют той, которая наблюдалась при разгрузке блоков битума. Но, в отличие от вязкого течения в зоне разгрузки, здесь происходит образование системы трещин хрупкого отрыва, подчиненное сценарию основного структурного стереотипа. Мощность зоны деструкции со временем растет.

Она оказывается тем большей, чем дольше находились породы приподнятого блока в условиях разгрузки подобно тому, как мощность зоны разгрузки возрастает в бортах речного каньона по мере их более длительного нахождения в условиях разгрузки.

Приведенный пример показывает, что переход приподнятого массива в новое равновесное состояние длился по меньшей мере несколько миллионов лет и осуществился к настоящему времени лишь в относительно малой его части, о чем можно судить по мощности образовавшейся зоны деструкции.

5-4.4. Деструктивные ореолы в окрестности горных выработок

Описывая системы трещин, которые образуются по контуру и под днищами строительных котлованов, автор сводки [Прочухан, 1964] к тому же типу трещин, ориентируясь на их морфологическое сходство, относит и системы трещин вокруг горных выработок. Мысль о том, что трещины разгрузки у поверхности Земли и трещиноватость вокруг горных выработок имеют сходную природу, неоднократно высказывалась и многими другими геологами. Среди ранних работ, в которых проводится эта мысль, сошлемся на работу [Михайлов, 1958].

Принципиальное сходство систем трещин разгрузки у дневной поверхности и зон деструкции вокруг горных выработок – сильный аргумент в пользу того, что последние также представляют собой зоны разгрузки. Эта мысль, однако, в механике горных пород так и не прижилась, несмотря на всю ее очевидность. В рамках теоретической парадигмы, господствующей в горном деле, системы таких трещин рассматриваются не как результат разгрузки массивов пород горными выработками, а противоположным образом – как следствие горного давления. Теоретически ведущим типом деформации считается сдвиг (см., например, [Фисенко, 1976]). Видимо, с таким превратным толкованием физико-механической сути процессов, возбуждаемых горными работами, связаны и трудности, с которыми сталкиваются в попытках аналитических исследований проявлений горного давления. Как замечает Г.Л. Фисенко, эти исследования «еще не вышли из стадии решения наиболее простых задач для выработок, расположенных в однородной среде, что является крайне редким случаем в горной практике» (с. 7).

Обращает на себя внимание то, что в окрестности горных выработок наблюдается зональность поля напряжений, качествен-

но сходная с той, какая наблюдается при разгрузке, вызванной денудацией земной поверхности, хотя она объясняется диаметрально противоположным способом: не разгрузкой, а ростом горного давления. Так, в работе [Христианович, Салганик, 1980] отмечатся, что напряженно-деформированному состоянию вокруг горной выработки свойственна четкая зональность. Вблизи свободной поверхности располагается пластичная защитная зона, сложенная раздробленными горными породами с хаотической ориентировкой трещин, разделяющих отдельности. Далее следует зона ориентированных трещин, субпараллельных поверхности забоя, и, наконец, за ней следует упругая ненарушенная зона. Иногда пластичной зоне предшествует зона разрушенных пород в скважинах в виде штыба, в горной выработке – в виде обрушений. В целом схема соответствует основному структурному стереотипу. Детали строения деструктивных ореолов в своих основных чертах те же, что и у систем трещин приповерхностных зон разгрузки, за исключением масштаба и некоторых второстепенных частностей.

5-4.5. Слоистые системы

Как уже отмечалось, естественные двухслойные системы имеют в геологической среде широчайшее распространение и являются ее простейшими универсальными структурными элементами. Таким образом, структурные композиции среды, сколь бы в целом сложны они ни были, состоят из сравнительно простых и единообразных по устройству «первичных» элементов, способных к самостоятельным энергетическим преобразованиям. Эти композиции во многом и предопределяют механическое поведение тех структурных композиций, своеобразной тканью которых являются.

Геологи собрали обширнейший фактический материал о структурном состоянии вещества в зонах разломов, системах трещин на поверхностях напластований и многие другие сведения, которые так или иначе освещают кинетику разрушения естественных двухслойных систем.

Основные особенности разрушения на двухслойных моделях рассматривались выше. Переходя от картины разрушения, наблюдаемой на моделях, к геологической натуре, кинетику разрушения двухслойных систем в целом можно представить как состоящую из трех последовательных стадий. На первой из них в зоне контакта слоев образуется система трещин отдельности, статистически равномерно распределенных по площади контак-

та. Вследствие этого несущая способность материала в этой зоне уменьшается и при критически низких значениях прочности, уже на второй стадии, возникает срыв и смещение слоев друг относительно друга – расслоение системы. На третьей стадии, которую можно назвать стадией послойного течения, происходит дальнейшее смещение бортов образовавшегося разрыва, сопровождающееся ростом мощности зоны дробления, механическим измельчением материала в этой зоне, гидротермальными изменениями и другими сопутствующими процессами.

Причиной появления напряжений в естественных двухслойных системах может быть не только передача ими внешних механических воздействий, но и разнородность физико-механических свойств элементов структуры этих систем или различие протекающих в них процессов.

Одно попутное замечание. Биметаллический термостат демонстрирует еще одну важную сторону поведения неравновесных систем. Нагревание пластинки повышает общую энергию системы, охлаждение понижает. Однако латентная энергия системы возрастает и при повышении, и при понижении температуры, т.е. парадоксальным образом и при повышении, и при понижении общей энергии системы. Различие имеет место только в знаке последующей деформации: пластинка при повышении температуры выше номинальной изогнется в одну сторону, при понижении – в другую. От этого примера можно прийти к весьма глубоким размышлениям о сущности феномена энергии, которая в этом случае выступает не только как мера работы, которую способна выполнить система, но и как мера отклонения системы от равновесия.

Давно обращали внимание на то, что большие землетрясения часто приурочены к зонам сочленения контрастных геологических структур. Нетрудно вообразить систему, подобную биметаллической пластинке, но состоящую не из тонких, сравнительно легко изгибающихся пластинок, а из массивных блоков разнородного твердого субстрата. Возбудить напряжения в такой системе, возрастающие по определенному закону по мере движения к плоскости контакта блоков, могут любые причины, лишь бы они вели к неодинаковым изменениям объема блоков: полиморфные, фазовые или минеральные преобразования; изменения температуры или давления; различные метаморфические или геохимические преобразования; процессы диагенеза и литификации пород и т.д. Таким образом, потоки энергии самой раз-

личной природы, воздействующие на двухслойные системы, могут быть преобразованы ими в потенциальную энергию упругих деформаций.

Рост уровня энергии (и соответствующий ему рост напряжений) в бинарной системе блоков может сопровождаться образованием систем трещин, различными реологическими и другими сопутствующими эффектами, переходом бинарной системы в неустойчивое состояние, вплоть до срыва блоков друг относительно друга по ослабленной поверхности. Хотя взаимное смещение блоков может осуществляться в поле сил, действующих на двухслойную систему извне, ее переход в неустойчивое состояние, ее «созревание» к разрушению может протекать самопроизвольно, за счет внутренних энергетических преобразований. Не исключено, что именно по такой схеме осуществляется подготовка очагов больших землетрясений.

Если зоне, в которой осуществляется срыв блоков, ставить в соответствие очаг землетрясения, то из этого следует, что накопление энергии, высвобождаемой в очаге землетрясения, происходит в объеме среды, который соответствует размеру бинарной системы геоблоков. Это соответствует результатам работ, в которых указывается на вероятность того, что формирование и излучение сейсмических волн происходит в области, окружающей область разрывных нарушений и превышающей ее по размерам примерно на порядок [Кальметьева, 1988]. Об этом же говорят и данные о смещениях на поверхности в эпицентральных зонах больших землетрясений (см., например, [Рикитаке, 1979]).

Особенностью течения разрушения на второй стадии является его динамичный характер. Процесс срыва слоев нередко протекает взрывообразно. Своеобразными моделями этого процесса могут служить некоторые изделия с двухслойной структурой, возникающей в результате неравномерного их остывания. Примером может служить приводившийся выше пример динамичного разрушения стальной балки. Точно так (взрывом) разрушается закаленное стекло, поверхность которого затвердевает быстрее, чем внутренний слой. Подобное взрывообразное разрушение слоя канифоли наблюдалось и в двухслойных моделях с жестким основанием. По-видимому, к этому же кругу явлений относится и то, что очаги горных ударов, возникающих в подземных выработках, часто приурочены к контактам пласта полезного ископаемого и вмещающей породы.

Коснемся некоторых особенностей разрушения на третьей стадии.

Как известно, взаимное смещение блоков геологической среды может протекать в различных режимах: в «криповом», асейсмичном и «импульсном», сейсмичном. Появление сейсмических эффектов разной энергии, по всей видимости, связано с разными механизмами, проявляющимися на различных уровнях иерархической организации геологической среды. В частности, повышение склонности породы к образованию хрупких разрывов может быть связано с вовлечением ее в процесс пластичного течения, в результате которого в ней возникают деформационные латентные напряжения. Примером могут служить латентные напряжения, которые возникают при полировке и шлифовании стальных поверхностей. Они могут вести к растрескиванию и даже взрывообразному разрушению изделий. Возможно, этот же механизм реализуется в виде хрупкого разрушения «зеркал скольжения», образующихся на поверхностях контакта взаимно смещающихся блоков пород.

5-4.6. Зоны разрывных нарушений

Среди разрывных нарушений будем различать *трещины* и *разрывы*. Трещины представляют собой две сомкнутые разрывные поверхности, тогда как разрывы характеризуются наличием более или менее развитых зон приразрывного дробления и трещиноватости (см., например, [Несмеянов, 2004]). Зоны дробления испытывают определенную эволюцию, вследствие чего их современная структура, отражающая, помимо специфики исходных условий, еще и моменты этой эволюции, отличается и разнообразием, и сложностью. Тем не менее, сквозь хаос структурного многообразия в строении таких зон просвечивает и некоторая общая основа. Это особенности структуры, которые соответствуют формированию зон дробления по сценарию фрагментации и сообщают им неповторимое своеобразие универсального структурного стереотипа, свойственного зонам разгрузки. На этой стороне дела мы и сосредоточим наше внимание.

С точки зрения энергетического подхода, развиваемого в настоящей работе, разрывные нарушения, структура которых следует универсальному структурному стереотипу, есть следствие энергетической разгрузки массивов геологической среды. Насколько этому соответствуют факты?

По С.А. Несмеянову, *разрывная зона* представляет собой трехмерное (объемное) тело, различное по строению в разных своих частях. Последние целесообразно выделять в качестве под-

зон: подзон *сместителя, аномальной трещиноватости, тектонического клина.*

«Подзона сместителя состоит из тектонически раздробленных, т.е. тектонокластических, пород, которые часто рассечены субпараллельными и (или) расположенными кулисообразно трещинами» [Несмеянов, 2004. С. 91].

Уточним: в определение «тектонический» часто вкладывается смысл трансляционного смещения берегов разрывных смещений относительно друг друга. Трещины или зоны трещин, по которым сколь-нибудь значимые смещения отсутствуют, принято называть диаклазами. В процессе смещения породы в подзоне сместителя подвергаются динамометаморфизму вплоть до образования милонитов. «Поскольку в зонах сместителя часто происходит интенсивная циркуляция подземных вод, тектонокластические породы подвергаются различным вторичным изменениям» [Несмеянов, 2004. С. 92]. Восстановить исходный структурный рисунок фрагментов, вовлеченных в процесс динамометаморфизма и гидротермальных изменений, как правило, не представляется возможным.

Подзона аномальной трещиноватости характеризуется тем, что плотность трещин в этой подзоне существенно более высока, чем «фоновая» трещиноватость за пределами разрывной зоны, причем значения плотности трещин в этой подзоне градиентны: они возрастают по мере движения в направлении сместителя. При этом плотность трещин возрастает за счет сгущения все более коротких (мелких) трещин и появления все более мелкой трещиноватости. «Соответственно, пояс интенсивной трещиноватости, как правило, наиболее узкий, характеризуется резким увеличением густоты мелких, хаотично расположенных трещин. Упорядочение ориентировки трещин по мере удаления от подзоны сместителя в первую очередь проявляется у наиболее крупных трещин и постепенно распространяется на все более мелкие» [Несмеянов, 2004. С. 92].

Итак, в обобщенной картине строения подзон аномальной трещиноватости, обрисованной С.А. Несмеяновым, налицо все основные признаки структурного стереотипа зон разгрузки. В зоне разгрузки выделяется пояс хаотически ориентированной мелкой трещиноватости, примыкающей к поверхности разгрузки: ее в данном случае исполняет подзона сместителя; далее следует пояс ориентированной трещиноватости, представленной более редкими, но более протяженными трещинами, ориентированными субпараллельно сместителю.

Указанные особенности в том или ином контексте отмечены и другими исследователями. Так, Р.М. Лобацкая [1987] считает,

что внутреннее строение крыльев разлома определяется присутствием оперяющих разрывов, параллельных или близкопараллельных основной плоскости сместителя. При удалении от основной плоскости длины оперяющих разрывов закономерно увеличиваются. Некоторые исследователи выделяют зону динамического влияния разрывного нарушения, включающую собственно разрывную зону (зону разлома) и обрамляющие ее зоны разрывного оперения. В работе [Шерман и др., 1991] отмечено, что разрывы, сопутствующие основному разрыву, ориентированы субпараллельно последнему и по мере удаления от него, убывая в числе, становятся более протяженными.

При движении по простиранию разрывного нарушения в типичном случае распределение трещин характеризуется чередованием участков повышенной трещиноватости – *деструктивных полей* – с относительно мало раздробленными участками [Лобацкая, 1987].

По работе [Фисенко, 1976. С. 32]: «В массивах интрузивных пород кислого состава, не подвергавшихся динамометаморфизму, трещины большого протяжения ориентированы параллельно разлому и дизъюнктивным нарушениям; трещины отдельности большею частью ориентированы близко к нормальному положению относительно трещин большого протяжения».

Таким образом, основные структурные особенности, присущие строению зон разрывных нарушений, соответствуют основному стереотипу структуры зон разгрузки. Как будет показано в главе 6, они отчетливо проявлены в особенностях природной, шахтной сейсмичности и сейсмичности, наведенной различными техногенными воздействиями.

Как и дневная свободная поверхность, берега разрывных нарушений или их осевые зоны являются поверхностями разгрузки. Но если в отношении свободной поверхности затруднено высвобождение латеральной составляющей поля напряжений, то в отношении разрывных нарушений затруднено высвобождение составляющей, нормальной к их простиранию. Однако возможны условия, которые приводят в последнем случае и к условиям, благоприятным для высвобождения нормальной составляющей.

Условия разгрузки, например, могут возникнуть при уменьшении величины сжимающих тектонических напряжений или, тем более, при смене тектонических условий сжатия условиями растяжения. В работе [Wise, 1964] описаны специфические тектонические трещины. Они возникают на последней стадии деформаций после прекращения воздействия внешних сил, нормальны к направлению максимального сжатия и в американской

литературе получили название «трещин освобождения». В работе подчеркивается сходство таких трещин по механизму их образования с трещинами, которые получил П. Бриджмен при одноосной разгрузке сжатых образцов.

5-4.7. Устойчивость горных сооружений

В релаксирующем массиве условно, без четких границ, можно выделить две области: центральную область массива, его «сердцевину», – реликтовое «ядро», находящееся в исходном, пока ненарушенном напряженном состоянии, и область, которую мы выше определили как зону релаксации.

Зона релаксации представляет собой своего рода защитную *оболочку* реликтового ядра. Это не только арена прогрессирующих преобразований, мигрирующих в глубину тела в виде своего рода волны разгрузки. Оболочка выполняет еще и консервативную функцию: она играет роль своего рода защитного экрана, который предохраняет или, во всяком случае, замедляет, демпфирует влияние изменившейся внешней обстановки на состояние внутренних, глубинных частей релаксирующего тела. На резкое изменение внешней обстановки блок битума отреагировал быстрым, сравнимым по времени образования с временем релаксации, созданием *защитной оболочки,* которая резко замедлила дальнейший прогресс перехода внутренних частей блока в новое состояние.

Представление о зонной релаксации позволяет наметить конструктивный путь к решению проблемы, известной в науках о Земле как «парадокс устойчивости горных сооружений». В свое время он активно обсуждался такими выдающимися геофизиками, как Г. Джеффрис и Б. Гутенберг.

Суть проблемы в следующем. Исходя из существующих оценок времени релаксации пород, слагающих горные сооружения, срок существования этих сооружений и определялся бы этим временем. Б. Гутенберг: «Постоянство соотношения между материковыми массами и океаном доказывает, что породы сиаля выдерживают в течение миллиарда лет те весьма значительные скалывающие напряжения, которым они подвергаются. Доступный наблюдению закристаллизованный материал слоя симы имеет сопротивление того же порядка, о чем можно заключить на основании длительного существования высоко поднятых базальтовых вулканов и упорного сопротивления базальта и габбро действию силы тяжести, длящемуся миллионы лет» [Внутреннее.., 1949. С. 25].

Б. Гутенберг, Г. Джеффрис и ряд других авторитетных геофизиков придерживались взгляда, что вещество оболочки Земли

имеет конечный порог текучести и подчиняется закону упругости пока разность напряжений не достигнет этого порога. «Имеется, однако, группа геофизических гипотез, – замечал Б. Гутенберг, – приписывающих материалу оболочки способность течь под воздействием любой разности напряжений, как бы мала она ни была» [Внутреннее..., 1949. С. 28].

Заметим, что оценки времени релаксации порядком их величины 20–30 тыс. лет исходят из гипотезы об отсутствии значимого порога текучести. С точки зрения этой оценки, длительное существование горных сооружений невозможно в принципе. С другой стороны, допущение о существовании значимого порога текучести является тоже весьма сильным. Это допущение по существу отрицает возможность процессов релаксации ниже предела текучести. Другими словами, породы, напряжения в которых не достигли этого предела, рассматриваются как не релаксирующие в принципе, т.е. как породы, обладающие ниже этого предела свойством идеальной упругости. Такая точка зрения находится в принципиальном противоречии с существующими физическими представлениями.

Указанные противоречия снимаются в рамках модели зонной релаксации.

Говоря об устойчивости горных сооружений и иных геологических тел, длительное время находящихся в состоянии их гравитационной неустойчивости, имеют в виду их существование как целого, вовсе не считая, что их субстрат не подвержен деформациям и разрушению. Однако процессы, обусловленные их гравитационной неустойчивостью, сосредоточены в их защитных оболочках – зонах релаксации. Оболочки, с одной стороны, подвержены процессам релаксации, с другой стороны, они подвержены эрозии и иным экзогенным многосторонним воздействиям. Вследствие этого они «текут», разрушаются, продукты их разрушения удаляются, но реликтовые ядра таких геологических тел остаются в нетронутом состоянии, со временем генерируя новые защитные оболочки на смену уже разрушенным.

Следует иметь в виду и то, что положительные формы рельефа непрерывно обновляются. К дневной поверхности со временем выходят породы, которые в начале цикла воздымания находились на многокилометровых глубинах. Горное сооружение, как целое, не только *сохраняет* себя, но оно еще и себя *воспроизводит*. В нем протекают взаимодействующие встречно направленные процессы, напоминая в какой-то мере процессы ассимиляции и диссимиляции, которые обеспечивают функционирование живых организмов.

ТЕКТОНИКА И СЕЙСМИЧНОСТЬ

О природе землетрясений уже с XIX в. утвердилось представление, что они являются следствием тектонических сил. Так, А.П. Орлов [1887. С. 124] писал: «Направление действия потрясающих сил обусловливается направлением осей поднятия или направления, в котором действовали, а может быть, еще действуют и теперь силы, обусловившие тот или другой орографический характер данной страны... Сила, медленно и спокойно изменяющая уровень страны в известном направлении, и сила, быстро совершающая изменение того же уровня в том же направлении, суть модификации одной и той же силы, сущность которой хотя в настоящем времени и неизвестна, но которая при одних условиях совершает свою неслышную работу медленно и без всяких порывистых движений, а при других обстоятельствах та же работа и в том же направлении совершается быстро».

Представление о том, что сейсмичность представляет собой прямое отражение тектонических движений, разумеется, с поправкой на возросший уровень знаний и эволюцию представлений о сущности тектонических процессов, в своей принципиальной основе сохранилось до наших дней.

Вместе с тем в настоящем накоплен большой фактический материал об особенностях сейсмической жизни сейсмоактивных регионов, который показывает, что представление о сейсмичности как об отражении прямых тектонических воздействий является упрощенным.

Представление о сейсмичности как явлении, сопутствующем тектонической деятельности, требует ясности в двух отношениях.

Во-первых, пока полной ясности нет ни в том, что подразумевается под тектоническими силами, ни в том, что следует отнести к тектоническим трансформациям геологической среды.

Во-вторых, если допустить, что силы одной и той же природы действуют в земной коре повсеместно, то почему в одних случаях их действие сопровождается появлением сейсмичности, а в других протекает асейсмично, на что и обратил внимание еще А.П. Орлов.

Мы не в состоянии исчерпывающе ответить на эти вопросы, но вместе с тем должны как-то определиться в весьма пестром множестве точек зрения, высказываемых по поводу этих проблем.

6-1. ТЕКТОНИЧЕСКИЕ СИЛЫ И ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ

По поводу природы тектонических сил разными исследователями высказывалось так много разных точек зрения, что их обстоятельный обзор, снабженный подобающими комментариями, сам по себе мог бы составить отдельную книгу. Чтобы определить сущность развиваемых нами представлений в этом номенклатурном множестве, мы, прежде всего, будем различать подходы, которые традиционно разделяет большая часть исследователей, – назовем такие подходы *традиционными,* и подходы *экзотические,* которые разделяют лишь отдельные исследователи или их относительно небольшие группы.

Традиционный подход во взгляде на тектонические силы совпадает с представлением о силах, принятым в континуальной механике. Общий момент этого подхода содержит два основных положения. Во-первых, предполагается, что тектонические силы, воздействующие на объем среды, являются по отношению к этому объему внешними («принцип пассивности геологической среды»). Система возбуждения сил содержит три основных звена: рабочее тело, на которое сила воздействует, источник энергии, который обеспечивает работу этой силы, и механизм передачи энергии рабочему телу от ее источника. В традиционных представлениях исходят из того, что источник энергии находится вне рабочего тела. Во-вторых, в рамках традиционного подхода принимается, что моменты приложения нагрузки и пребывания тела в упруго деформированном состоянии совпадают. Есть сила – есть деформация, нет силы – нет деформации. В рассматривавшейся выше модели Кельвина такого рода силы и деформации были определены как «мгновенные». Они представляют собой силы непосредственного действия. Назовем их здесь условно, в рабочем порядке, *силами первой группы.*

Развиваемые нами представления можно отнести к экзотическим. Их основные положения в отношении тектонических сил сводятся к следующим утверждениям. Во-первых, тектонические силы могут возбуждаться в тех же объемах среды, на которые они воздействуют, т.е. в одном и том же объеме среды совмеще-

ны и рабочее тело, и источник энергии, и механизм передачи энергии рабочему телу от ее источника («принцип активности геологической среды»). Во-вторых, появление «внутренних» сил обеспечивает собственный энергетический потенциал среды, которым она может располагать и при полном отсутствии внешних механических сил, действующих на данный объем. Назовем их здесь условно, в рабочем порядке, *силами второй группы*.

Заметим, что развиваемые нами представления, построенные на таком основании, не являются уникальными. В разное время, в той или иной форме, на различных понятийных базах, на разном материале и с разной степенью определенности подобные взгляды высказывались другими исследователями (см., например, [Захаров, 1979; Булин, 1971; Гончаров, 1979,1988; Гаврилов и др., 2000]). Особенность развиваемых нами представлений лишь в своеобразии разработанной нами физической модели энергонасыщенной геологической среды, включающей в себя ряд нововведений: таких, как представления о фиксированных упругих деформациях, зонной релаксации, хрупком последействии и др., всестороннее рассмотрение которых и составило основное содержание настоящей работы. В целом, разработанная система представлений в параллель физической мезомеханике может быть определена как *физическая энергомеханика*. Она выработана и применена для изучения энергонасыщенных геологических тел, но перечень объектов, подлежащих ее компетенции, выходит далеко за рамки геомеханики.

Высказанные утверждения вместе с тем не являются отрицанием положений традиционного подхода. В обоих случаях речь идет не о разных подходах к исследованию явления тектонических трансформаций, а об исследовании разных сторон этого явления. В общем случае тектонические проявления могут быть результатом совместного действия сил, разных по своей природе и характеру вызываемых ими деформаций.

В такой постановке возникает вопрос: какого рода деформации испытывает среда под действием сил первой и второй групп? Существуют ли такие различия? По сути, мы уже ответили на этот вопрос раньше: результатом действия сил первой группы является разрушение первого рода, результатом действия сил второй группы – разрушение второго рода. Таким образом, мы располагаем структурным критерием, который позволяет установить, какого рода силы создавали данную структурную композицию, или определить долю участия сил разных групп в ее создании. Трудность решения проблемы не представляется не-

преодолимой. Она в другом: вопрос о существовании разных сценариев разрушения вообще не ставится.

Еще раз подчеркнем: речь идет о частном случае разрушения, когда геологическая среда ведет себя как твердотельная система. Другие случаи, когда геологическая среда ведет себя, например, как вязкая жидкость, в настоящей работе не рассматриваются.

Переходя к вопросу о том, в каких формах выражается действие тектонических сил, прежде отметим, что под их действием тела могут и деформироваться, и перемещаться, а также вращаться как целое. В каких-то случаях деформации и перемещения слиты нераздельно, например при вязком течении. К тектоническим деформациям относят необратимые, остаточные деформации. Иногда под тектоническими деформациями понимают и перемещения. Известно представление о дизъюнктивных, пликативных деформациях и т.д. Не пытаясь привести в систему различные виды тектонического формотворчества, мы попытались подойти к этой проблеме несколько иначе.

Разделение сил на две группы ставит новый вопрос. Согласно традиции, под тектоническими деформациями понимают деформации, которые возникают при воздействии сил первой группы. Вопрос в следующем: можно ли относить деформации под действием сил второй группы к тектоническим?

Вопрос отнюдь не формальный. Рассмотрим его существо на «живом» примере. Среди геологических структур выделены в особый тип широко встречающиеся в геологической натуре *диаклазы* – «тектонические разрывы или трещины, вдоль которых не происходило относительных перемещений разделенных ими горных пород» [Геологический..., 1978]. К этому типу трещин относят, в частности, планетарную трещиноватость и блоковую делимость земной коры. Мы определили их как структуры, которые возникают под преобладающим действием сил второй группы.

Определение «тектонические» применительно к разрывам, по которым не осуществляются тектонические движения, звучит как логический диссонанс или требует исключительно широкой трактовки этого определения. Известны, например, серии трещин, которые образуются в процессе литификации осадочных пород или при остывании интрузивных тел. Они подпадают под категорию диаклазов. В каком-то очень широком смысле их можно называть «тектоническими», поскольку они в качестве «первичной» трещиноватости создают в среде систему наложенных кинематических связей, по которым впоследствии осуществляются собственно тектонические перемещения масс. С другой стороны, сами эти явления представляют собой последствия оп-

ределенных тектонических процессов. Поскольку же, как известно, «в природе все взаимосвязано», то возникает вопрос о том пределе, до которого можно использовать это определение в цепи всеобщей связи геологических явлений.

Некоторые исследователи не считают диаклазы тектоническими образованиями. Они выделяют их в особый тип трещин. Особый не только по формальному признаку наличия или отсутствия смещений по ним, но по их выраженности и происхождению. На наш взгляд, это лучше соответствует природе этого явления. Во всяком случае, такой подход не навязывает явлению опережающего смысла, который может оказаться чужд происхождению трещин этого типа.

Не исследуя логических оснований критериев, по которым результаты действия тектонических сил следует отнести или, наоборот, не следует отнести к тектоническим деформациям, оставляя это поле дискуссий, мы станем далее рассматривать эти результаты по тому, какой группой сил они обусловлены.

В каких-то случаях определить, силами какой из групп обусловлено возникновение тех или иных деформаций и перемещений, затруднительно. В каких-то случаях проявлены результаты наложенного действия сил обеих групп: одновременного или разнесенного во времени. Однако во многих реальных ситуациях различия в характере разрушения выражены с отчетливостью, которая позволяет уверенно определять, силами какой группы наблюдаемые деформации были вызваны. Так, действием сил второй группы обусловлены структуры, сформированные в соответствии со сценарием фрагментации, и, в частности, структуры, в которых проявлен основной структурный стереотип.

Поскольку тектоническая деятельность сил второй группы исследована гораздо меньше, чем первой, на этом аспекте тектонического формотворчества мы далее и остановимся, а вовсе не потому, подчеркнем еще раз, что мы считаем деятельность этих сил более важной, чем деятельность сил первой группы.

6-2. ПРОБЛЕМА «СЕЙСМИЧНОСТЬ–АСЕЙСМИЧНОСТЬ»

За исключением землетрясений, вызванных обрушением внутренних полостей или вулканической деятельностью, природные землетрясения называют *тектоническими*. Этим с полной определенностью указывается на то, что сейсмичность рассматривают как одно из проявлений тектонической деятельности,

протекающей в недрах планеты. Из этого следует и то, что в особенностях проявлений сейсмического режима, т.е. в особенностях совокупного поведения множества землетрясений с разной энергией в пространстве–времени, каким-то образом должны быть проявлены и особенности тектонической жизни сейсмоактивных регионов.

В этом отношении сейсмичность может рассматриваться как своего рода ключ к пониманию сущности тектонических и геодинамических процессов, как инструмент их исследования. На основании анализа сейсмического режима можно высказать ряд заключений, которые по своему значению могут рассматриваться как вполне определенно проявленные эмпирические закономерности, отражающие свойства тектонических воздействий, по крайней мере, в той степени, в какой они отражены сейсмичностью. Мы можем не знать природы действующих факторов, но мы можем наблюдать, как они действуют, и впредь на этой основе выдвинуть и более обоснованные суждения об их возможной природе.

В этой связи, прежде всего, возникает кардинальный вопрос, уже поставленный выше: какова причина двойственной реакции геологической среды на силовые воздействия? Почему в одних случаях деятельность тектонических сил сопровождается появлением сейсмичности, а в других эта деятельность осуществляется асейсмично? При этом интенсивность современных тектонических деформаций, выраженная, например, скоростью смещения блоков коры по разрывным нарушениям, может быть весьма значительна в сейсмоактивных и асейсмичных регионах. Ориентируясь на этот факт, мы должны допустить: в сейсмоактивных и асейсмичных регионах все же действуют тектонические силы разной природы либо по каким-то причинам в этих регионах различен отклик среды на одни и те же по своей природе тектонические воздействия.

Мы придерживаемся второй версии.

В настоящей работе сделана попытка показать, что сейсмичность есть одно из проявлений естественной энергонасыщенности геологической среды. Она возможна только в энергонасыщенном субстрате. Сейсмическими эффектами сопровождаются тектонические подвижки только в энергетически активных объемах среды. В среде энергетически пассивной «порывистые» движения невозможны. Таким образом, мы приходим к тому, что участие современных тектонических движений в возбуждении сейсмичности, скорее, является косвенным, чем прямым. С изложенной точки зрения сейсмичность рассматривается как прямое

отражение структурной дезинтеграции энергонасыщенной геологической среды.

В этом плане вопрос о связи сейсмичности и тектоники приобретает иной ракурс. Ответ на него содержится в уяснении того, в какой мере тектонические процессы ответственны за сообщение среде ее собственного энергетического потенциала. Нам представляется весьма вероятным, аргументы в пользу этой точки зрения будут высказаны по ходу дальнейшего изложения, что вклад современных тектонических сил в энергетику сейсмичности сравнительно невелик. Они могут оказывать на пространственно-временное поведение сейсмичности управляющее или инициирующее воздействие, но сам резервуар энергии, из которого ее черпают землетрясения для своего появления, есть результат деятельности процессов, длившихся геологически долго. Это может быть результат не только длительных направленных тектонических движений, но и иных преобразующих процессов – механических, физических или химических, следствием которых, в конечном счете, являются и сами тектонические процессы.

В проявлениях тектонической жизни Земли просматривается два принципиально разных стиля поведения геологической среды, вовлекаемой в тектонические процессы. Один из них свойствен среде энергетически активной, энергонасыщенной, другой – среде энергетически пассивной. При этом в разных звеньях системной взаимосвязи геодинамических процессов и на разных стадиях их эволюции, с разной степенью выраженности проявляются оба стиля. Но, как это отмечалось в самом начале этой книги, в настоящем основное русло в исследованиях тектоники земной коры тяготеет к берегу, в свое время четко обозначенном М.М. Тетяевым, который не признавал активности земной коры и рассматривал ее как пассивный субстрат, подверженный действию внешних сил. Поэтому мы сосредоточимся на тех особенностях проявлений сейсмичности, природной и наведенной техногенными воздействиями, которые прямо или косвенно подпадают под юрисдикцию высказанного нами основного тезиса, состоящего в том, что сейсмичность – по крайней мере, сейсмичность континентальной земной коры, – следствие разгрузки собственного энергетического потенциала пород земной коры, запасенного ими в процессе предшествующего геологического развития.

6-3. ДЕСТРУКЦИЯ СРЕДЫ В СЕЙСМИЧЕСКОМ ОТОБРАЖЕНИИ

В настоящее время разработаны и применены различные методы локации очагов упругих импульсов в пространстве разрушаемых объектов: от лабораторных образцов до геологических тел глобального масштаба. Это позволяет получать своего рода голографические отображения соответствующих структур разрушения. Современные системы прецизионных сейсмологических наблюдений позволили накопить богатый материал, из которого можно получить представление о пространственном распределении очагов упругих (сейсмических) импульсов в геологических телах.

Так, после Хаитского землетрясения 1949 г. в Гармском районе Таджикистана была развернута плотная сеть сейсмических станций на стыке горных сооружений Памира и Тянь-Шаня, где сейсмическая активность была самой высокой во всей континентальной части СССР. С помощью этой системы наблюдений здесь на площади 1 град^2 были зарегистрированы десятки тысяч землетрясений, очаги которых определялись с ошибкой до 1 км относительно сетки географических координат. Точность расположения очагов относительно друг друга в их локальных группах была еще выше. Систему сейсмологических наблюдений на Гармском полигоне можно сравнить с мощным телескопом, направленным в недра Земли. Автор имел счастливую возможность длительное время поработать с этим «телескопом».

В 80-е г. XX в. отмечена исключительно высокая активность горных ударов и других динамических явлений на шахтах Североуральского бокситового рудника (СУБРа). Здесь также была развернута высокоточная система сейсмологических наблюдений с установкой датчиков на поверхности и в горных выработках удароопасных шахт. Автор принимал участие в программе, нацеленной на уяснение причин столь высокой удароопасности этого рудника.

Таким образом, располагая данными столь прецизионных наблюдений, автор получил уникальную возможность изучить тонкую структуру полей сейсмичности, природной и наведенной горными работами. Результаты этого изучения указывают на то, что разрушение объемов геологической среды в обоих случаях в своих основных чертах протекает в соответствии со сценарием фрагментации. Перейдем к рассмотрению этих и им сопутствующих материалов.

6-3.1. Динамические явления в горных выработках

Очаги событий наведенной сейсмичности, как и очаги природных землетрясений, обычно недоступны для непосредственного наблюдения. Их фиксируют геофизическими средствами, главным образом регистрируя записи колебаний, излучаемых очагами. Исключение составляют подземные работы, в процессе которых вскрываются очаги отдельных сейсмических событий и места их массового проявления. В этом случае структурные трансформации среды, которые сопровождаются сейсмическими эффектами, можно наблюдать непосредственно.

К динамическим явлениям, т.е. к явлениям, которые сопровождаются излучением упругих волн, относятся: *шелушение* стенок выработки, *стреляние* горных пород, *заколообразование, микроудары, горные удары, внезапные выбросы.* В чисто сейсмологическом отражении различают: 1) *сейсмоакустическую эмиссию* («акустическую шумность») пород; 2) *сейсмические толчки,* или *шахтные землетрясения*, возбуждаемые горными работами вблизи контура подземной выработки; 3) *тектонические горные удары* – сейсмические события, возникающие в глубине разрабатываемого массива на удалении порядка многих десятков и сотен метров от контура выработки.

Кратко остановимся на выраженности обозначенных явлений.

Эффект стреляния горных пород заключается в том, что от контура выработки с сильным звуком, достигающем силы ружейного выстрела или даже взрыва шпурового заряда взрывчатки, отскакивают пластины обычно линзообразной формы. Интенсивное стреляние обычно наблюдается в прочных упругих породах. Эффект шелушения горных пород представляет собой следующую стадию дезинтеграции пород, следующую за стрелянием. Согласно работе [Марков, 1981], после активной фазы стреляния, непосредственно вслед за проходкой выработок, процесс разрушения переходит в более спокойную фазу шелушения горных пород. Порода на контуре выработки расслаивается на тонкие пластинки, плоскости которых примерно параллельны контуру выработки независимо от ориентировки естественной слоистости руд и пород. Оборка отслоившейся породы вызывает новую активацию процессов стреляния и шелушения. Процесс шелушения, по наблюдениям, не прекращается в течение 10 лет и более. В рамках развиваемых нами представлений стреляние пород представляет собой одну из форм образования трещин разгрузки первых генераций, тогда как шелушение –

это дальнейшее измельчение материала трещинами последующих, более высоких генераций.

Горный удар – это практически мгновенный выброс угля, породы или того и другого вместе в результате их предельного напряженного состояния подобно тому, как это происходило бы при химическом взрыве. Сильный горный удар сопровождается резким звуком и сотрясением окружающих пород, ощущаемым на поверхности в радиусе до нескольких километров. Породы, ослабленные ударом, растрескиваются, теряют свою устойчивость и часто обрушаются, заваливая выработку [Авершин, 1955].

Внезапным выбросом угля и пыли считается явление лавинно нарастающего смещения угля с обнаженной поверхности угольного пласта. Выброс сопровождается отбросом угля и тонким его измельчением, необычно большим выделением газа в короткое время и образованием характерной полости в пласте. «Несмотря на обилие и разнообразие собранного фактического и опытного материала, проблема борьбы с внезапными выбросами до настоящего времени остается неразрешенной. Общепризнанной теории внезапных выбросов угля и газа нет, и природа их не установлена» [Кравцов, 1982. С. 107]. Попытки объяснить природу выбросов вращаются главным образом вокруг идеи о непосредственном механическом действии сжатого газа. Так, до недавнего времени имела хождение гипотеза, согласно которой выбросы обеспечивает скопление газа в *суфлярах* – гипотетических подземных пустотах, в которых газ может находиться при очень высоких давлениях.

Ввиду исключительной злободневности проблемы происхождения внезапных выбросов, отвлечемся на то, как она выглядит с точки зрения развиваемых нами представлений, обозначив наше построение в целом как *гипотезу секционированного суфляра.*

Уже в первой четверти XX в. было известно, что одной из причин аварийных взрывов химических реакторов является имплантация молекул метана и водорода, содержащихся в реагенте, в кристаллические решетки стальных корпусов этих реакторов. Газонасыщенные материалы вместе с тем становятся и энергонасыщенными, а тем самым и способными к самопроизвольному, динамически протекающему хрупкому разрушению. Между тем, предположение о том, что процесс внезапного выброса может обусловить высвобождение латентной энергии, обеспечиваемой внедрением газа в кристаллические решетки минералов, составляющих горную породу, кварца, в первую очередь, предположение, которое, казалось бы, «лежит на поверхности», к объяснению причин выбросов не привлекалось.

Перед внезапными выбросами наблюдается экспоненциальное возрастание *акустической шумности*. Центральные участки полостей будущих выбросов находятся на глубине 2–6 м от поверхности забоя. Примерно на этих же участках угольных пластов сконцентрировано максимальное количество очагов, генерирующих акустическую шумность [Константинова, 1967]. Согласно нашим представлениям, максимум акустической шумности наблюдается в зоне гребня потенциальной функции и далее, в глубь массива, в зоне образования ориентированной трещиноватости. Разгрузка массива горными работами влечет интенсивное выделение газа в образующиеся трещины, создавая этим некоторое подобие «секционированного суфляра». Поскольку трещины первых генераций субпараллельны форме выработки, а трещины, нормальные к ним, на стадии образования ориентированной трещиноватости отсутствуют, открытые каналы дегазации быстро образующихся локальных резервуаров свободного газа тоже отсутствуют. Разность давления между свободным газом в трещинных резервуарах и на свободной поверхности выработки со временем становится все более значительной. Достигнув критических значений, разность давления совместно с появлением трещин последующих генераций разрушает породную пластину, ближайшую к свободной поверхности, а далее подобно эффекту «домино» начинается каталитический процесс разрушения серии последующих пластин, который может получить развитие по схеме взрыва.

Поскольку молекулы газа внедрены в среду на уровне ее кристаллического строения, процесс дезинтеграции породы быстро распространяется на глубинные уровни ее строения. Связанный газ переходит в свободное состояние. Это вызывает дальнейшую дегазацию и сопряженную с ней дезинтеграцию вплоть до образования большого количества пыли и так называемой взрывоопасной «бешеной муки». Практически мгновенное образование пылеобразной фракции из твердого субстрата чисто механическим путем, как это, например, достигается в «шаровых мельницах» при производстве цемента, представляется маловероятным. Разработанная должным образом физическая модель образования пылевидной фракции может оказаться ключом к пониманию природы внезапных выбросов и уяснения причин образования огромных количеств пыли, выбросы которой сопутствуют эксплозивным вулканическим извержениям.

Сейсмический толчок – это по существу шахтное землетрясение. Оно может ощущаться в выработке как сотрясение массива, без видимых разрушительных последствий, так и сопровож-

даться ими. В последнем случае оно представляет собой горный удар. Однако понятия «сейсмический толчок» и «горный удар» не эквивалентны. Хотя толчки и сопутствуют горным ударам, между масштабом разрушений, причиняемых горными ударами, и энергией толчков значимая корреляция отсутствует.

6-3.2. Шахтная сейсмичность

Уникальным объектом, своего рода полигоном для изучения сейсмического режима шахтной сейсмичности является Североуральский бокситовый рудник. Приведенные ниже сведения, касающиеся сейсмичности этого рудника, представляют собой компиляцию, составленную по работам [Винокур, 1978; Горев, Микулин, 1979; Микулин, 1982; Винокур и др., 1983; Дорошенко и др., 1986; Пономарев и др., 1992; Адушкин, Турунтаев, 2005].

При чрезвычайно высокой активности шахтной сейсмичности на шахтах СУБРа здесь с 1981 г. функционировала система сейсмологических наблюдений. С ее помощью в пределах двух удароопасных шахт рудника (№№ 14, 15) ежегодно регистрировалось около 1000 событий с $K = 2 \div 8$. Точность определения координат составляла 25 м.

Рассмотрим некоторые наблюдения, выводы и предположения, которые следуют из анализа наблюдений над шахтной сейсмичностью.

Приуроченность к энергонасыщенным включениям. Энергонасыщенность пород в верхней части земной коры не имеет перманентного распространения. Объемы (зоны) пород, латентная энергия которых достаточна для генерирования сейсмичности, имеют характер сравнительно редко встречающихся локальных включений. В силу этого высокая активность шахтной сейсмичности является не правилом, а скорее, исключением. Из пяти шахт СУБРа, находящихся примерно в одной и той же горно-геологической обстановке, высокой активностью отличались лишь две шахты (№№ 14, 15). В 80-е гг. XX в. на них происходило более половины общего числа горных ударов, регистрируемых ежегодно на остальных более 60 рудниках Минцветмета. Высокой удароопасностью отличался Таштагольский железный рудник, рудники Кольского полуострова, соляные шахты Соликамска – всего не более 10 горно-промышленных объектов страны из всего их множества. Здесь, как и в случае природной сейсмичности, мы стоим перед той же проблемой: почему в одних случаях деятельность какой-либо производственно-технической систе-

мы (ПТС) сопровождается высокой активностью сейсмичности и других динамических явлений, в других эта деятельность практически асейсмична? При этом не существует надежных критериев, согласно которым на стадии проектирования ПТС можно было бы заключить, будет ведение будущих работ сопровождаться высокой сейсмичностью или нет. В существующую практику оценки горно-геологических условий, в которых развертываются ПТС, выявление энергонасыщенных локальных объемов не входит. Попытку продвижения в этом направлении представляют развиваемые нами представления о тектонических системах. Эти представления изложены далее.

В частности, в качестве тектонической системы может рассматриваться тектоническое нарушение: сброс с амплитудой смещения крыльев 300–400 м, которым разорвано рудное тело, представляющее собой наклонную пластовую залежь, разрабатываемую шахтами №№ 14, 15. Активны по проявлениям оба крыла сброса, причем максимум активности (гребень потенциальной функции) удален от сместителя (поверхности разгрузки) на расстояние около нескольких десятков метров. На «асейсмичных» шахтах рудника, в том числе и более глубоких, значительных тектонических нарушений нет.

Установлено, что динамические явления имеют место лишь по достижении горными работами некоторой *критической глубины* [Айтматов, 1987]. Разработка рудного тела была начата еще в 30-е гг. открытым способом в его выходах на дневную поверхность. В течение последних двух десятилетий скорость углубления горных работ составляла примерно 20–25 м/год. Горные удары начали появляться с глубины 340 м. Однако в данном случае, по всей видимости, появление горных ударов не имеет непосредственной связи с углублением горных работ, а обусловлено внедрением горных выработок в энергонасыщенные породы в крыльях сброса. Тема роста энергонасыщенности с глубиной в подробностях будет обсуждаться далее.

Нелинейный рост сейсмической активизации. Эволюция шахтной сейсмичности на шахтах СУБРа укладывается в следующую общую схему. Отставание во времени начала сейсмической активизации от начала техногенного воздействия является весьма общей особенностью не только шахтной, но и других видов наведенной сейсмичности. По истечении некоторого времени за периодом ее незначительных вначале спорадических проявлений вдруг следует быстрое, нелинейное, почти лавинообразное ее нарастание нередко при совершенно ничтожных приращениях техногенного воздействия сравнительно с его общим объемом,

достигнутым к этому времени. Нарушение равновесия природной системы в какой-либо ее точке, причиненное внешним воздействием, влечет за собой быстрое распространение процесса на всю систему. Процесс нарушения равновесия приобретает черты самопроизвольно развивающегося.

Одно уточнение. Говоря о потере массивами пород их механической устойчивости, обычно исходят из того, что все части твердотельной системы находятся друг с другом в механическом равновесии: если выбрать внутри тела какой-нибудь объем, то равнодействующая всех сил, действующих на этот объем со стороны других частей, равна нулю [Ландау, Лифшиц, 1976]. Энергонасыщенные породы могут удовлетворять этому условию и вместе с тем по уровню запасенной ими латентной энергии находиться в метастабильном состоянии. Процессы их структурной перестройки являются внутренними их процессами. Переход таких систем от одного стационарного состояния к другому может осуществляться и в условиях, когда равнодействующая всех сил, внешних по отношению к объему рассматриваемой системы, продолжает оставаться равной нулю. Но если равновесие внешних сил на данном объеме нарушается, что и происходит в процессе ведения горных работ, это может стать импульсом к ускоренному развитию тех тенденций, которые намечены самопроизвольной релаксацией системы, развивающейся естественным путем в замедленном темпе.

Первый горный удар, оказавший влияние на работы, произошел в сентябре 1970 г., в период ведения взрывных работ в очистном забое шахты № 14. С этого времени количество горных ударов и масштабы причиняемых ими разрушений быстро возрастали, появилась тенденция к их групповому возникновению. В конце 70-х и в 80-е гг. здесь уже возникали десятки ударов в год, причем объемы выбросов породы в горные выработки при некоторых из них составляли сотни и тысячи кубометров. В результате горного удара 14 августа 1981 г., например, произошло обрушение кровли выработок общей площадью около 15 тыс. м^2.

Необратимость структурной эволюции. Детальные сейсмологические наблюдения на СУБРе были начаты, когда уровень шахтной сейсмичности достиг многих сотен событий в год. Сейсмический режим в его активной фазе выражен в ряде следующих показателей.

Зависимость логарифма числа событий от их энергии подчиняется закону повторяемости. Наклон графика повторяемости равен 0,63 для совокупности событий на двух шахтах: 0,59 для со-

бытий, произошедших на шахте № 15, и 0,82 для событий, произошедших на шахте № 14.

Указанные значения выше обычного значения наклона графиков повторяемости для естественной сейсмичности, равного в среднем 0,5. Это означает, что степень раздробленности пород в верхах земной коры существенно больше, чем на глубинах, где возникают естественные землетрясения. Обращает на себя внимание тот факт, что сейсмичность шахты № 14 представлена относительно бóльшим количеством слабых сейсмических событий, чем на шахте № 15, хотя работы на шахте № 14 ведутся глубже, чем на шахте № 15. Есть основания полагать, что это не имманентная характеристика среды, а результат ее деструкции вследствие временной сейсмической активизации, пик которой на шахте № 14 к началу развертывания сети сейсмологических наблюдений уже миновал. Не исключено, что в период, предшествующий началу сейсмологических наблюдений, в 70-е гг., доля событий с большей энергией на этой шахте была большей и в 80-е гг. процесс дробления среды протекал уже на более поздней стадии. О сравнительно низкой прочности пород в массиве шахты № 14 свидетельствует то, что именно здесь наблюдались горные удары, самые значительные по причиняемым ими разрушениям горных выработок. Вместе с тем в 80-е гг. сейсмические импульсы энергетического класса, превышавшего $K = 5$, здесь не наблюдались. Было отмечено всего лишь одно событие такого рода, тогда как на смежной шахте, на которой пик активизации сейсмичности пришелся на более поздний период, их возникло несколько десятков при относительно небольших разрушениях выработок. При таком подходе вариации наклона графика повторяемости выступают как своего рода показатели структурной эволюции пород, отраженной показателями сейсмичности.

Как отмечалось, значимой корреляции между силой горных ударов и энергией шахтных землетрясений нет. Нередко значительные разрушения горных выработок сопровождаются сравнительно слабым сейсмическим излучением, и, наоборот, нередко мощные сейсмические импульсы на устойчивости выработок заметным образом не сказываются. На первый взгляд это кажется парадоксальным, но при более близком рассмотрении находит свое вполне естественное объяснение.

Разрушение в материалах при слабых воздействиях может начаться в двух случаях: при их предельной энергонасыщенности либо если они поражены множеством микротрещин [Витман, 1933]. Монолитные, прочные горные породы способны накопить упругую энергию до ее очень высоких плотностей. Это является

залогом их динамичного, взрывоподобного разрушения, в результате которого материал подвергается интенсивному дроблению, в том числе и до состояния так называемой «руинной прочности» – до почти полной потери связности материала. Очевидно, что если предыдущими горными ударами порода вблизи контура выработки приведена в состояние руинной прочности, то для ее обрушения в выработанное пространство уже только под действием собственного веса достаточно весьма слабого сотрясения.

Излучение сейсмических импульсов высокой энергии свойственно «первичным» нарушениям монолитных горных пород. Поскольку же трещины первой генерации образуются в глубине массивов, на значительном удалении от обнажений, то эти трещины, несмотря на значительную высвобожденную энергию, большими разрушениями горных выработок не сопровождаются. Обрушение же в выработку испещренной трещинами энергетически «выдохшейся» породы сопровождается весьма слабым сейсмическим излучением. Последующие смещения по уже существующей системе трещин сопровождаются весьма слабыми сейсмическими эффектами. Суммарная энергия горных ударов составляет лишь 2% от энергии, сброшенной шахтными землетрясениями.

Напомним уже упоминавшийся факт. Как показывают рентгеноскопические исследования, уровень латентных напряжений, запасенных образцом, неуклонно убывает по мере его дробления на все более мелкие части. Другими словами, среда в процессе ее дробления энергетически истощается и те же по природе процессы, но протекающие в среде с разным уровнем запасенной ею упругой энергии, имеют уже и разное феноменологическое выражение.

Такого рода факты отчетливо указывают на то, что шахтная сейсмичность отражает необратимую эволюцию структурного состояния горных пород – от прочной монолитной породы в начале процесса до энергетически истощенного, руинного, дезинтегрированного состояния.

Эффект пространственной упорядоченности очагов сейсмических событий. На рис. 6.1 изображено пространственное распределение плотности эпицентров на двух вертикальных разрезах шахтного поля шахты № 15 СУБРа. Расстояния между осями сетки координат 100 м. Здесь в изолиниях отражена конфигурация поля плотности гипоцентров шахтных землетрясений, на которую заштрихованными кружками нанесено положение гипоцентров наиболее сильных событий ($K \geq 5$). Как видно из рисунка, гипоцентры наиболее значительных событий «вытесняются»

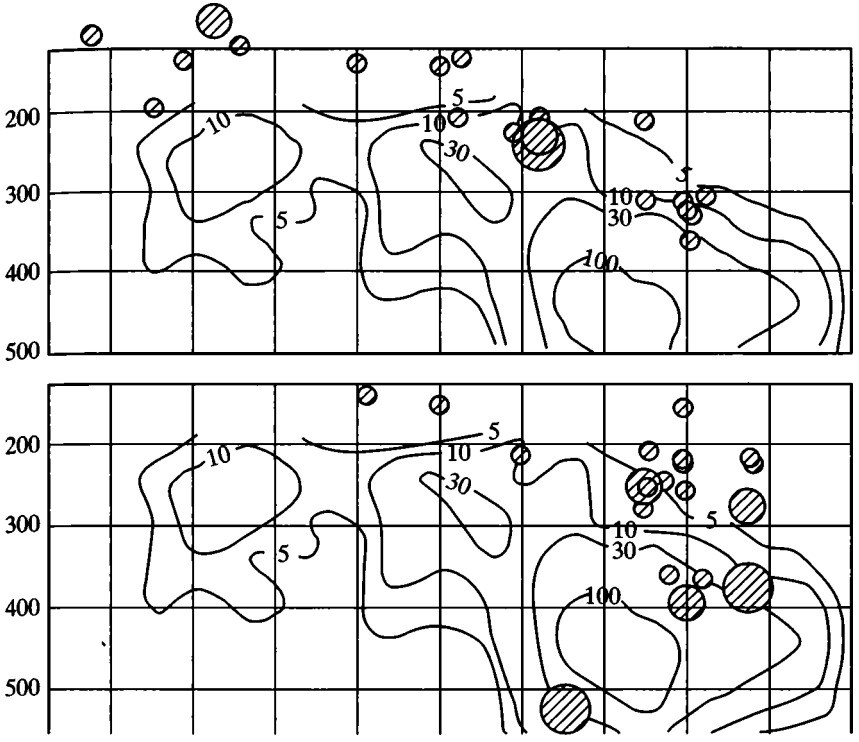


Рис. 6.1. Положение очагов наиболее значительных сейсмических событий на вертикальных разрезах поля плотности слабых событий шахты № 15 СУБРа

за пределы объемов с высокой активностью слабых сейсмических событий. Таким образом, очаги относительно сильных событий возникают заведомо вне зон концентрации слабых событий, причем если слабые события тяготеют к периферии выработанных пространств, то более сильные возникают на большом удалении от них, т.е., по принятой терминологии, события с $K = 5$ и выше представляют собой уже тектонические горные удары, не отличимые от естественных землетрясений. Налицо картина, которая в своих главных особенностях воспроизводит в сейсмическом отражении основной структурный стереотип зон разгрузки, осуществляющийся в соответствии со сценарием фрагментации.

Пространственная экспансия сейсмичности. Ареал пространственного рассеяния сейсмических событий непрерывно расширяется. Если в начале наблюдений толчки преимущественно

тяготеют к местам ведения горных работ, то в дальнейшем их количество возрастает и в более отдаленной окрестности горных выработок – процесс со временем перемещается из ближней зоны ведения горных работ в дальнюю. Сейсмичность подобно лесному пожару со временем распространяется на все более удаленную периферию области ее первоначального возбуждения, оставляя за собой «пепелище» в форме энергетически истощенной, дезинтегрированной породы.

На шахтах СУБРа это, в частности, выразилось в систематическом возрастании доли относительно глубоких событий в общей их совокупности. Относительно сильные толчки глубже 600 м стали возникать лишь с 1984 г. Одновременно был отмечен и рост максимальной энергии единичных событий. Толчки с $K = 7$ и более начали возникать также с 1984 г. В целом явление пространственной экспансии наведенной сейсмичности напоминает процесс расхождения афтершоков, возбуждаемых большими естественными землетрясениями. Энергия сейсмических событий на «переднем фронте» центробежно расширяющегося «облака» сейсмической активизации в среднем выше, чем в его внутренних частях. По логике сценария фрагментации так и должно быть, поскольку на переднем фронте волны активизации возникают трещины первой генерации. В сравнительно еще мало нарушенных породах путь их свободного пробега максимален. Соответственно, велика и их энергия. Трещины первой генерации имеют и определенную ориентировку: они субпараллельны поверхностям, обеспечившим энергетическую разгрузку, вследствие которой и возникают. Качественно та же картина наблюдается и в отношении афтершоков больших землетрясений: афтершоки с высокой энергией чаще всего возникают на фронте их расхождения, причем механизмы их очагов дублируют механизм главного события.

Механизм очагов. Отметим различия в механизмах очагов, определяемых по полярности первого импульса *P*-волны, излучаемого источником сейсмических волн. Технологические взрывы, проводимые на шахтах СУБРа, сопровождаются сейсмическим излучением. Первое вступление *P*-волны от взрывного источника имеет положительные значения, что, по очевидным соображениям, указывает на движение вещества «от источника». Этим взрывы отличаются от шахтных землетрясений, первые вступления *P*-волн для которых направлены «к источнику», указывая на «схлопывание» вещества, а в более широком смысле – на существование «пустого» или менее напряженного пространства, которое дает возможность к расширению, перемещению или вы-

бросу вещества в это пространство. Такое пространство мы обозначаем рабочим термином «демпфирующее пространство». В понятиях теории поля его можно рассматривать как область стока высвобождаемых деформаций. М.Л. Копп предложил термин примерно с тем же смысловым значением, но для тектонических деформаций – «геодинамическое убежище». Наконец, тектонические горные удары имеют картину квадрантного распределения знаков первых вступлений, неотличимую от таковой при тектонических природных землетрясениях.

6-3.3. Наведенная сейсмичность

Понятие «наведенная сейсмичность» объединяет два типа сейсмических явлений: «возбуждение» и «инициирование». Возбуждение – это воздействие на определенные зоны земной коры, вызывающие землетрясения, которые бы без такого возбуждения не произошли. В англоязычной литературе такие землетрясения называют «индуцированными». Инициирование сейсмических событий подразумевает внешнее воздействие на некоторый объем горных пород, находящийся в метастабильном состоянии. При этом энергия, сообщаемая среде инициирующим фактором, в сравнении с энергией, запасенной средой, может быть ничтожно малой. Говоря о *возбуждении* сейсмичности, допускают, что энергия, необходимая для возникновения и развития сейсмического процесса, может сообщаться среде внешним воздействием. Тем не менее, «чистые» случаи возбужденной сейсмичности, когда ее суммарная энергия была бы сопоставима по порядку величины с энергией воздействия, существует, скорее, как исключение [Николаев, 1994].

В целом же особенности протекания явлений наведенной сейсмичности дают основание полагать, что они представляют собой сейсмический отклик естественных энергонасыщенных включений на различные техногенные воздействия. Под этим углом зрения они здесь и будут рассмотрены.

Исторически первым и наиболее изученным типом наведенной сейсмичности, осознанным именно как сейсмический процесс, обусловленный техногенными воздействиями, оказались землетрясения, связанные с заполнением водохранилищ. Впоследствии были описаны и другие типы наведенной сейсмичности, связанные с закачкой жидкостей в скважины, эксплуатацией месторождений подземных вод, нефти и газа, производством подземных ядерных взрывов и др. Наведенная сейсмичность обладает рядом специфических особенностей, обусловленных видом

тяготеют к местам ведения горных работ, то в дальнейшем их количество возрастает и в более отдаленной окрестности горных выработок – процесс со временем перемещается из ближней зоны ведения горных работ в дальнюю. Сейсмичность подобно лесному пожару со временем распространяется на все более удаленную периферию области ее первоначального возбуждения, оставляя за собой «пепелище» в форме энергетически истощенной, дезинтегрированной породы.

На шахтах СУБРа это, в частности, выразилось в систематическом возрастании доли относительно глубоких событий в общей их совокупности. Относительно сильные толчки глубже 600 м стали возникать лишь с 1984 г. Одновременно был отмечен и рост максимальной энергии единичных событий. Толчки с $K = 7$ и более начали возникать также с 1984 г. В целом явление пространственной экспансии наведенной сейсмичности напоминает процесс расхождения афтершоков, возбуждаемых большими естественными землетрясениями. Энергия сейсмических событий на «переднем фронте» центробежно расширяющегося «облака» сейсмической активизации в среднем выше, чем в его внутренних частях. По логике сценария фрагментации так и должно быть, поскольку на переднем фронте волны активизации возникают трещины первой генерации. В сравнительно еще мало нарушенных породах путь их свободного пробега максимален. Соответственно, велика и их энергия. Трещины первой генерации имеют и определенную ориентировку: они субпараллельны поверхностям, обеспечившим энергетическую разгрузку, вследствие которой и возникают. Качественно та же картина наблюдается и в отношении афтершоков больших землетрясений: афтершоки с высокой энергией чаще всего возникают на фронте их расхождения, причем механизмы их очагов дублируют механизм главного события.

Механизм очагов. Отметим различия в механизмах очагов, определяемых по полярности первого импульса *P*-волны, излучаемого источником сейсмических волн. Технологические взрывы, проводимые на шахтах СУБРа, сопровождаются сейсмическим излучением. Первое вступление *P*-волны от взрывного источника имеет положительные значения, что, по очевидным соображениям, указывает на движение вещества «от источника». Этим взрывы отличаются от шахтных землетрясений, первые вступления *P*-волн для которых направлены «к источнику», указывая на «схлопывание» вещества, а в более широком смысле – на существование «пустого» или менее напряженного пространства, которое дает возможность к расширению, перемещению или вы-

бросу вещества в это пространство. Такое пространство мы обозначаем рабочим термином «демпфирующее пространство». В понятиях теории поля его можно рассматривать как область стока высвобождаемых деформаций. М.Л. Копп предложил термин примерно с тем же смысловым значением, но для тектонических деформаций – «геодинамическое убежище». Наконец, тектонические горные удары имеют картину квадрантного распределения знаков первых вступлений, неотличимую от таковой при тектонических природных землетрясениях.

6-3.3. Наведенная сейсмичность

Понятие «наведенная сейсмичность» объединяет два типа сейсмических явлений: «возбуждение» и «инициирование». Возбуждение – это воздействие на определенные зоны земной коры, вызывающие землетрясения, которые бы без такого возбуждения не произошли. В англоязычной литературе такие землетрясения называют «индуцированными». Инициирование сейсмических событий подразумевает внешнее воздействие на некоторый объем горных пород, находящийся в метастабильном состоянии. При этом энергия, сообщаемая среде инициирующим фактором, в сравнении с энергией, запасенной средой, может быть ничтожно малой. Говоря о *возбуждении* сейсмичности, допускают, что энергия, необходимая для возникновения и развития сейсмического процесса, может сообщаться среде внешним воздействием. Тем не менее, «чистые» случаи возбужденной сейсмичности, когда ее суммарная энергия была бы сопоставима по порядку величины с энергией воздействия, существует, скорее, как исключение [Николаев, 1994].

В целом же особенности протекания явлений наведенной сейсмичности дают основание полагать, что они представляют собой сейсмический отклик естественных энергонасыщенных включений на различные техногенные воздействия. Под этим углом зрения они здесь и будут рассмотрены.

Исторически первым и наиболее изученным типом наведенной сейсмичности, осознанным именно как сейсмический процесс, обусловленный техногенными воздействиями, оказались землетрясения, связанные с заполнением водохранилищ. Впоследствии были описаны и другие типы наведенной сейсмичности, связанные с закачкой жидкостей в скважины, эксплуатацией месторождений подземных вод, нефти и газа, производством подземных ядерных взрывов и др. Наведенная сейсмичность обладает рядом специфических особенностей, обусловленных видом

ПТС, которые их возбуждают. Но существует и целый ряд сходных ее проявлений, независимо от вида ПТС, в том числе с уже рассмотренными особенностями шахтной сейсмичности.

Как и шахтная сейсмичность, случаи, когда функционирование той или иной ПТС, например гидротехнического сооружения, вызывает появление наведенной сейсмичности, относительно редки. Сейчас насчитывают, по крайней мере, 50 случаев изменений сейсмической активности, связанных с заполнением водохранилищ. Из примерно 11 тыс. плотин высотой более 10 м только 0,63% послужили причиной наведенной сейсмичности, тогда как плотин, высота которых превышает 90 м, – 10%, 140 м – 21%. С ростом масштаба воздействия вероятность возбуждения наведенной сейсмичности возрастает, но она проявляется далеко не всегда.

Ареал сейсмичности, наведенной заполнением водохранилищ, охватывает их акваторию, удаляясь от нее в пределах первых десятков километров. Глубина гипоцентров от первых до десятков километров. Изменения сейсмического режима, как правило, начинаются сразу после заполнения водохранилищ и проявляются в увеличении количества микросейсмических событий и наличием корреляции между уровнем заполнения водохранилищ и интенсивностью сейсмических толчков. Однако сильные землетрясения происходят чаще всего через 2–4 года после заполнения. Известны случаи запаздывания на 15 лет и более. В целом появление наведенной сейсмичности, ее эволюция сходны с проявлениями шахтной сейсмичности. Масштабы иные, но характер сходный.

Площадь водохранилища зачастую превышает 1000 км^2. Такова, как минимум, и зона их влияния. Так, хотя размер зоны непосредственного влияния Нурекского водохранилища около 1400 км^2, повышение уровня сейсмичности, скоррелированное с заполнением водохранилища, отмечалось в райне площадью 10 тыс. км^2.

Радиус влияния Токтогульского водохранилища оценивается в 35–40 км. Глубина эпицентров от первых (водохранилище Фыньцунь, Китай) до первых десятков километров (Ассуанское водохранилище, Египет – 20 км, Спринагардин, Таиланд – 40 км).

Проявления наведенной сейсмичности на периферии дальних зон в плане и по глубине «сливаются» по характеру своей выраженности с проявлениями естественной сейсмичности. В целом ряде случаев трудно с уверенностью судить о том, возникло ли данное сильное событие независимо от техногенного воздействия или оно явилось отдаленным следствием этого воздействия.

Таково, например, Сусамырское землетрясение с $M = 7{,}2$, возникшее 19 августа 1992 г. северо-восточнее Токтогульского водохранилища. Интенсивность возбужденных им сотрясений достигла 9 баллов. Ареал области афтершоков этого землетрясения почти достиг акватории водохранилища.

Изменения во времени наведенной сейсмичности в ближней зоне техногенного воздействия обычно коррелируют с изменениями интенсивности этого воздействия. Так, при остановке работ, вызванной последствиями горных ударов, уровень сейсмической активности в ближней зоне быстро понижается и снова возрастает только после возобновления работ. Связь изменений активности землетрясений с режимом заполнения водохранилищ отмечена в целом ряде случаев. С апреля 1983 г. по июнь 1984 г. в районе водохранилища Фыньцунь (Китай) зарегистрировано пять периодов повышения сейсмической активности, коррелирующих с изменением уровня воды в водохранилище.

Влияние Нурекского водохранилища на сейсмичность стало заметно после достижения 40-метрового уровня, достигнув своего максимума при глубине заполнения 100 м, когда сейсмическая активность возросла на порядок по сравнению с уровнем активности до заполнения водохранилища [Калинин, Кузин, 1982].

Для плотинных землетрясений характерно очень большое количество предшествующих толчков перед главным событием, большое количество афтершоков и их медленный спад. Все эти особенности характерны также для естественной сейсмичности, локализованной в сравнительно малопрочных осадочных породах, например для землетрясений, возникающих в структурах инверсированной Таджикской депрессии (в особенности для горного обрамления долины р. Обихингоу).

Отметим, что сейсмичность, обусловленная откачкой нефти и газа, часто сосредоточена в сейсмогенных телах, которые приурочены к зонам контакта между резко дифференцированными по образованию и залеганию горными породами, например осадочного чехла и кристаллического фундамента. Именно в таких зонах, представляющих собой типичные двухслойные системы, чаще всего наблюдаются техногенные землетрясения, инициированные эксплуатацией вышележащих продуктивных горизонтов в осадочном чехле.

Вся совокупность рассмотренных материалов приводит к выводу, что существуют две основные разновидности наведенной сейсмичности: в ближней зоне техногенного воздействия и в дальней зоне. Если режим ближней зоны в основном определяется спецификой техногенного воздействия, то режим дальней

зоны по характеру проявления сближается с сейсмическим режимом естественной сейсмичности.

Процесс распространения сейсмичности из ближней зоны техногенного воздействия в дальнюю – важнейший момент эволюции наведенной сейсмичности.

Опыт изучения влияния подземных ядерных взрывов на сейсмичность показывает, что они обладают инициирующим воздействием, выраженным в виде слабого увеличения сейсмичности в первые 10 суток после взрывов и проявляющимся на расстояниях до 1–1,5 тыс. км от источника [Николаев, Верещагина, 1991, 1993]. Интенсивность сейсмических колебаний от землетрясений, инициированных подземными ядерными взрывами на полигоне в Неваде (США), была не намного меньше интенсивности сейсмических колебаний самих взрывов. Обычно же магнитуды землетрясений, эпицентры которых удалены на 5–20 км от эпицентров взрывов, на 1–2 единицы магнитуды меньше магнитуды взрыва. Землетрясения, магнитуды которых бы превышали магнитуды самих взрывов, не отмечены [Пасечник, 1977].

Приведенные данные прямо свидетельствуют об энергонасыщенности геологической среды в районе производства взрывов. Что касается характера сейсмичности, наведенной взрывами, то она весьма напоминает афтершоковый процесс, в котором роль главного толчка играет взрыв.

Остановимся на одном примечательном моменте. В течение первых 5–20 с после взрыва происходит наиболее сильное землетрясение, вслед за ним следуют единичные землетрясения с меньшей энергией, а затем многочисленные – десятки, сотни и даже тысячи, т.е. целые рои слабых землетрясений – афтершоки. Такая последовательность событий характерна для разрушения по схеме «от больших трещин к малым» (схеме фрагментации).

Эпицентры инициированных землетрясений и их афтершоки находились на расстоянии 1–40 км от эпицентров взрывов и были приурочены к известным или вновь выявленным разрывам. Глубины очагов были связаны с двумя фокальными зонами: на глубине 5–6 и 12–15 км. Заметим, что существование фокальных слоев примерно на тех же глубинах отмечено и для природной сейсмичности.

Вся совокупность рассмотренных фактов говорит о том, что в подавляющем большинстве случаев энергетические возможности техногенных воздействий, взятые сами по себе, для возбуждения наведенной сейсмичности недостаточны. Что, по всей видимости, в тех объемах среды, где наведенная сейсмичность воз-

можна в принципе, до начала техногенного воздействия уже содержится некоторое, притом весьма значительное, количество упругой энергии. Вопрос заключается в одном: какова природа такого первичного энергетического потенциала?

Наиболее распространенным в этом отношении является представление, согласно которому этот потенциал обеспечивают высокие современные тектонические напряжения. Если это так, то возникает вопрос: чем объяснить локальную избирательность тектонических сил в областях с примерно одной и той же геотектонической обстановкой? Какова причина сильной изрезанности поля напряжений, его «пятнистости» вплоть до существования изолированных энергонасыщенных включений? Так, выше приводился наглядный пример: из пяти близко расположенных шахт СУБРа высокая шахтная сейсмичность отмечена только на двух. Более того, в пределах сейсмоактивных шахт большинство землетрясений сконцентрировано лишь на некоторых участках, причем в промежутках между ними, т.е. практически в тех же горно-геологических условиях, сейсмическая активность резко снижается вплоть до нулевой. Единственной заметной особенностью геологического строения в районе удароопасных шахт №№ 14, 15 является наличие сброса, разделяющего их шахтные поля.

Обычны и другие примеры пространственной неоднородности полей наведенной сейсмичности по латерали и глубине. Представление о сильной пространственной неоднородности распределения эпицентров, «пятнистости» или «слоистости» поля сейсмичности, дает практически любая карта наведенной сейсмичности, построенная по данным с достаточно высоким для этого разрешением.

Лучше согласуется с фактами допущение, согласно которому в геологической среде содержатся локальные разномасштабные энергонасыщенные включения. Конфигурация и размеры таких включений определяются локальными тектоническими системами, которые их возбуждают, и эволюцией структуры энергонасыщенных объемов среды во времени. В восходящих потоках вещества и в процессе тектонической переработки энергетически насыщенные образования «тают». Чем ближе породы к земной поверхности – поверхности разгрузки первого порядка – тем в среднем содержание упругой энергии в них меньше. В самом верхнем слое земной коры, доступном прямым техногенным воздействиям, энергонасыщенные включения встречаются в сравнительно редких случаях. В целом наблюдаемая картина в структурном отношении сходна с известным представлением о «мутности» геофизической среды, развитым А.В. Николаевым.

зоны по характеру проявления сближается с сейсмическим режимом естественной сейсмичности.

Процесс распространения сейсмичности из ближней зоны техногенного воздействия в дальнюю – важнейший момент эволюции наведенной сейсмичности.

Опыт изучения влияния подземных ядерных взрывов на сейсмичность показывает, что они обладают инициирующим воздействием, выраженным в виде слабого увеличения сейсмичности в первые 10 суток после взрывов и проявляющимся на расстояниях до 1–1,5 тыс. км от источника [Николаев, Верещагина, 1991, 1993]. Интенсивность сейсмических колебаний от землетрясений, инициированных подземными ядерными взрывами на полигоне в Неваде (США), была не намного меньше интенсивности сейсмических колебаний самих взрывов. Обычно же магнитуды землетрясений, эпицентры которых удалены на 5–20 км от эпицентров взрывов, на 1–2 единицы магнитуды меньше магнитуды взрыва. Землетрясения, магнитуды которых бы превышали магнитуды самих взрывов, не отмечены [Пасечник, 1977].

Приведенные данные прямо свидетельствуют об энергонасыщенности геологической среды в районе производства взрывов. Что касается характера сейсмичности, наведенной взрывами, то она весьма напоминает афтершоковый процесс, в котором роль главного толчка играет взрыв.

Остановимся на одном примечательном моменте. В течение первых 5–20 с после взрыва происходит наиболее сильное землетрясение, вслед за ним следуют единичные землетрясения с меньшей энергией, а затем многочисленные – десятки, сотни и даже тысячи, т.е. целые рои слабых землетрясений – афтершоки. Такая последовательность событий характерна для разрушения по схеме «от больших трещин к малым» (схеме фрагментации).

Эпицентры инициированных землетрясений и их афтершоки находились на расстоянии 1–40 км от эпицентров взрывов и были приурочены к известным или вновь выявленным разрывам. Глубины очагов были связаны с двумя фокальными зонами: на глубине 5–6 и 12–15 км. Заметим, что существование фокальных слоев примерно на тех же глубинах отмечено и для природной сейсмичности.

Вся совокупность рассмотренных фактов говорит о том, что в подавляющем большинстве случаев энергетические возможности техногенных воздействий, взятые сами по себе, для возбуждения наведенной сейсмичности недостаточны. Что, по всей видимости, в тех объемах среды, где наведенная сейсмичность воз-

можна в принципе, до начала техногенного воздействия уже содержится некоторое, притом весьма значительное, количество упругой энергии. Вопрос заключается в одном: какова природа такого первичного энергетического потенциала?

Наиболее распространенным в этом отношении является представление, согласно которому этот потенциал обеспечивают высокие современные тектонические напряжения. Если это так, то возникает вопрос: чем объяснить локальную избирательность тектонических сил в областях с примерно одной и той же геотектонической обстановкой? Какова причина сильной изрезанности поля напряжений, его «пятнистости» вплоть до существования изолированных энергонасыщенных включений? Так, выше приводился наглядный пример: из пяти близко расположенных шахт СУБРа высокая шахтная сейсмичность отмечена только на двух. Более того, в пределах сейсмоактивных шахт большинство землетрясений сконцентрировано лишь на некоторых участках, причем в промежутках между ними, т.е. практически в тех же горно-геологических условиях, сейсмическая активность резко снижается вплоть до нулевой. Единственной заметной особенностью геологического строения в районе удароопасных шахт №№ 14, 15 является наличие сброса, разделяющего их шахтные поля.

Обычны и другие примеры пространственной неоднородности полей наведенной сейсмичности по латерали и глубине. Представление о сильной пространственной неоднородности распределения эпицентров, «пятнистости» или «слоистости» поля сейсмичности, дает практически любая карта наведенной сейсмичности, построенная по данным с достаточно высоким для этого разрешением.

Лучше согласуется с фактами допущение, согласно которому в геологической среде содержатся локальные разномасштабные энергонасыщенные включения. Конфигурация и размеры таких включений определяются локальными тектоническими системами, которые их возбуждают, и эволюцией структуры энергонасыщенных объемов среды во времени. В восходящих потоках вещества и в процессе тектонической переработки энергетически насыщенные образования «тают». Чем ближе породы к земной поверхности – поверхности разгрузки первого порядка – тем в среднем содержание упругой энергии в них меньше. В самом верхнем слое земной коры, доступном прямым техногенным воздействиям, энергонасыщенные включения встречаются в сравнительно редких случаях. В целом наблюдаемая картина в структурном отношении сходна с известным представлением о «мутности» геофизической среды, развитым А.В. Николаевым.

6-3.4. Структура полей сейсмичности

Сопоставление карт эпицентров землетрясений с геологией сейсмоактивных районов показывает, что эти эпицентры часто приурочены к разрывным нарушениям линейного простирания – разломам. Землетрясения могут быть приурочены и к двумерным участкам («доменам»). При двумерном заполнении сейсмоактивного пространства эпицентры могут образовывать вытянутые структуры с линейным простиранием или же носить неопределенно-рассеянный характер. Наблюдаются и случаи появления сейсмических линеаментов, которые прослеживаются в виде прямолинейных цепочек эпицентров без выявленной их связи с разломами.

Разломы представляют собой не просто единичные трещины, как это выглядит на их картографических отображениях. Собственно разломы, как гигантские трещины, являются лишь осевыми частями сложно устроенных зон, по которым происходит трансляционное смещение разделяемых ими масс пород (см., например, [Структурная..., 1991]).

В поперечном сечении, вкрест простирания зон, в типичном случае в осевых частях образуются структуры, отражающие различные виды деформации пород, вовлеченных в тектоническое течение. Далее следуют трещиноватые породы без заметных трансляционных смещений. Степень их трещиноватости по мере удаления от осевой части уменьшается примерно по экспоненте. В целом здесь проступает картина структурного стереотипа зон разгрузки. Со временем ширина зоны разлома возрастает (по схеме бокового наращивания), а сетка трещин непосредственно в самой зоне становится гуще (в соответствии со схемой фрагментации).

Характерной особенностью строения зон разломов вдоль их простирания является чередование более обширных раздробленных участков – «деструктивных полей» – с участками, где зоны динамического влияния разломов резко сужаются. В результате зоны разломов вдоль своего простирания приобретают характерную четковидную структуру [Лобацкая, 1987].

Согласно данным, полученным наблюдениями на Гармском прогностическом полигоне в Таджикистане (1955–1992 гг.), в основной своей массе эпицентры сравнительно слабых землетрясений ($K = 6 \div 10$) – землетрясений «сейсмического фона» – образуют локальные скопления («участки концентрации эпицентров»). В свою очередь, они образуют четковидные цепочки, напоминающие архипелаги островов. Цепочки вытянуты вдоль оси региональных разрывных нарушений, таких, например, как Петровский разлом, контролирующий структуры хребта Петра Велико-

го, или Дарваз-Каракульский разлом. Плотность эпицентров на участках быстро, примерно по экспоненте, падает вкрест простирания этих цепочек. Карты плотности эпицентров землетрясений и карты плотности трещин в зонах разрывных нарушений обладают настолько большим морфологическим сходством, что по одному внешнему виду различить их невозможно. Целый ряд морфологических, геологических и геофизических признаков говорят о том, что сейсмичность участков концентрации эпицентров отображает деструктивные поля в зонах разрывных нарушений регионального значения.

Что касается очагов наиболее значительных сейсмических событий ($K \geq 13$), то, как это и предписано логикой сценария фрагментации, они вплоть до комплексов палеосейсмодислокаций с возрастом порядка 10 тыс. лет располагаются не в ядрах участков концентрации эпицентров, а на их периферии.

Подчеркнем: чтобы увидеть такие детали, нужны высокоточные сети сейсмологических наблюдений. Если их разрешающая способность мала, картина предстает в слишком огрубленном виде. Упорядоченность во взаимном расположении землетрясений сейсмического фона и более значительных сейсмических событий становится завуалированной ошибками в определении координат их гипоцентров. В целом анализ положения очагов землетрясений в пространстве приводит к выводу, что картина, которую они «прорисовывают», в случае наведенной и в случае естественной сейсмичности обладает принципиальным сходством, – она отражает процесс фрагментации геологической среды, распространяющийся от первичного разрывного нарушения по схеме «бокового наращивания».

6-3.5. Область очага большого землетрясения в поле фоновой сейсмичности

В современной сейсмологии различают два основных направления: *физику очага единичного землетрясения* и *физику совокупностей очагов землетрясений*. В рамках физики очага землетрясения рассматривают особенности проявлений сейсмичности, которые связывают непосредственно с процессами в единичном очаге большого землетрясения. Поведение больших совокупностей сейсмических событий в пространстве–времени определяется как *сейсмический режим* и рассматривается в рамках *физики совокупностей очагов землетрясений*.

В свою очередь, в сейсмическом режиме различают его особенности, связанные с появлением больших землетрясений, и ре-

6-3.4. Структура полей сейсмичности

Сопоставление карт эпицентров землетрясений с геологией сейсмоактивных районов показывает, что эти эпицентры часто приурочены к разрывным нарушениям линейного простирания – разломам. Землетрясения могут быть приурочены и к двумерным участкам («доменам»). При двумерном заполнении сейсмоактивного пространства эпицентры могут образовывать вытянутые структуры с линейным простиранием или же носить неопределенно-рассеянный характер. Наблюдаются и случаи появления сейсмических линеаментов, которые прослеживаются в виде прямолинейных цепочек эпицентров без выявленной их связи с разломами.

Разломы представляют собой не просто единичные трещины, как это выглядит на их картографических отображениях. Собственно разломы, как гигантские трещины, являются лишь осевыми частями сложно устроенных зон, по которым происходит трансляционное смещение разделяемых ими масс пород (см., например, [Структурная..., 1991]).

В поперечном сечении, вкрест простирания зон, в типичном случае в осевых частях образуются структуры, отражающие различные виды деформации пород, вовлеченных в тектоническое течение. Далее следуют трещиноватые породы без заметных трансляционных смещений. Степень их трещиноватости по мере удаления от осевой части уменьшается примерно по экспоненте. В целом здесь проступает картина структурного стереотипа зон разгрузки. Со временем ширина зоны разлома возрастает (по схеме бокового наращивания), а сетка трещин непосредственно в самой зоне становится гуще (в соответствии со схемой фрагментации).

Характерной особенностью строения зон разломов вдоль их простирания является чередование более обширных раздробленных участков – «деструктивных полей» – с участками, где зоны динамического влияния разломов резко сужаются. В результате зоны разломов вдоль своего простирания приобретают характерную четковидную структуру [Лобацкая, 1987].

Согласно данным, полученным наблюдениями на Гармском прогностическом полигоне в Таджикистане (1955–1992 гг.), в основной своей массе эпицентры сравнительно слабых землетрясений ($K = 6 \div 10$) – землетрясений «сейсмического фона» – образуют локальные скопления («участки концентрации эпицентров»). В свою очередь, они образуют четковидные цепочки, напоминающие архипелаги островов. Цепочки вытянуты вдоль оси региональных разрывных нарушений, таких, например, как Петровский разлом, контролирующий структуры хребта Петра Велико-

го, или Дарваз-Каракульский разлом. Плотность эпицентров на участках быстро, примерно по экспоненте, падает вкрест простирания этих цепочек. Карты плотности эпицентров землетрясений и карты плотности трещин в зонах разрывных нарушений обладают настолько большим морфологическим сходством, что по одному внешнему виду различить их невозможно. Целый ряд морфологических, геологических и геофизических признаков говорят о том, что сейсмичность участков концентрации эпицентров отображает деструктивные поля в зонах разрывных нарушений регионального значения.

Что касается очагов наиболее значительных сейсмических событий ($K \geq 13$), то, как это и предписано логикой сценария фрагментации, они вплоть до комплексов палеосейсмодислокаций с возрастом порядка 10 тыс. лет располагаются не в ядрах участков концентрации эпицентров, а на их периферии.

Подчеркнем: чтобы увидеть такие детали, нужны высокоточные сети сейсмологических наблюдений. Если их разрешающая способность мала, картина предстает в слишком огрубленном виде. Упорядоченность во взаимном расположении землетрясений сейсмического фона и более значительных сейсмических событий станòвится завуалированной ошибками в определении координат их гипоцентров. В целом анализ положения очагов землетрясений в пространстве приводит к выводу, что картина, которую они «прорисовывают», в случае наведенной и в случае естественной сейсмичности обладает принципиальным сходством, – она отражает процесс фрагментации геологической среды, распространяющийся от первичного разрывного нарушения по схеме «бокового наращивания».

6-3.5. Область очага большого землетрясения в поле фоновой сейсмичности

В современной сейсмологии различают два основных направления: *физику очага единичного землетрясения* и *физику совокупностей очагов землетрясений*. В рамках физики очага землетрясения рассматривают особенности проявлений сейсмичности, которые связывают непосредственно с процессами в единичном очаге большого землетрясения. Поведение больших совокупностей сейсмических событий в пространстве–времени определяется как *сейсмический режим* и рассматривается в рамках *физики совокупностей очагов землетрясений*.

В свою очередь, в сейсмическом режиме различают его особенности, связанные с появлением больших землетрясений, и ре-

жим фоновых землетрясений. В отношении первых К. Касахара [1985] предложил схему, исходящую из того, что сейсмическую историю региона можно описать как повторение *сейсмических циклов*, каждый из которых включает в себя последовательно *межсейсмическую, предсейсмическую, косейсмическую и постсейсмическую* стадии.

Добавим к этому, что, в свою очередь, в постсейсмической стадии могут быть выделены два периода: *активный* и *сейсмического покоя*. Активный период в общих чертах можно охарактеризовать как сейсмический отклик среды на возмущение, вызванное главным сейсмическим событием. Он выражен в таких явлениях, как афтершоки, расхождение афтершоков, удаленные афтершоки и др.

Со временем всплеск сейсмической активности в зоне очага и его близкой окрестности идет на убыль и распространяется на его более широкую окрестность. В этом отношении, как и в случае наведенной сейсмичности, целесообразно выделять *ближнюю и дальнюю зоны* очага главного сейсмического события. Изменения сейсмической активности в ближней и дальней зонах в типичном случае противоположны: в то время как в ближней зоне активность неуклонно идет на убыль, переходя в стадию сейсмического покоя, в дальней зоне ее уровень повышается. Это повышение, в частности, выражается в появлении групп значительных сейсмических событий – в их тенденции к *групповому появлению* (к *группированию*).

Заметим, что различия в сейсмических режимах ближней и дальней зон наблюдаются не только в постсейсмическую стадию, но и в предсейсмическую и косейсмическую стадии, говоря образно, начиная с того момента, когда среда начинает «чувствовать» назревание события, значимого в масштабе сейсмоактивного региона или его значительной части.

Рассмотрим возмущения поля фоновой сейсмичности, обусловленные влиянием большого землетрясения.

Как показано ранее, в системах с независимым энергоснабжением трещина для своего развития использует только ту часть общей энергии системы, которая содержится в локальной зоне разгрузки, примыкающей к берегам трещины. Это обстоятельство определено как принцип локальности. Возникновение трещины в поле потенциальной функции выражается возникновением локального минимума, осью симметрии которого является сама трещина.

Уже одно наличие локального минимума в очаге разрушения свидетельствует в пользу того, что разрушение произошло не за

счет действия внешней силы, а за счет энергетического потенциала самой среды. Если предположить, что землетрясение есть форма выраженности разгрузки собственного энергетического потенциала геологической среды, то возникновение большого землетрясения должно возбудить в поле фоновой сейсмичности аномалии, которые укладываются в схему принципа локальности.

Такой аномалией, прежде всего, должно быть появление в области очага землетрясения зоны разгрузки – локального минимума потенциальной функции, своего рода «потенциальной ямы». Первым следствием такого допущения будет то, что в зоне разгрузки произошедшего землетрясения следует ожидать долговременного снижения уровня сейсмической активности. Этому снижению должна предшествовать относительно кратковременная активизация сейсмичности непосредственно в очаге землетрясения и его ближней зоне, обусловленная «сглаживанием» больших градиентов поля потенциальной функции, – своего рода «выполаживанием» краев мгновенно возникшего локального минимума.

В общих чертах сейсмичность этой схеме и следует.

Действительно, на фоне обычной сейсмической активности сейсмоактивных регионов в тех местах, где в прошлом возникали большие землетрясения, существуют «окна», где она очень невысока. На подобные *асейсмичные зияния* в поле современной сейсмической активности обратил внимание Ю.В. Ризниченко на примере очаговых зон больших землетрясений Италии, которые возникли в начале XX в. Аномально низкой сейсмической активностью отличались до последнего времени очаговые зоны больших землетрясений, серия которых возникла в северном и юго-западном обрамлении Тянь-Шаня на рубеже XIX–XX вв. Глубокий локальный минимум сейсмической активности наблюдается в плейстосейстовой области Файзабадского землетрясения 1943 г.

Другой факт, свидетельствующий о существовании зон разгрузки в местах возникновения больших землетрясений, – эффект неперекрываемости их очаговых зон. Вкратце он в следующем. Большие землетрясения имеют тенденцию возникать вдоль определенных тектонических линий. Г.А. Гамбурцев называл их «сейсмическими швами». Подобно трещинам при одноосном растяжении двухслойной модели каждое последующее большое землетрясение может возникнуть в любом месте тектонической линии, за исключением тех ее участков, которые «перекрыты» зонами разгрузки землетрясений, возникших здесь ранее. Зако-

номерность возникновения очагов землетрясений в «пробелах» тектонических линий выдерживается настолько четко, что ее используют для прогноза места больших землетрясений. Впервые успешный прогноз с использованием этого признака осуществил С.А. Федотов в отношении больших землетрясений Курило-Камчатской зоны.

Как скоро нивелируются локальные минимумы потенциального поля, обусловленные появлением больших землетрясений?

Многие исследователи предполагают, что импульсу высвобождения энергии при землетрясении предшествует стадия ее накопления, чем сейсмическому процессу в целом и придается пульсирующий характер. Проблемой в таких представлениях остается механизм накопления потенциальной энергии (см., например, [Касахара, 1985]). Притом в таких представлениях продолжительность сейсмического цикла и рассматривается как время, в течение которого энергетический потенциал системы, исчерпанный большим землетрясением, восстанавливается до исходной величины. Обычно полагают, что источником энергии, восполняющим ее временный дефицит, является действие современных тектонических сил. Землетрясения в геологической среде, в отличие от вулканических, техногенных или обвальных, поэтому и классифицируют как «тектонические».

Примем во внимание, однако, следующее соображение.

Если бы землетрясения возникали в поле действия внешних сил – в согласии с принятой на этот счет концепцией, то напряженное состояние в области очага произошедшего землетрясения быстро бы восстанавливалось до исходного. Теоретически это должно происходить со скоростью распространения упругих волн. Учитывая реологические свойства среды, это, возможно, должно было бы происходить несколько медленнее.

Порядок времени, которое требуется для восстановления энергетического ресурса, «разгруженного» появлением больших землетрясений, в терминах концепции сейсмических циклов, разработанной С.А. Федотовым, определяется *временем цикла* или, в рамках представлений о сейсмической активности, разработанных Ю.В. Ризниченко, *повторяемостью* больших землетрясений, вычисляемой сейсмостатистическим методом. Для больших землетрясений Камчатки это время порядка 100 лет, для континентальных землетрясений – порядка многих сотен, тысяч и десятков тысяч лет. Столь большие промежутки времени свидетельствуют о том, что в очагах землетрясений прошлого происходит не восстановление регионального поля напряжений, локально нарушенного землетрясением, а совсем другой процесс,

гораздо более длительный, – восстановление энергетического потенциала среды. Если тектонические силы в этом процессе и участвуют, то не прямо, в форме восстановления «мгновенных» упругих деформаций, а более опосредствованно, например подобно тому, как это наблюдается в отношении тел со свойствами «запаздывающей» упругости. Приращение упругой энергии в объемах среды имеет кумулятивный характер, причем запасенная ими упругая энергия является результатом работы внешних сил за достаточно длительный период времени. В рамках существующих представлений о землетрясении как о результате непосредственного действии тектонических сил механизм накопления потенциальной энергии, как это и отмечал К. Касахара, представляется проблематичным.

В затронутой проблеме существует еще один аспект.

Представление о сейсмическом цикле исходит из того, что накопление энергии для последующего землетрясения цикла происходит в одном и том же объеме среды, образно говоря, в той же «точке». Такое представление, видимо, допустимо при достаточно большом масштабном осреднении. Но то, что при повторном землетрясении энергия излучается берегами одного и того же разрывного нарушения, является чисто теоретическим допущением, которое натурными наблюдениями не подтверждено. По логике сценария фрагментации, землетрясение является одним из множества актов, которые, вовлекая в процесс энергетической разгрузки все новые и новые пограничные объемы среды, примыкающие к зоне разрывных нарушений, тем самым, по схеме «бокового наращивания», постепенно формируют саму эту зону. С этой точки зрения каждое повторное землетрясение – образование новой трещины (или пакета трещин), наращивающей мощность зоны деструкции. Образно говоря, очаг последующего землетрясения возникает «почти там же», но не строго «там же», где возник очаг предыдущего. Если исходить из того, что землетрясение есть результат внезапного срыва контактирующих поверхностей, то мы придем к следующей дилемме: почему повторные срывы блоков пород по одной и той же поверхности сопровождаются излучением сейсмических волн, а образование новых трещин в консолидированной породе происходит «бесшумно»?

Среди условий, запускающих процесс разрушения, помимо энергии, необходимой для развития разрушения, требуется еще время, в течение которого содержащая ее среда должна «созреть» для разрушения. Образно говоря, среда разрушается по принципу срабатывания взрывных устройств замедленного действия. Если это так, то речь может идти о периоде цикла не как

о времени, требующемся для восстановления энергетического потенциала, а как о времени, которое необходимо для «созревания» среды к последующему разрушению. Что же касается энергетического потенциала среды, то в ее объемах, ответственных за появление следующего землетрясения, он может быть в наличии уже при предыдущем землетрясении. Последнее, создавая большие градиенты потенциальной функции в зоне своего очага, лишь «запускает» в ход действие этого своеобразного «часового механизма» в объемах среды, примыкающих к периферии очага. Эта точка зрения может показаться дискуссионной уже по одному ее расхождению с принятыми представлениями. Тем не менее, при анализе процессов в очаговых зонах больших землетрясений, как и некоторых других проявлений сейсмичности, впредь до уяснения механизма появления групп сейсмических событий с примерно одинаковой энергией не следует выпускать из вида и эту точку зрения. Далее мы коснемся некоторых особенностей сейсмического режима, которые с возможностью их развития по указанной схеме согласуются.

Конечный результат разрушения одномерной модели – система трещин, статистически равномерно расчленяющая субстрат модели на отдельные фрагменты. Если в дальнейшем дополнительно нагрузить модель, т.е. восстановить ее энергетический потенциал, то в динамической разгрузке дополнительного потенциала уже существующие трещины участия не принимают. Разгрузка осуществляется в процессе появления новых трещин, которые, в соответствии со сценарием фрагментации, станут далее расчленять каждую из ранее образованных «материнских» отдельностей примерно пополам на две «дочерние». Чем больше энергии будет закачано в систему, тем на большее число фрагментов она будет раздроблена. Таким образом, расстояния между трещинами являются своего рода мерой энергии, сброшенной системой. В этом отношении расстояния между очагами землетрясений одного масштабного уровня могут указывать на «напряженность» среды – на уровень ее энергонасыщенности в данной части сейсмоактивного региона.

Структурные изменения в материале модели необратимы: образовавшиеся разрывы в ней со временем не залечиваются, как это предполагается в отношении дислокаций в очаге землетрясения. Повторная трещина строго в том же месте в модели невозможна сколько бы энергии в нее не закачали.

Проблема залечивания разрывов, обусловленных смещением берегов трещин при землетрясении, дискуссионна. Натурные на-

блюдения свидетельствуют, что сместители разрывных нарушений не только восстанавливают со временем сплошность, но залеченные швы могут оказаться прочнее вмещающего пространства. Однако возможность повторного землетрясения строго в том же месте зависит не только от восстановления сплошности среды в прежде нарушенной зоне, но и от того, восстанавливается ли в ней при этом энергетический потенциал, достаточный для возникновения повторного землетрясения. Следующее по времени большое землетрясение строго «в том же месте» по этой логике произойти не может. Оно может выразиться в виде нового разрыва, параллельного разрыву, который был причиной предыдущего землетрясения, т.е. в виде элемента «бокового наращивания» разрастающейся зоны разлома. Это предположение ассоциируется с тем фактом, что одним из основных элементов структуры зон крупных разрывных нарушений являются системы трещин, субпараллельных общему простиранию разлома. Другим универсальным элементом структуры таких зон являются «тектонические клинья» – целики неразрушенных пород между большими трещинами (см., например, [Несмеянов, 2004]).

Мы здесь привели факты, отчетливо свидетельствующие в пользу существования зон разгрузки, образующихся в местах появления больших землетрясений. Логично предположить, что образованием локальных зон разгрузки сопровождается и возникновение землетрясений с меньшей энергией, вплоть до землетрясений фоновой сейсмичности, хотя обнаружить их существование труднее вследствие меньших размеров и более короткого времени их жизни. Кроме того, по мере уменьшения размеров объектов, наблюдаемых существующими сейсмологическими методами, удельный вклад ошибок в определение координат очагов в выявление пространственной структуры сейсмичности становится все весомее. В частности, закономерность, которую мы рассмотрели выше как одномерную, на уровне фоновой сейсмичности уже проявляется в двумерном и объемном вариантах.

Завершая обсуждение темы, подчеркнем: по характеру сейсмичности в плейстосейстовых областях больших землетрясений прошлого и их взаимному расположению в них отчетливо проявлен принцип локальности – принцип, который, в свою очередь, свидетельствует о том, что обеспечить такие особенности может только среда, располагающая собственным энергетическим потенциалом, не зависящим от современных тектонических воздействий. Последние могут оказывать и оказывают на ход высвобождения потенциала лишь управляющее воздействие.

6-4. ТЕКТОНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Существует тенденция свести напряженное состояние геологической среды к действию единой «первопричины» – их возбуждению в процессе контракции охлаждающейся Земли в результате расширения, коллизией литосферных плит и т.д. Сложность естественного поля напряжений в таких случаях представляют как расщепление единого поля напряжений, возбуждаемого некоей глобальной причиной, на неоднородностях среды. Образно такую точку зрения можно сравнить с единой трансмиссией, от которой с помощью ременных передач осуществляется передача движущего усилия множеству отдельных рабочих механизмов.

Между тем, напряженное состояние земной коры во многих очевидно выраженных случаях, в соответствии с принципом активности геологической среды, возбуждается теми энергетическими преобразованиями, которые протекают непосредственно в ее рассматриваемых объемах. В духе того же сравнения возникает несколько иная ситуация, когда каждый механизм приводится в движение от своего собственного электродвигателя, хотя, если восходить к «первопричине», питание всех частных электродвигателей и может осуществляться от общего генератора электрической энергии. Появление «внутренних» сил обеспечивает собственный энергетический потенциал среды, которым она может располагать и при полном отсутствии внешних механических сил, действующих на данный объем. Анализ проявлений наведенной сейсмичности приводит к мысли, что именно такие локальные процессы и являются источником энергии локальных энергонасыщенных включений. Согласно такому подходу, напряженное состояние геологической среды, земной коры в первую очередь есть результат совместного действия нескольких причин. Напряженное состояние по своей природе *многослойно*.

Далее мы рассмотрим различные виды естественных энергетических преобразователей и их возможное участие в тектонических процессах.

Естественные энергетические преобразователи, в которых накапливается потенциал, который затем расходуется на работу тектонических сил, мы далее будем называть *тектоническими системами*. Представление о тектонических системах освещалось в ряде работ [Пономарев, Трифонов, 1987, 1989].

Весьма детальное изложение современных представлений о геодинамических системах Земли разного масштабного уровня, включающих и глубинные уровни организации, можно найти в

работах [Гончаров и др., 2005; Хаин, Гончаров, 2006]. Что касается рассматриваемых нами тектонических систем, то арена их проявления – главным образом верхняя и средняя континентальная земная кора, доступная наблюдению по данным «коровой» сейсмичности, а также по данным о динамических явлениях, наведенных техногенными воздействиями. В этом отношении наши тектонические системы могут рассматриваться как локальные внутрикоровые «подсистемы» геодинамических систем общего плана, притом не в пассивной с ними сопряженности, а как проявления энергетической активности именно земной коры.

6-4.1. Общее представление о тектонических системах

На схемах большинства задач механики сила обозначается стрелкой, действующей «из воздуха», т.е. сама система возбуждения сил, например пресс, в котором нагружают образец, остается за кадром. В большинстве задач то, каким образом возбуждается сила, знать и не требуется. Достаточно знать ее модуль, направление и точку приложения. Однако в случае сил, действующих в геологической среде, такого рода исходные данные могут быть получены только в том случае, если известны условия их возбуждения. Казалось бы, ответ на простейший вопрос, подвержен ли данный объем среды действию внешней силы или же источник ее возбуждения находится непосредственно в рассматриваемом объеме, на практике часто превращается в сложную проблему.

С энергетической точки зрения тектонические системы представляют собой природные энергетические преобразователи, в которых происходит превращение различных видов энергии в энергию механическую, за счет чего в дальнейшем и выполняется работа по деформированию элементов геологической среды и их взаимному перемещению, т.е. работа, затрачиваемая на осуществление различных тектонических процессов.

Обычно в неявной форме предполагается, что тектонические силы выполняют работу по мере их появления, например электрический двигатель выполняет работу, расходуя поступающую в него электрическую энергию. Такая непосредственная форма действия тектонических сил может осуществляться и в тектонических системах. Однако тектонические системы способны не только к непрерывному расходу энергии по мере ее поступления в систему, но и к ее накоплению подобно тому, как в процессе зарядки электрический аккумулятор способен накапливать электроэнергию, сообщаемую ему от внешнего источника. Накопленная в форме фиксированных упругих деформаций упругая энер-

гия повышает собственный энергетический потенциал среды вплоть до перехода ее в энергонасыщенное, метастабильное состояние.

В своем принципиальном существе высказанное представление можно сравнить с представлением о телах с наследственной упругостью: работе собственно тектонических сил в этом случае соответствует «мгновенная» деформация, а фиксированные упругие деформации обеспечивают сейсмическое высвобождение накопленной энергии. Накопленная энергия расходуется на тектонические процессы уже не непосредственно, а опосредствованно. При выполнении определенных условий она может перейти в активную форму спустя значительный промежуток времени после ее появления в системе. Реальный тектонический процесс в общем случае осуществляется за счет работы «мгновенных» тектонических сил и работы, осуществляемой в процессе разгрузки собственного энергетического потенциала – в результате своего рода энергетического разряда.

Тектоническая система занимает определенный объем, обладает определенной структурой, располагает комплексом протекающих в ней процессов и определенным образом взаимодействует с вмещающим пространством, т.е. она представляет собой вполне оформленное геологическое образование.

Следует заметить, что геометрическая форма тектонических систем при всей их функциональной определенности может и не иметь четкой выраженности, например в форме геологических тел с четко определенными границами.

Рассмотрим высказанное положение на таком примере.

Охлаждение внедрившейся интрузии неизбежно должно сопровождаться возникновением термических напряжений. В принципе при этом происходит нечто подобное тому, что имеет место при охлаждении двухслойной модели с жестким основанием: охлаждение системы сопровождается синхронным ростом тепловых латентных напряжений вплоть до перехода остывающей системы в метастабильное состояние, напоминающее состояние переохлажденной жидкости. В этом случае границы тектонической системы, генерирующей тепловые напряжения, более или менее определенны: это тело интрузии с вмещающей его более холодной матрицей. Результаты функционирования этой системы выражаются в образовании геохимической зональности вблизи интрузивного тела, а также в деформировании «оболочки» интрузии, в частности в образовании ореола трещиноватости. В этом случае мы имеем дело с «микротектоническим» процессом, локализованным в достаточно четко определенной пространственной области.

Однако границы систем с тем же принципом действия могут быть весьма неопределенны. Так, в процессе вертикальной эскалации вещество, сформировавшееся в условиях высоких температур, по мере движения к земной поверхности постепенно охлаждается. Показателем этого процесса может служить геотермический градиент. Процесс охлаждения в этом случае точно так должен сопровождаться появлением тепловых напряжений, но уже в масштабе тех участков земной коры, субстрат которых вовлечен в восходящее движение. В этом случае установить границы тектонической системы, генерирующей тепловые напряжения, сложнее. Косвенно судить о контурах таких систем можно, привлекая, например, данные о полях градиентов вертикальных движений или о полях тепловых потоков. В числе трудностей такого рода можно указать и на то, что некоторые процессы, способные генерировать латентные напряжения, имеют рассеянный характер уже по своей природе, например процесс радиоактивного распада химических элементов земной коры или различные геохимические преобразования, интенсивность которых контролируется сложными системами флюидопроводящих каналов.

В силу такого рода причин мы вкладываем в понятие о тектонических системах скорее функциональный, чем геометрический смысл. Вместе с тем в каких-то случаях объем и конфигурация тектонических систем поддаются детерминации. На практике это локальные энергонасыщенные включения, техногенное внедрение в которые чревато возникновением различных динамических явлений. Свидетелями же бывших, ныне отмерших тектонических систем, являются такие специфические структурные комплексы, как, например, блоковая делимость земной коры, планетарная трещиноватость или иные проявления универсального структурного стереотипа, реализующегося в процессе энергетической разгрузки.

Каждая тектоническая система эволюционирует и в произвольный момент времени характеризуется определенным «возрастом». В развитии системы можно выделить несколько стадий: вначале постепенный рост ее энергетического потенциала, контролируемый скоростью и продолжительностью изменения внешних параметров, далее переход системы в неравновесное стационарное состояние, при котором жизнь системы характеризуется балансом между поступлением энергии в систему и ее расходом, и, наконец, стадию ее деградации, энергетического истощения. Системы, прекратившие свое существование, не исчезают бесследно. Они оставляют по себе своего рода «память» в форме

геологически длительно сохраняющихся структурных образований – результатов их былой тектонической активности.

Изменение параметров состояния, как мы это уже рассматривали, возбуждает сложную совокупность сцепленных между собой отдельных процессов, сводящихся к взаимным преобразованиям различных форм энергии, возбуждению локальных систем латентных напряжений и структурным преобразованиям среды. В этой сложной совокупности тектонические системы рассматриваются как своего рода элементарные единицы. От представления об иерархическом строении естественного поля напряжений, обусловленных преобразованиями единого по своей природе силового тектонического фактора на структурных неоднородностях среды, в представлении о тектонических системах мы приходим к тому, что поле напряжений многослойно и по природе возбуждающих его факторов.

Выше рассматривались различные виды латентных напряжений, обусловленных различными механизмами возбуждения: термические, деформационные, трансформационные и т.д. Все эти виды латентных напряжений возбуждаются и в геологической среде, однако конкретные условия возбуждения их в технических материалах и изделиях, конечно, иные, чем в случае естественных процессов в геологической среде.

Приведем примеры некоторых важнейших тектонических систем.

6-4.2. Трансформационные тектонические системы

К трансформационным тектоническим системам будем относить системы, в которых латентные напряжения образуются вследствие неоднородных или неодновременных структурных преобразований, связанных с изменениями объема или, говоря более общо, с изменением метрики твердотельных систем.

Силы, развивающиеся на молекулярном уровне в результате приращения объема в условиях стесненного пространства, могут быть весьма значительны.

Возрастание объема вещества той же массы в условиях стесненного пространства земных недр эквивалентно возрастанию всестороннего давления со стороны матрицы, вмещающей разуплотняющийся объем. Если разуплотнение происходит вследствие процесса, протекающего на молекулярном уровне, например за счет фазового перехода или химической реакции, то возникающие напряжения могут быть огромны. Мы знаем, что вода –

вещество, практически не имеющее прочности, – возрастая в объеме при замерзании, рвет стальные трубы.

Рассмотрим простейшую модель – разуплотнение сферического объема среды в стесненном пространстве. В этом случае образуется система локально уравновешенных «замыкающих» и «замыкаемых» латентных напряжений противоположного знака. Внутренняя часть системы – ее разуплотняющееся ядро – оказывается в условиях сжатия, периферия системы – в условиях растяжения, поскольку разуплотняющееся ядро стремится увеличить свой радиус. В упрощенном виде рассматриваемая модель по характеру распределения напряжений напоминает электрически поляризованный диполь, внутренняя часть которого – «ядро» – заряжена отрицательно (сжатие), а положительный заряд, уравновешивающий заряд ядра (растяжение), рассредоточен в «оболочке».

Упругая реакция горных пород на гидростатическую нагрузку обусловливает сравнительно небольшую релаксацию напряжений, связанную с объемным течением пород и выравниванием распределения плотности по объему субстрата, подверженного ее действию. Если гидростатическое напряжение сохраняется постоянным, то объемное течение со временем заканчивается, неоднородности поля напряжений сглаживаются и горные породы сохраняют оставшуюся не высвобожденной часть упругой энергии неограниченно долго до тех пор, пока будет оставаться в неизменности симметрия напряженного состояния. Упругая энергия, запасенная горными породами в виде упругой энергии объемных деформаций, не может релаксировать в принципе, сколь бы медленным ни было ее поступление в твердотельную систему. В фиксированных внешних условиях она может сохраняться сколь угодно долго. В соответствии с принципом обратимости упругих деформаций, эта энергия может быть высвобождена при нарушении изотропного напряженного состояния и энергетически обеспечить процессы различных форм неупругого деформирования: вязкого и пластического течения пород, образования разрывов сплошности. Она также может быть превращена в работу против внешних сил или расходоваться на тепловую диссипацию.

Свободному расширению разуплотняющейся геологической среды в ее естественном состоянии противостоят во-первых, внешнее литостатическое давление, а во-вторых, прочность вмещающей матрицы.

Поскольку $T > \tau$ или $T \gg \tau$, взаимодействие встречных процессов – накопления упругой энергии в системе и ее убыли – бу-

геологически длительно сохраняющихся структурных образований – результатов их былой тектонической активности.

Изменение параметров состояния, как мы это уже рассматривали, возбуждает сложную совокупность сцепленных между собой отдельных процессов, сводящихся к взаимным преобразованиям различных форм энергии, возбуждению локальных систем латентных напряжений и структурным преобразованиям среды. В этой сложной совокупности тектонические системы рассматриваются как своего рода элементарные единицы. От представления об иерархическом строении естественного поля напряжений, обусловленных преобразованиями единого по своей природе силового тектонического фактора на структурных неоднородностях среды, в представлении о тектонических системах мы приходим к тому, что поле напряжений многослойно и по природе возбуждающих его факторов.

Выше рассматривались различные виды латентных напряжений, обусловленных различными механизмами возбуждения: термические, деформационные, трансформационные и т.д. Все эти виды латентных напряжений возбуждаются и в геологической среде, однако конкретные условия возбуждения их в технических материалах и изделиях, конечно, иные, чем в случае естественных процессов в геологической среде.

Приведем примеры некоторых важнейших тектонических систем.

6-4.2. Трансформационные тектонические системы

К трансформационным тектоническим системам будем относить системы, в которых латентные напряжения образуются вследствие неоднородных или неодновременных структурных преобразований, связанных с изменениями объема или, говоря более общо, с изменением метрики твердотельных систем.

Силы, развивающиеся на молекулярном уровне в результате приращения объема в условиях стесненного пространства, могут быть весьма значительны.

Возрастание объема вещества той же массы в условиях стесненного пространства земных недр эквивалентно возрастанию всестороннего давления со стороны матрицы, вмещающей разуплотняющийся объем. Если разуплотнение происходит вследствие процесса, протекающего на молекулярном уровне, например за счет фазового перехода или химической реакции, то возникающие напряжения могут быть огромны. Мы знаем, что вода –

вещество, практически не имеющее прочности, – возрастая в объеме при замерзании, рвет стальные трубы.

Рассмотрим простейшую модель – разуплотнение сферического объема среды в стесненном пространстве. В этом случае образуется система локально уравновешенных «замыкающих» и «замыкаемых» латентных напряжений противоположного знака. Внутренняя часть системы – ее разуплотняющееся ядро – оказывается в условиях сжатия, периферия системы – в условиях растяжения, поскольку разуплотняющееся ядро стремится увеличить свой радиус. В упрощенном виде рассматриваемая модель по характеру распределения напряжений напоминает электрически поляризованный диполь, внутренняя часть которого – «ядро» – заряжена отрицательно (сжатие), а положительный заряд, уравновешивающий заряд ядра (растяжение), рассредоточен в «оболочке».

Упругая реакция горных пород на гидростатическую нагрузку обусловливает сравнительно небольшую релаксацию напряжений, связанную с объемным течением пород и выравниванием распределения плотности по объему субстрата, подверженного ее действию. Если гидростатическое напряжение сохраняется постоянным, то объемное течение со временем заканчивается, неоднородности поля напряжений сглаживаются и горные породы сохраняют оставшуюся не высвобожденной часть упругой энергии неограниченно долго до тех пор, пока будет оставаться в неизменности симметрия напряженного состояния. Упругая энергия, запасенная горными породами в виде упругой энергии объемных деформаций, не может релаксировать в принципе, сколь бы медленным ни было ее поступление в твердотельную систему. В фиксированных внешних условиях она может сохраняться сколь угодно долго. В соответствии с принципом обратимости упругих деформаций, эта энергия может быть высвобождена при нарушении изотропного напряженного состояния и энергетически обеспечить процессы различных форм неупругого деформирования: вязкого и пластического течения пород, образования разрывов сплошности. Она также может быть превращена в работу против внешних сил или расходоваться на тепловую диссипацию.

Свободному расширению разуплотняющейся геологической среды в ее естественном состоянии противостоят во-первых, внешнее литостатическое давление, а во-вторых, прочность вмещающей матрицы.

Поскольку $T > \tau$ или $T \gg \tau$, взаимодействие встречных процессов – накопления упругой энергии в системе и ее убыли – бу-

дет неуклонно возрастать, достигая критических значений уже на уровне прочности самой системы. По этой логике в геологической среде могут существовать своего рода естественные резервуары, содержащие огромное количество упругой энергии, происхождение которой связано с различными локальными вторичными процессами, протекающими в данной тектонической системе. Внедрение в такой резервуар, техногенное или в наложенном естественном процессе, может привести к разрядке накопленного запаса упругой энергии со всеми проявлениями, которые этому обычно сопутствуют.

По мере уменьшения литостатического давления в процессе разгрузки, например вследствие денудации положительных форм рельефа, функцию противодействия расширению разуплотняющегося ядра все в большей мере принимает на себя прочность периферии ядра – вмещающей матрицы. Это может привести к переходу всей системы в сильно неравновесное, метастабильное состояние. Для того, чтобы в такой системе спровоцировать процессы ее самопроизвольного разрушения, далее достаточно сравнительно небольших внешних инициирующих воздействий. Области динамического влияния разгрузки геологической среды представляют собой одну из важнейших тектонических систем, различные натурные и техногенные модификации которой рассмотрены выше.

Для того, чтобы дать представление о разнообразии и широкой распространенности процессов, которые сопровождаются изменениями объема геологической среды, вовлекаемой в те или иные структурно-вещественные преобразования, и, соответственно, возбуждением систем локальных напряжений, приведем несколько фактов.

В работе [Friedeman, 1972] указывается, что естественные латентные напряжения в геологической среде зависят от палеотектонической, палеогеографической – термальной и химической истории породы.

Б.Н. Достовалов [1965б] отмечает, что в результате неравномерного изменения объема пород в процессе их структурно-вещественных преобразований в них возникают *объемно-градиентные поля напряжений*, что приводит к созданию блочной структуры геологической среды. Он также выражает мысль, что динамо- и термометаморфизм являются одной из важнейших причин тектонических движений.

Изменение во времени фазового состава и плотности пород коры и верхней мантии в условиях интенсивного нагрева, обусловленного конвективным утонением мантии, рассмотрено в рабо-

те [Глико, Соболев, 1986]. В результате нагрева происходит деэклогитизация и разуплотнение нижней коры, которое сопровождается ее поднятием. Амплитуда суммарного поднятия с учетом изостатической реакции на замещение вещества литосферы более легким веществом и термического расширения литосферы может достигать 2–3 км.

Среди всего многообразия структурных превращений, происходящих в геологической среде, вряд ли могут найтись такие, которые не сопровождаются изменениями объема вещества, вовлеченного в эти процессы, будь это геохимические, фазовые или полиморфные преобразования, метаморфизм, перекристаллизация, плавление пород или их отвердевание, литификация осадков, дислокационное разуплотнение или образование трещин. Многие широко распространенные геологические процессы регионального масштаба, как гнейсификация, гранитизация, ангидритизация, серпентинизация, сопровождаются особенно значительными приращениями объема породы (на несколько и десятки процентов). Приведем ряд примеров.

А. Ритман [1964]: происходящие в глубине складчатых гор процессы метаморфизма, мигматизации и анатексиса сиалического материала связаны со значительным увеличением объема. Особенно это относится к разгнейсованию, процессу, представляющему собой ярко выраженный аллохимический метаморфизм, при котором увеличение объема может доходить до 30%. При мигматизации гнейса действует преимущественно термическое расширение, к которому при анатексисе добавляется еще увеличение объема, обусловленное плавлением (переход силикатных пород в расплав сопровождается приращением их объема на 20%).

В.В. Белоусов [1962]: процессы гранитизации на глубине 10–15 км приводят к увеличению объема пород примерно на 10–15%.

[Земля..., 1974]: реакция серпентинизации оливина осуществляется с увеличением объема на 70%.

В работе [Пономарев, Тейтельбаум, 1978] приведены расчеты, номограмма и данные приращения высоты горных сооружений в зависимости от мощности слоя, в котором происходит разуплотнение. Так, для восстановления исходной высоты гор, эродированных на 1 км, требуется разуплотнение литосферы всего на 0,2%, или слоя с мощностью 30 км на 0,67%, и т.д.

Геологи довольно часто указывают на то, что особенности тектоники на региональном уровне обусловлены процессами изменения объема, которые развиваются непосредственно в рас-

сматриваемых толщах пород. В качестве характерного примера можно привести работу С.А. Захарова [1965], в которой складкообразование в покровных мезозойско-кайнозойских отложениях Таджикской депрессии рассматривается как результат напряжений, возникших непосредственно в этих отложениях. Еще один пример подобного рода приведен в работе [Goward, 1987], где утверждается, что горные пояса Гималаев и Тибета возникли в результате поднятия, связанного с разуплотнением литосферы.

Вообще говоря, точка зрения, согласно которой складкообразование не могло быть обусловлено силами, воздействующими на складчатую зону извне, а является результатом геохимических процессов, происходящих внутри данной зоны и вызывающих метаморфизм пород, увеличение их объема и смятие в складки, получила широкое распространение еще со времен Дж. Холла (1859 г.). Критический обзор работ этого направления можно найти в работе [Камалетдинов и др., 1981]. К настоящему времени объем сведений в пользу такой точки зрения достиг рубежа, за которым начинается ее преобразование в синтетическую концепцию, принципиальное положение которой состоит в том, что орогеническая фаза осадочных мульд в их инверсионную стадию имеет бескорневой характер. Сегодня эта фаза свойственна мезозойско-кайнозойским осадочным породам. Завершение этой фазы – образование кристаллического фундамента. В работе [Гаврилов и др., 2000] отмечено, что в пике активности этой фазы геологической среде свойственна исключительно высокая энергонасыщенность, которая в разных проявлениях отмечена на всех уровнях организации среды и предопределяет основной мотив ее тектоники.

Приращение объема в условиях стесненного пространства недр Земли, препятствующего этому приращению, неизбежно должно вести к росту напряжений в разуплотняющихся объемах среды и содержащей их матрице. Следует подчеркнуть, что напряжения, возбуждаемые процессами приращения объема на молекулярном уровне, как о том уже говорилось, могут достигать огромной величины. Чем больше жесткость, чем меньше податливость вмещающей матрицы, тем, при прочих равных условиях, уровень напряжений, возбуждаемых процессами приращения объема, должен быть значительнее. Это, в частности, выражается в том, что в периферических зонах интрузий и диапиров наблюдается интенсивная деструкция, выраженная зонами трещиноватости и проявлениями динамометаморфизма.

Разумеется, после прекращения процессов, ведущих к разуплотнению, напряжения в объемных разуплотненых телах посте-

пенно релаксируют. Энергонасыщенность субстрата таких «отмерших» тектонических систем зависит от времени, которое прошло после прекращения периода их активного существования. При этом, однако, следует иметь в виду, что напряжения в горных породах в «законсервированном», или, как иногда выражаются, в «замороженном», виде, могут сохраняться на протяжении многих десятков миллионов лет даже в сравнительно небольших объемах пород. Так, в работе [Reik, 1976] отмечается геометрическая взаимосвязь между главными направлениями латентных напряжений в кварцевых зернах алевролитов и геологическими структурами, откуда взяты образцы. Она указывает на то, что эти напряжения явились следствием синтектонических процессов цементации и перекристаллизации, протекавших в геологическом прошлом. Работа [Friedeman, 1972]: степень восстановления упругих деформаций зависит от ориентировки свободной поверхности. По нормали к ней восстановление протекает сравнительно быстро. Но вдоль поверхности уже на расстоянии от нее 1–2 мм они сохраняются в течение 80 млн лет. Существование латентных напряжений, сохранившихся от процессов весьма отдаленного геологического прошлого, отмечено в работах [Земля..., 1974; Ярошевский, 1981].

Таким образом, латентная энергия, накопленная тектонической системой в период ее активного существования, может в той или иной мере сохраняться в системе в течение весьма значительных промежутков времени,«по инерции», уже после того, как процессы разуплотнения вещества в ней практически прекратились. Техногенное внедрение в продолжающий оставаться энергонасыщенным субстрат такого рода «бывших» тектонических систем или иное на них воздействие способно спровоцировать появление более или менее интенсивной наведенной сейсмичности.

6-4.3. Флюидно-газовые тектонические системы

Общие представления о связи тектонических явлений с газовой фазой геологической среды содержатся в работе [Кропоткин, Валяев, 1976]. Обогащение газами земной коры происходит главным образом за счет дегазации Земли, осуществляющейся активными тектоническими процессами и сопровождающими их явлениями образования разломов, высокой сейсмичности и вулканизма. Главными компонентами в составе газов являются пары воды, углекислота, сероводород, водород, азот и углеводороды. Установлено глубинное происхождение водорода, гелия, йода, брома, хлора, фтора, азота, лития, бора и др. В процессе

миграции флюидно-газовой смеси происходят химические превращения: окисление и восстановление. Глубинные флюиды способствуют образованию рудных месторождений, влияют на ход сейсмических процессов, могут служить причиной различных тектонических движений Земли. Роль флюидов в земной коре показана в работе [Файф и др., 1981].

В настоящее время получило развитие научное направление – физико-химическая геомеханика. В ее рамках рассматривается влияние жидких и газообразных фаз на механические свойства твердых тел, прежде всего на их прочность и деформируемость. Представление об этом направлении дает обзорная работа [Сальников, Траскин, 1987]. Вместе с тем следует заметить, что содержание этого обзора ограничено рассмотрением той группы явлений, связанных с адсорбционным (и хемосорбционным) участием среды в деформировании твердых тел, которая получила название «эффекта Ребиндера».

Характерным выражением эффекта Ребиндера является резкое снижение прочности и чрезмерная хрупкость твердых тел, обусловленные облегчением зарождения и последующего распространения трещин разрушения. Как обсуждалось выше, к таким же последствиям приводит внедрение атомов в инородные кристаллические решетки, так что в исходе, на уровне кристаллического строения твердых тел, мы в обоих случаях, по всей видимости, имеем дело с явлениями одной и той же природы. Об этом, например, говорит то, что металлические бинарные системы простого эвтектического типа с небольшой растворимостью компонентов в твердой фазе отличаются особенно сильным охрупчиванием. Тем не менее, хотя, по определению, образование трансформационных латентных напряжений и существование тектонических систем, в которых оно происходит, следовало бы отнести к разделу физико-химической геомеханики, эта проблема в ее сложившихся рамках пока не затрагивается. В целом это перспективное направление геомеханики находится на начальной стадии развития.

К исследованиям другой ветви физико-геохимической механики можно отнести работу [Гуфельд и др., 1996]. Экспериментально установлено, что образцы горной породы, даже длительное время находящиеся при атмосферном давлении в обычных условиях, не достигают полностью равновесного состояния вследствие того, что в их кристаллической структуре в связанном же состоянии находятся молекулы и атомы различных газов. В природном состоянии горные породы насыщены газами, в первую очередь, водородом и гелием, что радикально изменяет хара-

ктер и стиль их механического поведения. Имплантация водорода и гелия позволяет перевести их структуру в метастабильное состояние. Эти газы, химически не взаимодействуя с основными элементами твердой фазы литосферы, легко проникают в кристаллическую структуру и вызывают в ней значительные объемные изменения. При дегазации кристаллической структуры происходит восстановление ее свойств. Структурные изменения за счет диффузии легких газов, в отличие от фазовых переходов, не требуют критических значений P-T-параметров, протекают в широком диапазоне температур, в том числе и при нормальных. Действие легких газов выражено как размытый и обратимый фазовый переход. В работе [Гуфельд и др., 1996] отмечается, что за счет насыщения породы водородом и гелием ее энергонасыщенность может достигать исключительно больших значений и тем самым этот процесс может служить энергетическим источником больших землетрясений.

Представление о способности твердой среды переходить в энергонасыщенное состояние за счет имплантации водорода поддерживают данные о том, что таков же характер механического поведения конструкционных материалов, насыщенных водородом. Охрупчивание сталей за счет этого процесса получило название «водородной хрупкости», которая в некоторых случаях отмечена как причина взрывов химических реакторов [Остаточные..., 1957]. Газонасыщенность пород как причина внезапных выбросов уже рассматривалась выше, в рамках гипотезы секционированного суфляра.

Заметим, что работы, которые прямо указывают на флюидно-газовые воздействия как на причину высокой энергонасыщенности геологической среды, встречаются скорей как исключение.

6-4.4. Разломы как тектонические системы

Разрывные нарушения геологической среды как тектонические системы «многофункциональны». Само их образование может быть следствием их двухслойности – пограничного положения в зонах контрастных сочленений геологических структур с разной историей развития и разного вещественного состава вследствие несовместимости деформаций контактирующих структурных блоков. Смещение по разрывам возможно и в силу внешних тектонических воздействий. В этом случае вблизи сместителей развиваются явления динамометаморфизма, происходит образование деформационных латентных напряжений, спо-

собствующих хрупкому разрушению «зеркал скольжения», последующему брекчированию составляющих их горных пород и переходу приосевых частей зоны разлома в квазипластическое течение. Зоны разрывов являются зонами повышенной проницаемости земной коры и тем самым – зонами локализации флюидно-газовых тектодинамических систем.

Латентные деформационные напряжения, возникающие в материале тектонической брекчии в процессе пластического течения, по всей видимости, обеспечивают «катакластический», хрупкий характер разрушения не только в обломочных включениях в теле самой брекчии, но и во вмещающих породах, что ведет к постепенному возрастанию мощности тела брекчии. Это находит свое выражение в том, что в отдельных обнажениях удается увидеть постепенные переходы от недеформированных фрагментов через будинированные горизонты к катаклазитам [Тектоническая..., 1980]. В поперечном разрезе брекчии можно видеть смену всех трех стадий разрушения двухслойных систем. Набор структурных элементов тектонической брекчии содержит несколько фракций дробления, что в статистическом выражении и соответствует закону повторяемости.

Из анализа пространственного распределения сейсмичности Гармского прогностического полигона можно заключить, что скопления эпицентров землетрясений совпадают с положением и простиранием основных плейстоценовых разломов района, формировавшим современный тектонический рельеф (положительные формы) [Нерсесов и др., 1974]. Было показано также, что сейсмичности в пределах этих образований свойственна повышенная группируемость землетрясений, склонность к возникновению роев и другие проявления, которые характерны для протекания сейсмического процесса в объемах пород со значительной степенью их деструкции [Пономарев и др., 1976]. Сходные эффекты, проявляющиеся при разрушении образцов в лабораторных условиях, соответствуют неоднородным, разупрочненным образцам. В связи с этим обращает на себя внимание тот факт, что зоны разломов по существу представляют собой сложно построенные зоны дробления, мощность которых со временем возрастает. Высокий уровень сейсмической активности говорит не только о высокой энергонасыщенности в объемах локализации очагов землетрясений, но и о том, что здесь созданы условия для высвобождения этой энергии.

Структурную ситуацию, в которой возникают большие землетрясения, можно представить следующим образом. Субстратом участков концентрации эпицентров являются объемы гор-

ных пород на более поздних стадиях их деструкции. Окрестные же зоны с пониженным уровнем активности слабых землетрясений соответствуют породам на периферии этих объемов, пока лишь вовлекаемой в процесс разрастания деструктивных зон. Здесь пока еще сохраняются объемы пород, достаточно крупные для того, чтобы накопленные в них запасы латентной энергии могли обеспечить появление значительного сейсмического события.

Нечто подобное наблюдается и на региональном уровне. Так, горные системы, развиваясь центробежно, постепенно разрастаясь, втягивают в тектоническую переработку вещество своих окраин. Примерами могут служить землетрясения конца прошлого – начала нынешнего века в северных отрогах Тянь-Шаня и сильнейшие землетрясения Индии, которые возникают не в центральных частях Гималаев, а на их южной периферии. Сейсмичность, рассматриваемая как выражение процесса дробления геологической среды, освещена в работе [Кулюкин и др., 1983б].

Мы здесь привели примеры тектонических систем выборочно и в первом приближении, лишь наметив возможный контур проблемы. Объемы среды, в которой дислоцируются тектонические системы, природа процессов, которые их возбуждают, время их жизни, их влияние на энергетическую структуру геологической среды и энергетические возможности, как и многие другие их характеристики, – все это дело будущих исследований.

6-5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ЗЕМНОЙ КОРЫ

Под энергетической структурой земной коры подразумевается распределение собственного упругого потенциала в ее пространстве. Формально энергетическая структура может быть представлена как трехмерная потенциальная функция. Ее значения, сканированные эквипотенциальными поверхностями подобно изолиниям рельефа поля цифровых значений, могли бы дать представление о пространственной конфигурации энергонасыщенных тел. Это, в частности, кардинально бы решило проблему сейсмического районирования. В настоящее время, однако, построение таких карт невозможно, ибо для этого пока не существует исходных данных, апробированных методов их получения и самой идеи создания таких карт.

Тем не менее, анализ геологических и геофизических материалов в каких-то частных случаях уже и сейчас может дать в руки исследователя определенные для этого возможности.

6-5.1. Критическая глубина

Динамические явления появляются лишь по достижении горными работами некоторой глубины. В горном деле эту эмпирическую закономерность рассматривают как одно из основных условий, которое определяет саму возможность появления горных ударов. Однако проявления этой закономерности крайне неравномерны. Она варьирует в широких пределах, разных регионах и пределах регионов, причем обстоятельства, влияющие на разброс этой характеристики, остаются неясными. Иногда полагают, что она неодинакова в горных массивах, отличающихся разной прочностью полезного ископаемого и вмещающих его пород: чем прочность больше, тем вероятность возникновения динамических явлений выше (см., например, [Петухов и др., 1969]).

Это положение основано на большом наблюдательном материале. Вместе с тем повышенная прочность субстрата в отношении возникновения динамических явлений есть условие необходимое, но недостаточное. Прямой зависимости между прочностью пород и критической глубиной нет. В породах примерно одной и той же прочности динамические явления могут возникать по достижении разных глубин или же отсутствовать на глубинах, намного превосходящих средние значения критической глубины. Можно утверждать только одно: динамические явления не возникают выше критической глубины, но они могут отсутствовать и на глубине, которая многократно превышает критическую.

Согласно гипотезе Протодьяконова, на крепь выработки действует не вес всего столба лежащих выше пород, а лишь некоторый их ограниченный объем, заключенный в близкой окрестности выработки. Гипотеза объясняет, почему в прочных породах выработки не требуют креплений даже на очень больших глубинах. Но поскольку она отрицает рост давления с увеличением глубины разработок, тем самым отрицает и возможное влияние гравитационных сил на вариации критической глубины: ограниченный объем пород в окрестности выработки не в состоянии создать в породах запас упругой энергии, достаточный для возникновения динамических явлений.

Впрочем, это соображение не помешало созданию ряда гипотез о происхождении горных ударов как результате разрушения «конструкции» выработки под действием веса налегающих пород. Таковы теория балки, теория разрушения опор, теория свода. В последнем случае, например, предложена следующая механическая интерпретация горных ударов. В своде проламывается

несущий слой породы, вследствие чего напряженное полезное ископаемое «взрывается» под влиянием внешней нагрузки со стороны вышележащей толщи, образуя новый свод больших размеров, что и проявляется как горный удар (см., например, [Петухов и др., 1969]).

Прямыми измерениями напряжений в горных массивах было установлено, что в них возможны горизонтальные напряжения, по модулю многократно превосходящие напряжения, которые мог бы обусловить вес налегающих толщ, что поле измеренных напряжений часто имеет сильно дифференцированный характер, причем напряжения могут сильно варьировать не только по модулю, но и по знаку на базах измерения порядка метров или нескольких десятков метров. Эти напряжения были отнесены к «тектоническим». На их счет и были «списаны» наблюдавшиеся аномалии в поведении горных пород (см., например, [Айтматов и др., 1987]).

Анализ характера наблюдаемых аномалий, в том числе и эффект «критической глубины», объяснить действием тектонических сил, как их понимают геологи, так же трудно, как и действием веса пород. Так, логично было бы полагать, что уровень тектонических напряжений в особенности высок в тектонически активных областях и менее значителен в местностях тектонически спокойных. По этой же логике, в активных областях «критическая глубина» должна быть меньшей, чем в спокойных областях. Однако дело обстоит наоборот. В работе [Айтматов, 1987] отмечено, что критическая глубина зависит от типа тектоники. На территории древних стабильных щитов средняя глубина горных ударов составляет примерно 350 м, что минимум в полтора-два раза меньше, чем в районах мобильных сейсмоактивных горноскладчатых областей. Если объективно взглянуть на факты, получается картина парадоксальная: тектонические силы не усиливают, а ослабляют поле естественных напряжений.

Все становится на свои логические места, если исходить из допущения, что геологическая среда располагает собственным энергетическим потенциалом. Внешние силы способствуют разрядке этого потенциала. Чем интенсивнее их проявления, чем интенсивнее переработан ими субстрат, тем значительней разрядка, тем меньше уровень напряжений среды.

Этим же логично объясняются и парадоксальные на первый взгляд свойства «критической глубины». Дневная поверхность представляет собой поверхность разгрузки энергетического потенциала, и чем ближе к поверхности, тем значительней эта разрядка.

Можно было бы предположить, что поверхность «критической глубины» имеет сложный рельеф: в одних местах она образует своего рода «возвышенности», подходя более близко к земной поверхности, а в других погружается на большую глубину. Можно было бы предположить и высокую степень дифференцированности этого рельефа.

В качестве первого приближения, возможно, такая модель и правомочна. Однако данные о сейсмичности, наведенной техногенными воздействиями, обрисовывают картину принципиально иную: в этой картине существенная роль принадлежит изолированным, локальным, автономным образованиям. Геологическая среда содержит в себе локальные энергонасыщенные включения или слои, причем глубина их погружения в недра Земли может быть различна. С точки зрения развиваемых здесь представлений такие энергонасыщенные включения представляют собой локализованные тектонические системы, чаще всего приуроченные к разнородным контактам геологических тел.

Исходя из данных, примеры которых приведены выше, создается впечатление, что поле потенциальной функции имеет весьма дифференцированный характер и возрастание энергонасыщенности с глубиной представляет собой закономерность статистического характера. С возрастанием глубины энергонасыщенные тела встречаются в среднем чаще.

6-5.2. Распределение гипоцентров землетрясений земной коры по глубине

Основной структурный стереотип разгрузки трансмасштабен. Это означает, что при росте величины разгрузки и увеличении поверхности, на которой она осуществляется, должны расти и мощности зон разгрузки. Из этого следует, что в ситуации, когда денудации подвергаются значительные блоки литосферы, мощности образующихся зон разгрузки должны быть соизмеримы с масштабом литосферы или, по крайней мере, с мощностью земной коры.

Поскольку сейсмичность, по развиваемым здесь представлениям, возможна только в энергонасыщенных объемах среды, следует ожидать, что она же может служить и индикатором таких объемов, в которых протекают процессы дезинтеграции, сопряженные с их энергетической разгрузкой. В частности, в качестве инструмента, позволяющего уяснить картину изменения состояния среды с глубиной по параметру ее энергонасыщенности, может служить картина распределения гипоцентров землетрясений по глубине.

В общих чертах структурные преобразования в зоне разгрузки соответствуют такому сценарию. Согласно каноническому стереотипу, вначале возникают трещины субпараллельные рельефу или в генерализованном виде латеральные трещины. В местах устойчивых поднятий денудированные породы постоянно замещаются новыми объемами поступающего из глубины субстрата, т.е. в областях денудации устанавливается стационарный вертикальный поток, в котором происходит непрерывная эскалация субстрата. При этом мощность потока предопределяется интенсивностью денудации.

Субстрат, поступающий в зону разгрузки, неизбежно должен подвергаться расслоению трещинами первой генерации. Можно предположить, что глубина заложения зоны, где начинается процесс расслоения, имеет фиксированное положение. Субстрат, попавший в зону первичного расслоения, далее перемещается в более высокие этажи, подвергаясь дальнейшему дроблению и уступая место следующим «порциям» пока еще не нарушенного субстрата, который, попадая в зону первичного расслоения, точно так же начинает расщепляться на латеральные плиты, и т.д.

Рассмотрим, насколько соответствует этому сценарию распределение очагов землетрясений сейсмичности земной коры. Распределение $N(h)$ числа очагов землетрясений (N) по разрезу континентальной земной коры (h) однотипно даже в регионах с разным стилем тектоники [Юдахин, 2003]. Большинство очагов сосредоточено в сейсмоактивном слое, расположенном на глубине около 10–15 км. В направлении к земной поверхности, количество очагов быстро убывает. Глубже сейсмоактивного слоя оно убывает более медленно, примерно по экспоненциальному закону.

Обращает на себя внимание то, что подобная форма распределения очагов сейсмических импульсов, хотя и в своем масштабе, отражает основной, канонический структурный стереотип зон разгрузки. Такое же по форме распределение очагов по нормали к контуру выработки свойственно, например, шахтной сейсмичности. Форма распределения соответствует форме распределения упругого потенциала в зоне разгрузки (см. рис. 5.2). Процесс образования трещин в земной коре более всего проявлен в сейсмоактивном слое, расположенном на глубинах 5–10 км. Этот слой соответствует гребню потенциальной функции. По направлению к поверхности разгрузки сейсмическая активность быстро убывает. В глубину от гребня активность убывает примерно по экспоненте до глубин порядка 30–40 км.

Наиболее протяженные трещины, соответствующие наиболее значительным сейсмическим событиям, возникают в числе трещин первых генераций. Они в основном возникают в зоне ориентированной трещиноватости (глубже гребня потенциальной функции), тогда как зона дробления является ареной образования множества трещин высоких генераций и, соответственно, зоной высокой активности относительно слабых событий.

Геологические, геофизические данные и результаты изучения тонкой структуры полей сейсмичности указывают, что структурное состояние земной коры в целом соответствует той же схеме. Вблизи дневной поверхности, являющейся поверхностью разгрузки, среда сильно раздроблена, фрагментирована, а далее вглубь по разрезу степень ее дезинтеграции постепенно убывает. Установлено, в частности, что области активного образования ориентированной трещиноватости, располагающиеся несколько глубже слоя максимальной сейсмической активности, пространственно совпадают со *слоями пониженной скорости – волноводами*. Существуют данные в пользу того, что последние представляют собой раздробленные флюидонасыщенные зоны [Юдахин, 2003]. Существование максимума на глубине порядка 10–15 км с этой точки зрения соответствует слою, в котором в данный момент времени процесс дезинтеграции протекает с наибольшей интенсивностью. При этом в «подошве» этого слоя возникают сравнительно малочисленные, но более протяженные трещины первых генераций, возбуждающие наиболее значительные сейсмические события, тогда как в «кровле» этого слоя землетрясения многочисленней, но они соответствуют трещинам более высоких генераций и по преимуществу представлены относительно слабыми сейсмическими событиями.

В целом по разрезу земной коры раздробленность среды по мере движения к поверхности возрастает, вследствие чего доля значительных сейсмических событий с глубиной в среднем тоже возрастает.

Указанную особенность демонстрируют графики, приведенные на рис. 6.2. Здесь сопоставлены два распределения вида $N(h)$, построенные по данным о сейсмичности Евразии. При построении распределений учтено положение гипоцентров 16 тыс. очагов землетрясений. Массив данных одного из них включает очаги больших землетрясений (с $M \geq 5$), другого – очаги более слабых землетрясений. Из сравнения видно, что распределение более сильных землетрясений, в соответствии с изложенным, статистически смещено относительно распределения очагов более слабых землетрясений на большую глубину [Пономарев, 2007].

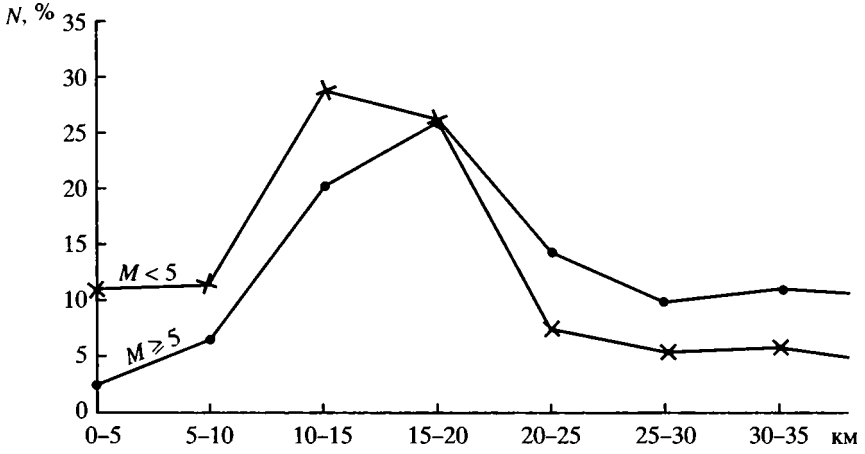


Рис. 6.2. Распределение числа землетрясений Евразии по глубине в совокупностях наиболее сильных [M ≥ 5) и более слабых [M < 5) событий

То же явление, но в другом формальном выражении, отражают изменения наклона графика повторяемости с глубиной. Как отмечалось выше, углы наклона графика повторяемости, построенные по данным о сейсмичности шахт СУБРа, достигают значений около 0,8, тогда как углы наклона графиков повторяемости естественных землетрясений, возникающих на больших глубинах, осциллируют около значения 0,5. В целом выдерживается закономерность: с ростом глубины графики повторяемости землетрясений становятся положе. Кроме того, наклон графиков зависит от степени консолидации пород: в консолидированных породах они положе. Так, в одном и том же диапазоне глубины графики в мезозойско-кайнозойских отложениях Таджикской депрессии круче графиков, построенных по данным о сейсмичности в консолидированных палеозойских породах Тянь-Шаня.

Возникает вопрос: какова вероятная причина разгрузки, обеспечивающей столь характерное распределение землетрясений по глубине? Возможный ответ на этот вопрос подсказывают следующие соображения.

Поскольку распределение очагов однотипно в регионах с разным стилем тектоники, например на Тянь-Шане и Балтийском щите, прежде всего, следует, что на характер распределения очагов стиль тектоники прямого влияния не оказывает. Общим моментом геологической истории Тянь-Шаня и Балтийского щита является устойчивое воздымание со скоростями порядка 8–10 мм/год. Оно жестко сопряжено с денудацией положитель-

Наиболее протяженные трещины, соответствующие наиболее значительным сейсмическим событиям, возникают в числе трещин первых генераций. Они в основном возникают в зоне ориентированной трещиноватости (глубже гребня потенциальной функции), тогда как зона дробления является ареной образования множества трещин высоких генераций и, соответственно, зоной высокой активности относительно слабых событий.

Геологические, геофизические данные и результаты изучения тонкой структуры полей сейсмичности указывают, что структурное состояние земной коры в целом соответствует той же схеме. Вблизи дневной поверхности, являющейся поверхностью разгрузки, среда сильно раздроблена, фрагментирована, а далее вглубь по разрезу степень ее дезинтеграции постепенно убывает. Установлено, в частности, что области активного образования ориентированной трещиноватости, располагающиеся несколько глубже слоя максимальной сейсмической активности, пространственно совпадают со *слоями пониженной скорости – волноводами*. Существуют данные в пользу того, что последние представляют собой раздробленные флюидонасыщенные зоны [Юдахин, 2003]. Существование максимума на глубине порядка 10–15 км с этой точки зрения соответствует слою, в котором в данный момент времени процесс дезинтеграции протекает с наибольшей интенсивностью. При этом в «подошве» этого слоя возникают сравнительно малочисленные, но более протяженные трещины первых генераций, возбуждающие наиболее значительные сейсмические события, тогда как в «кровле» этого слоя землетрясения многочисленней, но они соответствуют трещинам более высоких генераций и по преимуществу представлены относительно слабыми сейсмическими событиями.

В целом по разрезу земной коры раздробленность среды по мере движения к поверхности возрастает, вследствие чего доля значительных сейсмических событий с глубиной в среднем тоже возрастает.

Указанную особенность демонстрируют графики, приведенные на рис. 6.2. Здесь сопоставлены два распределения вида $N(h)$, построенные по данным о сейсмичности Евразии. При построении распределений учтено положение гипоцентров 16 тыс. очагов землетрясений. Массив данных одного из них включает очаги больших землетрясений (с $M \geq 5$), другого – очаги более слабых землетрясений. Из сравнения видно, что распределение более сильных землетрясений, в соответствии с изложенным, статистически смещено относительно распределения очагов более слабых землетрясений на большую глубину [Пономарев, 2007].

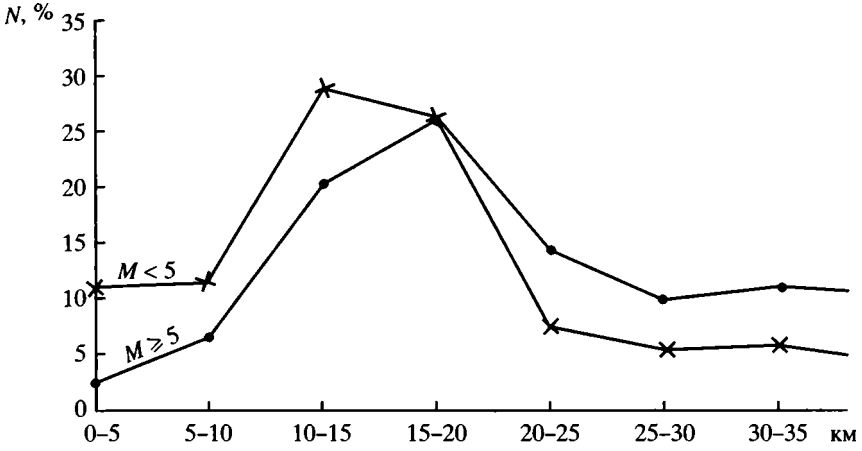


Рис. 6.2. Распределение числа землетрясений Евразии по глубине в совокупностях наиболее сильных [M ≥ 5) и более слабых [M < 5) событий

То же явление, но в другом формальном выражении, отражают изменения наклона графика повторяемости с глубиной. Как отмечалось выше, углы наклона графика повторяемости, построенные по данным о сейсмичности шахт СУБРа, достигают значений около 0,8, тогда как углы наклона графиков повторяемости естественных землетрясений, возникающих на больших глубинах, осциллируют около значения 0,5. В целом выдерживается закономерность: с ростом глубины графики повторяемости землетрясений становятся положе. Кроме того, наклон графиков зависит от степени консолидации пород: в консолидированных породах они положе. Так, в одном и том же диапазоне глубины графики в мезозойско-кайнозойских отложениях Таджикской депрессии круче графиков, построенных по данным о сейсмичности в консолидированных палеозойских породах Тянь-Шаня.

Возникает вопрос: какова вероятная причина разгрузки, обеспечивающей столь характерное распределение землетрясений по глубине? Возможный ответ на этот вопрос подсказывают следующие соображения.

Поскольку распределение очагов однотипно в регионах с разным стилем тектоники, например на Тянь-Шане и Балтийском щите, прежде всего, следует, что на характер распределения очагов стиль тектоники прямого влияния не оказывает. Общим моментом геологической истории Тянь-Шаня и Балтийского щита является устойчивое воздымание со скоростями порядка 8–10 мм/год. Оно жестко сопряжено с денудацией положитель-

ных форм рельефа, в процессе которой в рассматриваемых регионах были удалены толщи пород мощностью в несколько километров. Можно предположить, что фактором разгрузки и является столь существенное уменьшение литостатического давления на нижележащие породы.

Если допустить такую возможность, области воздыманий должны выделяться и как области повышенной активности коровой сейсмичности. Это и наблюдается. Воздымание дифференцировано: на Тянь-Шане оно, например, выражено в существовании впадин, чередующихся с поднятиями. Сопоставление карт сейсмичности и геологического строения Тянь-Шаня показывает, что сейсмически активные образования проецируются на области, где рельеф приподнят, тогда как сейсмичность впадин резко понижена. Это отчетливо проявляется в отношении наиболее значительных впадин – Ферганы, впадины оз. Иссык-Куль или Чуйской впадины. Отмеченный эффект в отношении более мелких впадин, скорей всего, вуалируется разбросом в определении координат эпицентров. Там, где используются более точные данные, этот эффект проявляется четче. Так, по данным наблюдений на Гармском прогностическом полигоне, сейсмичность почти отсутствует в довольно узких областях тектонических впадин, маркируемых долинами рек Сурхоб, Обихингоу, Сорбог, Комароу. Она сосредоточена в их горном обрамлении [Нерсесов и др., 1974].

На отрезках геологического времени, характеризуемых устойчивым воздыманием, разрушенные породы с земной поверхности постепенно удаляются, а на смену им в режиме эскалатора поставляются новые объемы слабо нарушенных энергонасыщенных пород, что в целом на длительном отрезке времени придает сейсмичности в воздымающемся потоке вещества характер стационарно действующей системы с фиксированной глубиной сейсмоактивного слоя.

Возможность образования разрывных нарушений в условиях высоких температур и давлений земных недр уже рассматривалась выше (3-4.1, 3-4.2). Порода, сформировавшаяся в условиях высокого литостатического давления, вследствие разгрузки переходит в состояние, при котором она, говоря образно, становится взрывоопасной – сейсмогенной. В этом состоянии среда метастабильна и напоминает состояние перенасыщенного раствора или переохлажденной жидкости.

Для потери устойчивости среды в метастабильном состоянии, выражающемся в лавинообразно развивающемся процессе энергетической разгрузки, достаточно даже слабых внешних воздей-

ствий. Об этом свидетельствует, например, существование зависимости сейсмической активности от воздействия астрономических факторов, ничтожных по своей величине в сравнении с прочностью пород. Масштабы же разгрузки за счет эрозионного среза положительных форм рельефа, когда на обширных площадях крупных мегаантиклинориев удаляются многокилометровые толщ пород, грандиозны. В рассматриваемом случае распределение $N(h)$ и отражает структурирование среды, энергетически активизированной денудацией, в процессе ее перехода в квазиравновесное, энергетически истощенное состояние в верхней земной коре и ее приповерхностном слое.

Как следует из распределения $N(h)$, процесс дезинтеграции среды достигает максимальной интенсивности в средней земной коре. Это созвучно работам, в которых подчеркивается, что породы средней земной коры отличаются повышенной тектонической активностью. В качестве примеров можно привести работу [Копп, 2004], автор которой полагает, что движущая причина тектонических проявлений, наблюдаемых на платформах, сосредоточена в более глубоком деформационном этаже; работу [Макаров, Щукин, 1979], в которой отмечена пониженная активность образования разрывных нарушений вблизи земной поверхности; работу [Краснопевцева, 1988], в которой предполагается, что современная тектоническая активность земной коры в большей степени обусловлена процессами, происходящими в ее промежуточном слое, что отражено наибольшей изменчивостью его геофизических характеристик.

Изложенная концепция континентальной сейсмичности как следствия процессов денудации естественным образом согласуется и с другими фактами, объяснение которых вне рамок этой концепции встречает серьезные трудности. В качестве примера можно привести следующее наблюдение: слои пониженной скорости выявляются только под положительными формами рельефа, во впадинах они выклиниваются [Шаров, Гречишников, 1982]. Если бы этого не было, это бы ставило под сомнение всю концепцию в целом, поскольку во впадинах происходит не разгрузка нижележащего субстрата, а, наоборот, его «пригрузка» за счет накопления денудированного материала. Возникновение в этих условиях слоя раздробленных пород, соответствующего в геофизическом отражении слою пониженных скоростей, невозможно в принципе.

То, что структурирующее значение фактора разгрузки до сих пор остается вне основных тенденций структурной геологии и геотектонических построений, по зрелом размышлении, предста-

вляется почти невероятным. Сейсмический отклик среды на разгрузку является частностью. Можно предположить, что те скоростные неоднородности, сообщающие среде ее геофизическую «мутность», начиная от таких ее крупнейших структурных образований, как «корни гор» и разуплотненная кора выше границы Конрада, являются следствием разуплотнения среды в процессе ее разгрузки. Выяснение всех такого рода вопросов требует постановки специальных исследований.

Остановимся на последнем замечании. Расслаивание пород, несмотря на отмечаемую многими исследователями его широкую распространенность, рассматривается как местное приповерхностное явление. Вопрос о том, что эрозионная разгрузка пород может иметь какое-то структурирующее значение в более глубоких ярусах земной коры или быть первичной причиной тектонической расслоенности, здесь не брезжит даже в постановке. Между тем, масштабы эрозионной разгрузки в балансе распределения масс вещества Земли грандиозны. Так, ежегодная разгрузка, только по оценке твердого стока рек континентов, достигает $13{,}5 \times 10^9$ т [Milliman, Meade, 1983]. О масштабах эрозионной разгрузки свидетельствует то, что в результате воздымания и эродирования щитов на дневную поверхность выходят породы, ранее находившиеся на глубине порядка 50 км (см., например, [O'Hara, 1977]).

Требует пристального внимания и другое. Несмотря на столь огромные потери массы, глубоко эродированные структуры близки к изостатическому равновесию. Из этого с неизбежностью следует, что потери массы за счет эрозии тут же восполняются, по всей видимости, в процессе изостатической компенсации, причем мощности латеральных потоков компенсирующего вещества должны примерно соответствовать мощности литодинамического потока, транспортирующего денудированный материал во встречном направлении. Вовлечение в латеральное перемещение огромных масс геологической среды в этом кругообороте – фактор столь же значительный, как их перемещение, приписываемое мантийной конвекции. Это может показаться поразительным, но ни тектоническая роль, ни структурные последствия эрозионной разгрузки в геотектонических построениях не учитываются. Попытки указать на возможную роль фактора денудационной разгрузки в геотектоническом, геоморфологическом и геофизическом аспектах предпринимались время от времени в ряде работ (см., например, [Пономарев, Тейтельбаум, 1978; Маккавеев, 1982; Пономарев, 1990; Неизвестнов, 2000]).

6-5.3. Сейсмоактивные слои

Энергетическая структура земной коры, таким образом, в генерализованной форме отражена распределениями вида $N(h)$. В такой генерализованной форме, при интервалах осреднения данных, равных 5 км, распределение $N(h)$ одномодально. Изучение тонкой структуры распределения землетрясений по глубине в интервалах осреднения данных, меньших 5 км, затруднительно: для этого требуются данные прецизионных систем сейсмологических наблюдений. В тех случаях, когда мы такими данными располагали, наблюдается следующая тенденция. По мере сужения интервала суммирования данных сейсмоактивный слой резко сужается к определенной глубине либо «распадается» на несколько узких частных максимумов. Создается впечатление, что в земной коре существуют особо сейсмоактивные слои, где, по нашим представлениям, геологическая среда находится в особо энергонасыщенном, сильно неравновесном состоянии. Об этом, в частности, свидетельствует чувствительность сейсмичности этих слоев к внешним воздействиям («тензочувствительность»). Так, подземные ядерные взрывы на полигоне в штате Невада сопровождались возникновением афтершоков, очаги которых по преимуществу дислоцировались в слоях 7 и 15 км [Адушкин и др., 1994]. В литературе обычны указания на то, что при возникновении значительных коровых землетрясений (с $M > 6$) их афтершоки часто тяготеют к слоям около 5–7 или около 15–17 км (см, например, [Арефьев, 2003]). В районе месторождения Лак (Франция) нефть добывается с глубин 650–750 м, газ – с глубины 3500 м. Здесь зафиксировано два этажа сейсмической активности: первый на глубине 500–1000 м, он приурочен к подошве нефтяной залежи, и второй на уровне газовой покрышки и непосредственно над покрышкой. На золотодобывающих рудниках Витсвотерсранд (Южная Африка) наиболее удароопасны глубины 1200–2400 м, выше и ниже вероятность ударов мала.

Такого рода данные указывают на то, что проявления наведенной сейсмичности не имеют перманентного характера, распространяясь однородно на весь объем среды, включающий очаг техногенного воздействия, а что в этом объеме существуют энергонасыщенные слои, зоны или объемные включения, отличающиеся повышенной «сейсмочувствительностью» к этим воздействиям.

Явление «отклика» энергонасыщенных включений на внешние воздействия отмечено и в отношении природной сейсмично-

сти. Так, в дальней зоне, на которую распространяется область сейсмического молчания, образующаяся при подготовке большого землетрясения, после возникновения главного толчка первыми появляются «удаленные афтершоки» – относительно слабые события, которые намечают место появления следующего по времени появления большого события. Удаленные афтершоки являются индикаторами особо энергонасыщенных объемов среды, наиболее «созревших» для разрушения.

В качестве одной из вероятных причин перехода геологической среды в энергонасыщенное состояние и тем самым возбуждения сейсмичности континентальной земной коры нами рассматривается уменьшение литостатической нагрузки за счет денудации положительных форм рельефа. Однако оно влечет за собой не только переход части изотропной составляющей поля напряжений в энергию фиксированных упругих деформаций. Разгрузка инициирует целый ряд сопутствующих проявлений. Так, изменение трехосного напряженного состояния за счет убыли вертикальной составляющей уже само по себе может перевести пластичный материал в хрупкое состояние [Фридман,1974]. Кроме того, вертикальная эскалация, перемещая вещество в направлении земной поверхности, изменяет и его температурный режим. Изменение же *PT*-условий, помимо механического аспекта, имеет и аспект физико-химический, который сводится к многосторонним преобразованиям структурно-вещественного состояния субстрата. Существенно то, что такие преобразования происходят скачкообразно.

Скачкообразное преобразование происходит не одновременно во всех точках субстрата. Общие закономерности такого рода процессов хорошо изучены в физическом материаловедении (см., например, [Фридман, 1974; Финкель, 1970]). В самых общих чертах процесс твердотельных структурных преобразований начинается с образования в исходной матрице субстрата локальных включений, вследствие чего они становятся центрами неоднородных объемных и линейных деформаций в области их дислоцирования. В субстрате возникают автономные источники упругой энергии, дисперсно рассеянные в объеме матрицы. Субстрат становится в таком переходном состоянии неравновесным, энергонасыщенным, склонным к хрупкому разрушению. Процесс образования трещин в таком субстрате может принимать взрывообразное, лавинное, сейсмическое течение.

Физическая картина перехода субстрата в энергонасыщенное состояние сейчас хорошо изучена в отношении металлов. Таковы, например, изменения состояния сталей при мартенситных

превращениях, происходящих при около 500 °С. В металлах критическое состояние наступает при температурах, соответствующих переходу из пластического состояния в упругое. Для чугуна такой «критический» интервал равен 400–700 °С. Заметим, что именно такие значения температур предполагаются для глубин 13–17 км [Киссин, 2002].

Существует точка зрения, что образование трещин в пластичной среде определяется деформацией сдвига (см., например, [Русинов, 2002]). Из этого следует, что, поскольку «горячая» порода более пластична, хрупкое разрушение в ней невозможно. Из материаловедения, однако, известно, что хрупкое разрушение с образованием трещин отрыва возможно и при таких температурах, когда материал еще достаточно пластичен. В этом случае инициирующие трещины возникают на тех гранях кристаллов, которые ближе по своей ориентировке к плоскостям, нормальным к действию растягивающего напряжения [Работнов,1979]. Дальнейшее смещение по таким трещинам («тектоническое течение») может придать материалу рассланцованную структуру, а сами зоны образовавшейся трещиноватости могут служить каналами для транспортировки флюида.

Мы здесь привели примеры из материаловедения, поскольку за ними стоят большие объемы проведенных исследований, а физическая сущность происходящих при этом структурных преобразований в принципе свойственна и другим поликристаллическим веществам, какими являются и горные породы. Существенным применительно к рассматриваемой нами ситуации является наглядность того, что монотонные изменения температуры и давления – порознь и в сочетании – в соответствии с теорией катастроф, могут обеспечить не монотонное, а скачкообразное («нелинейное») изменение состояния субстрата в аспекте его энергонасыщенности и связанной с нею его способности к динамическому разрушению.

Что касается наук о Земле, то здесь вопросы, имеющие отношение к затронутой нами теме, обсуждались во многих работах теоретического и экспериментального характера, в частности с попытками вывести существование геофизической границы Конрада из скачкообразных вещественных изменений. Однако аспект механических напряжений, возникающих в процессе таких вещественных преобразований, и возможная роль этих напряжений в деструкции среды до недавнего времени практически оставался вне рассмотрения. Положение дел в этой области стало меняться после результатов, полученных при бурении Кольской сверхглубокой скважины, достоверно показавших, что гра-

ница Конрада имеет скорее не вещественную, а структурную природу, и обусловлена скачкообразным изменением агрегатного состояния среды.

Импульсом к развитию исследований в этом направлении явилось также развитие представлений о влиянии глубинных флюидов на формирование структурно-вещественного состояния земной коры. В связи с этим стал активно обсуждаться, пока преимущественно в постановочной форме, вопрос о природе повышенной проницаемости литосферы для флюидов и формах структурной выраженности флюидопроводящих каналов. Подаспект этой темы – интерес к уяснению природы тектонической раздробленности в зонах жильных месторождений нефти. Изучение тонкой структуры коровой сейсмичности призвано сыграть в комплексе этих задач новую и эффективную роль инструмента, позволяющего не только устанавливать объемные очертания зон деструкции, но и процесс их формирования, а также их современное структурное состояние, что имеет множество выходов на насущнейшие потребности практики.

В целом показанные материалы приводят к представлению, что энергетическая структура земной коры, рассматриваемая по содержанию ее породами упругой энергии, имеет «слоисто-пятнистый» характер. Попытка детального сейсмического районирования, основанная на учете дифференцированного характера энергетической структуры земной коры, отражена в работе [Современная..., 2005].

6-5.4. Энергетическая деградация геологической среды

В процессе деструкции среда энергетически необратимо деградирует – теряет способность связывать в себе энергетический потенциал и в пределе становится полностью «асейсмичной». Уровень энергии в породах выше критической глубины ниже его пороговых значений, и хотя среда и здесь может еще обладать некоторым остаточным энергетическим потенциалом, она перестает быть энергонасыщенной. Стиль ее механического поведения изменяется: оно становится близко к такому, которое соответствует представлениям, развитым в «классической» геомеханике, структурной геологии и геодинамике.

Возвратимся к упоминавшемуся выше опыту с изучением акустической эмиссии при разгрузке образцов гранита. Как мы отмечали, образцы гранита, подвергшиеся предварительной одноосной нагрузке, накапливают значительный энергетический потенциал, способный затем, уже без дополнительной закачки

энергии, поддерживать активный микросейсмический процесс в образце в течение нескольких часов. Однако после повторного нагружения на ту же величину образец в разгруженном состоянии почти не эмитирует – это так называемый эффект Кайзера. В данном случае он свидетельствует о том, что образец породы, испытавший значительную нагрузку и затем высвободивший запасенную энергию, теряет способность к повторному накоплению энергетического потенциала. Он энергетически вырождается, хотя внешне и сохраняет свою целостность. Мы можем предположить, что связи, обеспечивающие фиксированные упругие деформации, в процессе разгрузки оказались разрушенными.

Выше мы отмечали тот факт, что между величиной горных ударов и энергией шахтных землетрясений значимой корреляции нет. Это обусловлено тем, что значительные сейсмические события в раздробленных, уже в существенной мере энергетически истощенных породах вблизи выработок невозможны.

Существуют устные сообщения, что образцы пород, взятые в полости обрушения, совпадающей с очагом горного удара, сами собой начинают разрушаться спустя несколько часов после их извлечения из массива. Это свидетельствует об их все еще значительной остаточной энергонасыщенности. Однако «путь свободного пробега» трещин, зарождающихся в небольших отдельностях, слишком невелик и, соответственно, мала энергия излучаемых при этом упругих импульсов. Это соображение перекликается с тем известным фактом, что очаги больших землетрясений возникают в консолидированных массивах прочных пород большой протяженности. И.Е. Губин, например, различал землетрясения Тянь-Шаньского типа, возникающие в прочных и слабо дислоцированных палеозойских породах, слагающих горные сооружения Тянь-Шаня, и землетрясения Вахшского типа, возникавшие в сильно дислоцированных и относительно малопрочных мезозойско-кайнозойских отложениях инверсированной Таджикской депрессии. Энергия максимальных сейсмических событий первого типа на порядки выше, чем у событий второго типа. Вместе с тем уровень сейсмической активности, выраженный относительно слабыми событиями, в структурах Таджикской депрессии гораздо выше, чем в структурах Тянь-Шаня.

Рассматривая естественные землетрясения как следствие разрядки тектонических напряжений, можно было бы предположить, что районы с интенсивной тектонической активностью должны характеризоваться исключительно интенсивной сейсмичностью и что здесь, в частности, следовало бы ожидать частого появления землетрясений с большой энергией. В действи-

ница Конрада имеет скорее не вещественную, а структурную природу, и обусловлена скачкообразным изменением агрегатного состояния среды.

Импульсом к развитию исследований в этом направлении явилось также развитие представлений о влиянии глубинных флюидов на формирование структурно-вещественного состояния земной коры. В связи с этим стал активно обсуждаться, пока преимущественно в постановочной форме, вопрос о природе повышенной проницаемости литосферы для флюидов и формах структурной выраженности флюидопроводящих каналов. Подаспект этой темы – интерес к уяснению природы тектонической раздробленности в зонах жильных месторождений нефти. Изучение тонкой структуры коровой сейсмичности призвано сыграть в комплексе этих задач новую и эффективную роль инструмента, позволяющего не только устанавливать объемные очертания зон деструкции, но и процесс их формирования, а также их современное структурное состояние, что имеет множество выходов на насущнейшие потребности практики.

В целом показанные материалы приводят к представлению, что энергетическая структура земной коры, рассматриваемая по содержанию ее породами упругой энергии, имеет «слоисто-пятнистый» характер. Попытка детального сейсмического районирования, основанная на учете дифференцированного характера энергетической структуры земной коры, отражена в работе [Современная..., 2005].

6-5.4. Энергетическая деградация геологической среды

В процессе деструкции среда энергетически необратимо деградирует – теряет способность связывать в себе энергетический потенциал и в пределе становится полностью «асейсмичной». Уровень энергии в породах выше критической глубины ниже его пороговых значений, и хотя среда и здесь может еще обладать некоторым остаточным энергетическим потенциалом, она перестает быть энергонасыщенной. Стиль ее механического поведения изменяется: оно становится близко к такому, которое соответствует представлениям, развитым в «классической» геомеханике, структурной геологии и геодинамике.

Возвратимся к упоминавшемуся выше опыту с изучением акустической эмиссии при разгрузке образцов гранита. Как мы отмечали, образцы гранита, подвергшиеся предварительной одноосной нагрузке, накапливают значительный энергетический потенциал, способный затем, уже без дополнительной закачки

энергии, поддерживать активный микросейсмический процесс в образце в течение нескольких часов. Однако после повторного нагружения на ту же величину образец в разгруженном состоянии почти не эмитирует – это так называемый эффект Кайзера. В данном случае он свидетельствует о том, что образец породы, испытавший значительную нагрузку и затем высвободивший запасенную энергию, теряет способность к повторному накоплению энергетического потенциала. Он энергетически вырождается, хотя внешне и сохраняет свою целостность. Мы можем предположить, что связи, обеспечивающие фиксированные упругие деформации, в процессе разгрузки оказались разрушенными.

Выше мы отмечали тот факт, что между величиной горных ударов и энергией шахтных землетрясений значимой корреляции нет. Это обусловлено тем, что значительные сейсмические события в раздробленных, уже в существенной мере энергетически истощенных породах вблизи выработок невозможны.

Существуют устные сообщения, что образцы пород, взятые в полости обрушения, совпадающей с очагом горного удара, сами собой начинают разрушаться спустя несколько часов после их извлечения из массива. Это свидетельствует об их все еще значительной остаточной энергонасыщенности. Однако «путь свободного пробега» трещин, зарождающихся в небольших отдельностях, слишком невелик и, соответственно, мала энергия излучаемых при этом упругих импульсов. Это соображение перекликается с тем известным фактом, что очаги больших землетрясений возникают в консолидированных массивах прочных пород большой протяженности. И.Е. Губин, например, различал землетрясения Тянь-Шаньского типа, возникающие в прочных и слабо дислоцированных палеозойских породах, слагающих горные сооружения Тянь-Шаня, и землетрясения Вахшского типа, возникавшие в сильно дислоцированных и относительно малопрочных мезозойско-кайнозойских отложениях инверсированной Таджикской депрессии. Энергия максимальных сейсмических событий первого типа на порядки выше, чем у событий второго типа. Вместе с тем уровень сейсмической активности, выраженный относительно слабыми событиями, в структурах Таджикской депрессии гораздо выше, чем в структурах Тянь-Шаня.

Рассматривая естественные землетрясения как следствие разрядки тектонических напряжений, можно было бы предположить, что районы с интенсивной тектонической активностью должны характеризоваться исключительно интенсивной сейсмичностью и что здесь, в частности, следовало бы ожидать частого появления землетрясений с большой энергией. В действи-

тельности, как говорилось выше, это не так. Тектоническая активность центральных Гималаев, например, исключительно высока. Тем не менее, она сочетается с весьма умеренной сейсмичностью. Наиболее значительные сейсмические события возникают не в центральных частях горных сооружений, а на их периферии, где слабо нарушенные породы предгорий и краевых прогибов только втягиваются в тектоническую переработку и пока обладают повышенным энергетическим потенциалом или способностью к его накоплению.

В целом картина пространственного распределения сейсмичности на региональном уровне повторяет ту схему, что свойственна распределению шахтной и естественной сейсмичности на уровне сейсмоактивных районов. Сейсмичность отражает в пространстве эволюцию деструкции геологической среды. Крайние члены эволюционного ряда представлены, с одной стороны, неким деструктурированным объемом или линейной зоной, где при высокой активности возникают лишь относительно слабые события, и, с другой стороны, слабонарушенной периферией этого объема или зоны, где при относительно низкой активности слабых событий возникают события с максимальной энергией.

Анализ картины сейсмической жизни разных регионов приводит к выводу, что «сейсмогенность» геологической среды зависит не столько от скорости поступления энергии, сколько от способности среды запасать поступающую энергию. В качестве эвристической модели этого утверждения может служить арифметическая задача о бассейне, в который по одной трубе вода вытекает, а по другой он наполняется. Если вода вытекает тотчас по мере поступления в бассейн, то её в бассейне почти не будет. Этот случай соответствует представлению о том, что напряжения в горных породах, возбуждаемые различными локальными процессами, релаксируют по мере их появления. Если же вода вытекает медленней, чем поступает, то со временем бассейн окажется переполнен. Причем количество воды в бассейне будет зависеть от емкости бассейна.

6-5.5. Историческая сейсмология

Сейсмология в ее русловом развитии формировалась на представлении, что очаг землетрясения возникает не при образовании новых разрывов, а при внезапном проскальзывании берегов уже существующих разрывных нарушений. Представление это восходит к гипотезе Рида, сформулированной в 1906 г. Согласно этой гипотезе, землетрясение рассматривалось как скачкообраз-

ное смещение берегов уже *существующего* разрыва. В 1966 г. эту гипотезу модифицировали В. Брейс и Дж. Байерли. Исследователи, ее разделяющие, а это подавляющее их большинство, сводят исследования физики очага землетрясения к уяснению того, как различные вариации условий на берегах разрывов сказываются на вариациях коэффициента трения между этими берегами. В 1998 г. в журнале Nature был опубликован обзор 76 работ, посвященных разработке этой теоретической установки.

В 50-е гг. XX в. академик Г.А. Гамбурцев, обобщая установку Рида на случай сейсмичности, представленной множеством землетрясений, выдвинул гипотезу стационарности сейсмического режима. Сейсмоактивный регион, с точки зрения этой гипотезы, представляет собой систему «сейсмических швов» – *уже существующих* разрывных нарушений. Разрядка поступающей тектонической энергии осуществляется посредством смещения берегов этих нарушений, или, говоря более обобщенно – сейсмоактивный район представляет собой стационарную систему, возникающую в условиях динамического равновесия между поступлением энергии в систему и ее последующим высвобождением.

Классические примеры систем подобного типа – квантовые генераторы, конвективные ячейки Бенара, реакция Жаботинского–Белоусова. Структуры, образующиеся в таких системах, получили название «диссипативных». Важнейшее свойство этих структур в том, что их среднестатистические параметры непрерывно восстанавливаются, воспроизводятся и, следовательно, система, в которой они возбуждаются, в целом не испытывает во времени необратимых изменений. Другими словами, это системы, лишенные направленных структурных изменений, т.е. системы, лишенные развития, эволюции, истории.

Согласно общепринятым представлениям, эта особенность стационарных систем свойственна и сейсмичности, хотя это обычно и не декларируется. В полной мере это представление поддерживается и в сейсмостатистике, которая была и остается основным методом изучения сейсмического режима. Сейсмостатистика, в частности, является базовой теоретической платформой ныне развитых методов количественного сейсмического районирования. С точки зрения этого подхода, сейсмический режим рассматривается как совокупность случайных событий, на появление которых никак не влияют события прошлого и которые никак не предопределяют появление сейсмических событий в будущем.

Системы трещин отдельности, поскольку они возникают в процессе рассеяния энергии, также можно считать диссипатив-

ными структурами, но с одним принципиальным уточнением: хотя трещины образуются в результате диссипации энергии, запасенной системой, роль каждой из них в рассеивании энергии одноактна. Это естественные преобразующие устройства разового использования. В этом случае мы имеем дело с нестационарной релаксирующей системой, структура которой необратимо изменяется, – в процессе диссипации энергии система испытывает структурную эволюцию. Если же сейсмичность отражает деструкцию геологической среды как процесс, развивающийся в пространстве–времени, то это в корне меняет методические подходы к расшифровке ее проявлений. В параллель исторической геологии, сейсмологические тела должны получить освещение как объекты *исторической сейсмологии*.

Возражением против постановки этого вопроса могло бы служить то, что необратимые изменения в сейсмическом режиме, если и существуют, то на таких длительных отрезках времени, что они практически незаметны. Однако такое возражение вовсе не распространяется на то, что разные участки сейсмоактивной территории, разные сейсмоактивные регионы или разные части одной сейсмогенерирующей структуры могут находиться на разных отрезках одного и того же эволюционного ряда и что именно это одна из основных причин столь богатого регионального разнообразия проявлений сейсмического режима.

6-6. ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Мысль о том, что геологические тела и протекающие в них процессы находятся в системном единстве и взаимодействии, просматривается уже в работах А. д'Орбиньи, Л. Эли де Бомона, М. Бертрана, Г. Штилле. Труды этих исследователей, в частности, создали предпосылки к представлению об орогенических фазах, разделенных промежутками относительного тектонического покоя. В более широком смысле эта тенденция выразилась в представлении о ритмичной неравномерности тектонических движений, одновременно охватывающей разные участки земной поверхности (см., например, [Проблемы..., 1980]). В наше время системный подход к изучению тектонических движений и скоррелированных геологических явлений обозначен как «геодинамика».

Развитие геологии, вообще, и геотектоники, в частности, сопровождалось борьбой двух противоположных концепций: глобальной и региональной. В основе первой лежит идея о процес-

сах, одновременно охватывающих весь земной шар, в основе второй – факты того, что фазы тектонической активности на уровне регионов нередко не совпадают с глобальным ритмом ни по времени их существования, ни по их продолжительности. В рамках региональной концепции, таким образом, подчеркивается подчиненность геологического развития факторам, имеющим региональное значение.

Во взгляде на природу факторов, управляющих ритмом тектонических движений, в свою очередь, могут быть высказаны две точки зрения: тектонические силы, под действием которых осуществляются тектонические движения, возбуждаются процессами, протекающими вне рассматриваемых объемов геологической среды, либо они есть следствие процессов, протекающих в этих же объемах.

Вообще говоря, эти точки зрения не являются альтернативными. В соответствии с принципом относительности (2-5.3), вопрос о «внешних» и «внутренних» источниках сил зависит от выбора масштаба рассмотрения. Однако выбор масштаба не индифферентен по отношению к природе процессов, генерирующих тектонические силы, поскольку объемы среды, в которых это происходит, являются вполне и однозначно определенными. У исследователя могут возникнуть трудности в выяснении границ и структуры генерирующей тектонической системы, а также те или иные предположения о ее масштабе и природе протекающих в ней процессов, но это уже субъективная сторона дела. Эффективность исследования будет зависеть от того, насколько исходные установки верно отражают параметры исследуемого объекта. С другой стороны, реальное поле напряжений, действующих в земной коре, в общем случае по природе возбуждающих его факторов многослойно. В общем случае оно есть наложение полей напряжений, возбуждаемых тектоническими системами разной природы и разного масштабного уровня.

Эти предварительные замечания указывают границы той области, в пределах которой приведенные далее соображения могут быть применены. Они касаются лишь ряда частностей: во-первых, возможного механизма влияния процессов хрупкого последействия на ритм тектонических движений по разломам; во-вторых, попытки ответить на вопрос, почему в одних случаях подвижки по разрывам осуществляются асейсмично, а в других сопровождаются возникновением землетрясений; в-третьих, указание на возможности того, что в пространственно-временных изменениях сейсмической активности отражено системное динамическое взаимодействие блоков земной коры, выраженное

в существовании между ними положительных и отрицательных связей; в-четвертых, возможности интерпретации тектонических движений на рассматриваемом масштабном уровне как имеющих автоколебательный характер.

В целом: сейсмичность обычно рассматривают как процесс разрядки напряжений, создаваемых действием современных тектонических сил. В таком плане сейсмичность предстает как прямое их следствие. Представление же о сейсмичности как о процессе разгрузки собственного энергетического потенциала среды, накопленного в процессе более длительной геологической истории геологической среды, позволяет говорить о возможности существования между сейсмичностью и современной тектоникой более сложной причинно-следственной связи. Факты говорят о том, что в причинно-следственной цепи «тектонические силы – сейсмичность» существует промежуточное звено – своего рода буферная энергетическая емкость, обозначенная здесь как собственный энергетический потенциал.

6-6.1. Дилемма дискретных и криповых подвижек

Изучение материалов по наведенной сейсмичности позволяет сделать заключение, что в большом числе случаев она имеет слоистый характер, притом такая слоистость приурочена к зонам разрывных нарушений.

Горнякам хорошо известно явление быстрого возрастания напряженного состояния горных пород по мере приближения участка работ к зонам тектонических нарушений. Однако это наблюдается не во всех случаях. Геологи-горняки выделяют два типа разрывных нарушений или тектонических контактов: «заряженные» и «разряженные». Обычно понимается это так, что по одним из них подвижка, снявшая их напряжение, уже произошла, тогда как другие все еще находятся в состоянии высокого напряжения.

В порядке предположений могут быть высказаны и другие точки зрения. Так, земная кора разбита множеством разрывных нарушений. Смещаясь по системе таких разрывов, породы земной коры условно выделенного объема передают импульсы тектонического перемещения масс пород далее, за пределы выделенного объема. Если же по какой-то причине смещения по разрывам становятся невозможны, то выделенный объем становится своего рода «плотиной», которая, сдерживая общее тектоническое движение, тем самым способствует локальному росту напряжений вплоть до перехода объема пород в энергонасыщенное

состояние. При таком взгляде отсутствие избыточных напряжений на «разряженных» контактах можно объяснять именно их подвижностью.

Такой взгляд в самых общих чертах согласуется с принятыми взглядами на причину землетрясений. Так, в сейсмотектонических построениях предполагается, что причиной землетрясений является внезапное высвобождение упругих деформаций, обусловленных действием современных тектонических сил. Среди различных модификаций этой точки зрения можно выделить две основные ветви: «региональную» и «локальную» концепции.

На нынешний день довлеет региональная концепция, восходящая к Г.Ф. Рейду. Эта концепция, в частности, предопределила современные общепринятые теоретические представления о механизме очага землетрясения, а также стратегию и тактику работ по прогнозу землетрясений. Основной содержательный момент этой концепции состоит в том, что природные землетрясения возбуждаются напряжениями сдвига, обусловленными региональными полями тектонических напряжений.

Региональная концепция подвержена обстоятельной и убедительной критике в работе [Певнев, 2003], где в качестве альтернативы предложена локальная концепция, по своей основной мысли восходящая к работам Г.А. Гамбурцева, который предположил, что непрерывность медленного смещения блоков земной коры по «сейсмическим швам» время от времени нарушается их локальной «спайкой». В зоне образовавшейся спайки начинают возрастать упругие деформации. При достижении последними критических значений происходит срыв блоков относительно друг друга. Основываясь на анализе геодезических данных, А.К. Певнев развил представление, согласно которому непрекращающиеся региональные тектонические смещения и осуществляют «закачку» упругой энергии в некоторый объем среды вокруг остановившегося участка. В этом случае ведущей деформацией в области будущего очага землетрясения является не сдвиг, а упругий изгиб. Амплитуда изгиба достигает наибольшей величины у осевой линии разрывного нарушения и, в соответствии с принципом Сен-Венана, убывает в его крылья по экспоненте.

Камнем преткновения обеих концепций является вопрос о причине «торможения» смещения по разрывам. Ответ на этот общий вопрос должен быть согласован, по крайней мере, с двумя фактами.

Во-первых, обе концепции ориентированы на ход событий, относящихся к единичному магистральному разрыву, торможение по которому и должно вести к росту тектонических напряже-

ний до критических значений. Между тем, сейсмические события в сейсмоактивном объеме представлены событиями разной величины, статистическая структура множеств которых подчиняется закону повторяемости. Таким образом, соответствующие построения должны учитывать принцип автомодельности. В соответствии с этим принципом, механизм торможения должен рассматриваться не применительно к одному, пусть и самому значительному событию, а в отношении совокупности событий во всем диапазоне масштабных уровней. Обычно же эта сторона явления остается в тени.

Во-вторых, требует объяснения то, почему на одном и том же разрыве одни его участки заторможены, другие же подвижны, причем со временем их режим в этом отношении меняется на противоположный.

Требуется, чтобы объяснения этих фактов, как и других, сопредельных с ними, находились бы в согласованном единстве. Попытаемся наметить контур возможного решения этой проблемы.

Безусловно, подвижка по разлому снимает тектоническую составляющую поля напряжений. Тем не менее, «заряженность» контакта могут определять и локальные условия – наличие в породах, вмещающих разрывное нарушение, собственного энергетического потенциала.

Смещение геологических тел относительно друг друга по разделяющим их разрывным нарушениям, отмечаемое средствами геологических и геодезических наблюдений, в одних случаях осуществляется асейсмично, в виде медленной, непрерывной криповой подвижки по разломам, разделяющим эти тела, а в других – дискретно, скачкообразно, сопровождаясь сейсмическими эффектами.

Данные изучения современной тектоники асейсмичных регионов с платформенным тектоническим режимом (см., например, [Копп, 2004]) показывают, что новейшие структуры этих регионов, помимо локальных образований, обусловленных местными процессами, возникли в поле действия горизонтальных сил сжатия и растяжения. Смещения по разрывным нарушениям в таких регионах протекают медленно, непрерывно и асейсмично. Что касается сейсмически активных регионов, то на режим криповых подвижек здесь налагается дискретная, скачкообразная составляющая, вызываемая смещениями берегов разрывных нарушений при землетрясениях.

В особенностях смещений по разрывным нарушениям в сейсмоактивных регионах обращает на себя внимание то, что они

осуществляются не в форме однородной трансляционной подвижки берегов разрывного нарушения относительно друг друга, а неоднородно, в режиме «червеобразного» движения. Подвижка по разрывному нарушению в одном и том же интервале времени на каких-то его отрезках осуществляется активно, а на каких-то она заторможена, причем со временем участки, которые в отношении подвижек по разрывному нарушению можно определить как «активные» и «пассивные», со временем меняются местами. При этом переход в активную фазу на заторможенном участке происходит скачкообразно, разрешаясь землетрясением или группой землетрясений.

В свое время Кнопов предложил для наглядности такого вида движения механическую модель, состоящую из нескольких плоских тяжелых дисков, последовательно соединенных между собой пружинами и способных перемещаться по гладкой поверхности. Если потянуть за один конец этой цепочки, то диски не придут в движение все сразу: одни из них, преодолев трение покоя, станут смещаться, другие же временно будут оставаться неподвижными. Со временем напряжения в упругих связях между заторможенными и мобильными дисками возрастают и по достижении ими критических значений «срывают» какой-либо из неподвижных дисков, который становится мобильным, тогда как прежде мобильные диски переходят в состояние покоя.

Существует почти необозримое множество моделей, с помощью которых предпринимались попытки объяснить причину непрерывного и дискретного смещений по разрывам. Так, модель очага землетрясения в результате скачкообразного движения бортов разрыва, взаимодействие которых определяется законами трения, впервые предложили В. Брейс и Дж. Байерли в 1966 г. Само это явление они назвали strick-slip («прерывистое скольжение»). Их работы положили начало экспериментальному направлению в изучении очага землетрясения. О масштабе развития этого направления дает представление упоминавшаяся выше обзорная работа в журнале «Nature» (январь 1998 г.). В большинстве работ этого направления предполагается, что причиной «торможения» подвижек является возрастание силы трения на контактах блоков по нормали к плоскости сместителя. Характеризуя состояние проблемы в целом, следует сказать, что соотношение между «непрерывной» и «дискретной» составляющими смещений по разрывам, как и «пульсирующий» характер этих смещений, в рамках этой концепции продолжают оставаться проблемой, которая ждет своего решения.

Академик Г.А. Гамбурцев развил концепцию, согласно которой земная кора в процессе своего развития расчленяется на относительно прочные блоки, разделенные ослабленными зонами – сейсмическими швами. Медленные относительные смещения этих блоков приводят к накоплению сдвиговых напряжений и их концентрации в определенных местах шва, которые он назвал «спайками». При подрастании напряжений до критических значений происходит разрушение «спайки» и скачкообразный срыв блоков – землетрясение. «Наряду с процессом разрушения – уменьшения прочности отдельных участков сейсмических швов – может идти обратный процесс «залечивания» разрушенных мест, образование новых «спаек» между соседними блоками. Таким образом, происходит закономерная смена взаимосвязанных процессов медленных и быстрых движений, накопления и разрушения напряжений, увеличения и уменьшения прочности» [Развитие..., 1982. С. 306].

Идеи Г.А. Гамбурцева по существу представляют собой программу исследований – скорее, направление поиска, чем его результат.

Означенные представления о природе прерывистого скольжения разработаны применительно к единичному сейсмическому событию. Если рассматривать проблему в рамках сейсмического режима совокупностей землетрясений, то, прежде всего, обращает на себя внимание следующий факт.

Сейсмическая активность сейсмоактивных регионов в целом и их отдельных частях переменна. В самом общем виде эта особенность может быть обозначена как смена периодов повышенной сейсмической активности и относительного сейсмического покоя. Приведем несколько примеров, очерчивающих феноменологическую выраженность этой особенности.

Сейсмически активная зона Китая в регионе Тайюань – Сиань, расположенная к юго-западу от Пекина, прежде характеризовалась относительным покоем на протяжении нескольких сотен лет [Рикитаке, 1979].

Эпицентры слабых землетрясений в своем подавляющем большинстве сгруппированы в сейсмологические структуры – участки концентрации эпицентров, которые разные авторы обозначают также как «кластеры» землетрясений, или «домены». Периоды высокой активности Анатолии обеспечивались одновременной активизацией доменов или их групп в 40-х – 50-х гг. XX в. в западной части Северо-Анатолийской зоны разломов, а в 60-х–70-х гг. – в восточной ее части. Активизация восточной части произошла с десятилетним запаздыванием после прекращения

интенсивной активности в западной части. При этом большие землетрясения возникали в фазе общего подъема сейсмической активности, ничем в этом смысле не отличаясь от слабых событий [Архипова, 2004].

Функция от энергии (в корнях кубических), сбрасываемой значительными сейсмическими событиями Средней Азии в 1900–1980 гг., суммированная в десятилетних интервалах со смещением вдоль оси времени, равным двум годам, обнаруживает четко выраженную смену активных и пассивных периодов с максимумами активности, приходящимися на 1910–1911 гг., 1948–1949 гг. и конец 80-х гг. При этом в каждом этапе активизации сильные землетрясения возникали пространственно-временными группами, области локализации которых не перекрывались [Гамбурцев и др., 1991].

Приведенные факты говорят о том, что «торможение» подвижек или возобновление их тектонической подвижности осуществляется в определенном масштабе времени синхронно по отношению сразу ко всему множеству разрывных нарушений, попавших в область локальной сейсмической активизации или в область сейсмического покоя. Более того. Разломы представляют собой сложно устроенные зоны разрывов. В режиме сейсмической активизации, распространившемся на зону разлома, происходит «торможение» не только подвижек по основному разлому, но подвижек сразу по всем трещинам, попавшим в область подготовки главного события. В заторможенном участке разлома спустя какое-то время возникает большое землетрясение со своими сейсмическими сателлитами или несколько таких землетрясений. Заторможенный участок становится высокосейсмичным. Сейсмичность дробит образовавшийся «затор», нередко по частям, в конечном счете восстанавливая беспрепятственное непрерывное движение геологических масс, разделенных зоной разлома. Асейсмичное криповое смещение по разрывам трансформируется в дискретное, сейсмическое.

Такого рода данные определенно говорят о том, что в этом случае мы имеем дело не с механическими нарушениями или одновременным, синхронным «залечиванием» нарушений сплошности во всей сейсмически активизированной области, а с какими-то управляющими воздействиями, влияние которых распространяется на крупные геолого-структурные образования регионального уровня.

Вероятной выглядит гипотеза, что в роли управляющих воздействий здесь выступают вариации поля современных тектонических напряжений. Что, например, в поле тектонических напря-

жений по каким-то причинам возрастает составляющая сжимающих напряжений, ориентированная по нормали к плоскостям разрывных нарушений. Возрастание силы трения на берегах трещин, входящих в зону разломов, и влечет за собой приостановку взаимного проскальзывания их берегов, подобно тому как осевое сжатие фрикционной муфты прекращает проскальзывание ее дисков относительно друг друга и тем самым делает муфту способной передавать крутящий момент. Если же крутящий момент превзойдет некоторое критическое значение, то может произойти «срыв» дисков – дискретный скачок.

Этой гипотезе противостоит следующее соображение.

Диаграмма ориентировки разрывных нарушений по данным определения механизмов очагов в каждом регионе обычно представляет собой многолучевую «розу», т.е. подвижки по разрывам представлены разными направлениями. Хотя среди направлений обычно выделяется одно преобладающее, в целом картина довольно хаотична.

Следовало бы ожидать, что возрастание сжатия, затрудняя смещение по разрывным нарушениям одного азимута, неизбежно должно было бы сопровождаться облегчением возможности смещения в направлении, перпендикулярном возросшему сжатию. Будь это так, в сейсмически активизированном регионе должна была бы резко возрасти доля землетрясений со сходными механизмами, однако если иногда это и проявляется, то в форме некоторого слабо выраженного наложенного эффекта. Из этого можно сделать заключение, что природа управляющего воздействия, переводящего регион в сейсмически активизированное состояние, есть величина не векторная, а скалярная.

Теперь, уже на более обоснованном уровне, снова обратимся к проблеме взаимоотношения сейсмичности и тектоники в наведенном процессе. По существу процесс наведенной сейсмичности в данном аспекте можно рассматривать и как модель того, что происходит в случае природной сейсмичности.

Та трещиноватость в крыльях разлома, которая образовалась в процессе горных работ, возникла бы и самостоятельно, самопроизвольным образом, но уже на геологических отрезках времени, образуя характерное для многих разрывных нарушений их деструктивное оперение. Зоны «заряженных» разрывных нарушений сами по себе являются системами, в которых протекают активные энергетические преобразования. Они представляют собой активные тектонические системы, способные насыщать вещество упругой энергией.

Энергия в зоне «заряженных» разрывных нарушений распределена все по тому же стереотипу ее распределения в зоне разгрузки. Ее максимумы смещены от зоны сместителя на некоторое удаление в крылья разлома, а далее убывают. Эти и другие данные натурных наблюдений показывают, что среда, как энергонасыщенная, проявляет себя вблизи разрывных нарушений. Сейсмичность как наведенная, так и природная, является своего рода их «сейсмическим оперением».

Какова возможная природа этого явления?

В рамках энергетического подхода возможны два допущения. Одно из них состоит в том, что разрывные нарушения сейсмогенны в том случае, если они секут энергонасыщенные породы, тем самым создавая условия для их энергетической разгрузки. В этом случае разрывное нарушение по существу представляет собой зону разгрузки с типичными особенностями ее структуры. «Мозаичность» деструктивных полей, отображаемых сейсмичностью, в этом случае может быть объяснена пространственной неоднородностью потенциальной функции, описывающей состояние пород по параметру их энергосодержания.

Другое допущение состоит в том, что разрывное нарушение, развивающееся в определенных геологических условиях, само по себе представляет собой тектоническую систему, которая активно осуществляет энергетические преобразования и тем самым ведет к повышению энергосодержания среды в зоне своего динамического влияния.

Мы здесь не станем рассматривать доводы в пользу того или иного из этих двух последних допущений. Нам они не представляются альтернативой. Пока же заметим: в типичных случаях энергонасыщенность в зонах разрывных нарушений, видимо, имеет многофакторную природу, включая и фактор современных тектонических движений. В отношении последнего следует заметить, что, во-первых, он не единственный, как это принято в сейсмотектонических построениях, а, во-вторых, является, скорей, «управляющим», чем «силовым». Основные запасы энергии, высвобождаемой в наведенном сейсмическом процессе, накапливаются в результате энергетических преобразований, сопряженных с длительным геологическим развитием данного объема земной коры.

Подходя к попытке решить проблему природы «торможения» подвижек по разрывам – образования «спаек», по Г.А. Гамбурцеву, можно предложить следующую версию.

Сама по себе сейсмичность есть выражение процесса релаксации ее собственного энергетического потенциала. Процесс же

релаксации в достаточно хрупких породах сопровождается явлением хрупкого последействия, влекущего за собой их разуплотнение. Свободному расширению дезинтегрированной породы препятствует матрица вмещающего пространства. С течением времени в объеме пород, где протекает этот процесс, возрастает внутреннее давление подобно тому, как возрастает всестороннее давление в герметичном сосуде, заполненном замерзающей водой. Давление – величина скалярная. Оно одинаковым образом действует на разрывные нарушения, ориентированные произвольным образом.

Дальнейшее развитие сейсмического процесса в общих чертах видится следующим образом. Условия генерирования повышенного давления в пространстве сейсмоактивного региона дифференцированы. Там, где этот процесс проявлен сильней всего, возрастающее давление «запирает» подвижки по разрывным нарушениям. Вначале они прекращаются по самым значительным разрывным нарушениям, и затем этот процесс постепенно распространяется на все менее значительные нарушения. Возникает классическая картина роста «сейсмического затишья», центробежно распространяющаяся от очага будущего большого землетрясения (см., например, [Пономарев и др., 1976]).

Если рассматривать картину на этой стадии ее развития в генерализованном виде, то в какой-то части магистрального разлома, контролирующего тектоническую деятельность региона, возникает локальный «затор», который в дальнейшем играет роль «плотины», накапливающей напряжения, соответствующие приостановке современных тектонических движений. Противодействие роста давления вследствие разуплотнения и роста тектонических напряжений достигает критических значений – горная порода переходит в предельное состояние. Далее возникает «срыв» – собственно землетрясение.

Условия перехода в предельное состояние наиболее благоприятны в крыльях разрывного нарушения, где уровень запасенной упругой энергии высок, существенно выше, чем в осевой части разрыва, и где градиенты поля потенциальной функции особенно велики. Здесь «по живому» и возникает трещина, генерирующая сейсмическое излучение. В образующемся очаге высвобождаются обе составляющие: «тектоническая», представленная в волновой картине длиннопериодным излучением, и высокочастотная «дислокационная», обусловленная разгрузкой собственного энергетического потенциала.

Таким образом, в рамках предложенной схемы условия торможения подвижек по разрыву создаются ростом изотропной со-

ставляющей поля напряжений за счет разуплотнения пород в процессе хрупкого последействия. Но торможение, препятствуя дальнейшему смещению масс среды по системе разрывов, влечет за собой приращение «стрессовой», тектонической составляющей поля напряжений, подрастание которой до критических значений инициирует появление сейсмогенной трещины. В целом же распределение упругой энергии относительно сместителя, а также появление основного разрыва и его сателлитных трещин, соответствует сценарию фрагментации и подчиняются алгоритму роста зон разломов по схеме «бокового наращивания».

Возникшее сильное землетрясение резко меняет напряженное состояние в зоне своего возникновения: сначала в ближней, а затем и дальней. Область очага возникшего землетрясения по отношению к своей периферии играет роль области стока деформаций – роль демпфирующего пространства. В области динамического влияния образовавшегося очага массово возникают последующие толчки – афтершоки. Волна энергетической разгрузки, перемещаясь в дальнюю зону, провоцирует появление последующих сейсмических событий. Процесс сейсмической активизации развивается по схеме «заражения». Регион в значительной своей части переходит в сейсмически активизированное состояние. Оно длится до тех пор, пока избыточное давление, обусловленное разуплотнением, не будет сброшено во всех частях сейсмически активизированной области. Далее регион в этой своей части переходит в состояние относительного сейсмического покоя. Оно длится до тех пор, пока продолжающееся разуплотнение энергонасыщенного материала не подготовит новое повышение давления и новый, очередной переход в сейсмически активизированное состояние. Взаимодействие двух факторов: рост давления за счет релаксационного разуплотнения энергонасыщенной среды, влекущего за собой торможение подвижек по разрывам, и рост стресса за счет этого торможения, обеспечиваемого современными тектоническими движениями, и придают движению по разрывам характер прерывистого скольжения.

Предложенную схему можно было бы подкрепить конкретными материалами по изучению сейсмического режима. Она позволяет достаточно логично объяснить многие особенности сейсмического режима, которые при традиционном подходе выглядят труднообъяснимыми, в особенности взятые не по отдельности, а в комплексе. Однако это потребовало бы нефункционального включения в данную работу весьма значительного объема текста, который в целом лишь подкрепил бы уже высказанные здесь предположения. Это тема для другой работы. Здесь же схема

приведена для того, чтобы осветить принципиальную основу, из которой возможно исходить при анализе соотношения между сейсмичностью и тектоникой.

В целом заключение об этом соотношении сводится к тому, что тектонические движения, осуществляющиеся в энергетически пассивной среде, асейсмичны и относительные смещения геологических тел вдоль разделяющих их разрывных нарушений происходят в медленном, непрерывном, «криповом» режиме. Что же касается движений по разрывам в среде энергетически активной, то оно приобретает дискретный, «спазматический», сейсмический характер. Подчеркнем, что такой характер систематически проявляется в отношении всех сейсмогенных разрывов, т.е. это эмпирическое наблюдение имеет статус всеобщей, универсальной закономерности.

6-6.2. Вариации сейсмической активности как индикатор тектонических движений

«Сейсмодислокации» определяют как деформации земной поверхности, вызванные большими землетрясениями. Это могут быть деформации, морфологически сходные с тектоническими деформациями, которые происходят за счет медленных тектонических движений, и деформации, обусловленные различными вторичными проявлениями – сходами селевых лавин, откольными явлениями в крутых бортах ущелий и т.д. Далее мы будем иметь в виду только тектоническую составляющую сейсмодислокаций.

Согласно Ю.В. Ризниченко [1985], доля сейсмических подвижек в общей совокупности всех тектонических смещений незначительна: сейсмический вклад в общей сумме «сейсмотектонического течения горных масс» не превышает первые проценты.

При осреднении по большим промежуткам времени, возможно, это и так. Но по мере уменьшения интервалов времени между наблюдениями обнаруживается, что доля деформаций земной поверхности, сопровождающих проявления сейсмической активности, более значительна.

На рис. 6.3 [Архипова, 2004] отражены в графиках годовые изменения уровня Каспия (*1*) и уровня сейсмичности Кавказско-Копетдагского района (*2*). Второй график получен осреднением десятилетних сумм числа землетрясений с M от 4,3 и выше с шагом смещения в 1 год. На рисунке видны отчетливые противофазные изменения сравниваемых кривых. Заметим, что неуклонное понижение уровня Каспия к 1975 г. было в свое время

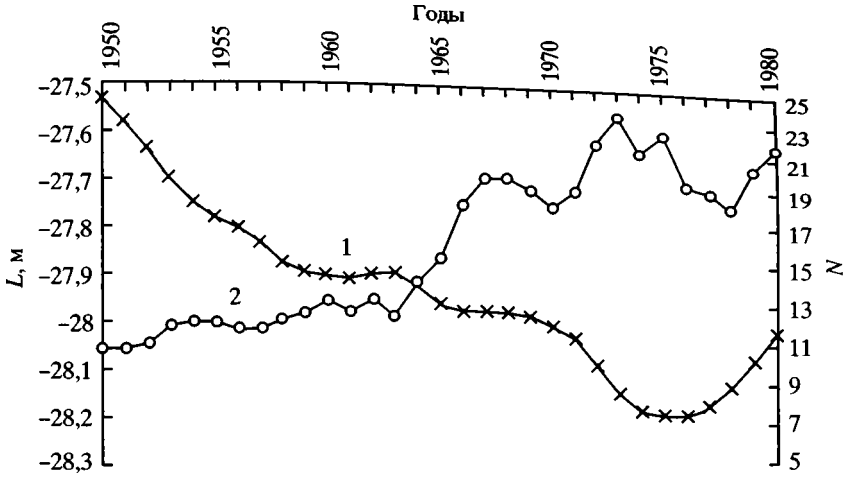


Рис. 6.3. Годовые изменения уровня Каспия (1) и уровня суммарной сейсмичности Кавказа и Копетдага (2) [Архипова, 2005]

интерпретировано как высыхание Каспия за счет прогрессирующего уменьшения речного притока. Как одна из мер стабилизации уровня моря, был отторгнут от моря и превращен в соляную пустыню Карабогазгол. Кроме того, с той же целью планировалась переброска в Каспий стока северных рек.

Из приведенных графиков видно, что понижение уровня Каспия было временным и, по всей видимости, имело тектоническое происхождение. Выглядит вероятным предположение, что изменения уровня сейсмической активности отразили процесс роста горных сооружений в обрамлении Каспия, сопровождавшийся компенсационным прогибанием его дна. В приведенной картине сейсмичность играет роль весьма четкого индикатора тектонических движений.

В отношении связи сейсмичности и тектоники можно привести такую эвристическую аналогию. Тектоника возбуждает природную сейсмичность подобно тому, как ведение горных работ в энергонасыщенной среде возбуждает шахтную сейсмичность. Как отмечалось выше, всплески активности шахтной сейсмичности четко связаны с изменением интенсивности горных работ. Не располагая информацией о плане производства горных работ, об их пространственно-временно́м режиме, тем не менее, можно было бы составить суждение на основании наблюдений за шахтной сейсмичностью. Подобно этому сейсмический режим сейсмо-

приведена для того, чтобы осветить принципиальную основу, из которой возможно исходить при анализе соотношения между сейсмичностью и тектоникой.

В целом заключение об этом соотношении сводится к тому, что тектонические движения, осуществляющиеся в энергетически пассивной среде, асейсмичны и относительные смещения геологических тел вдоль разделяющих их разрывных нарушений происходят в медленном, непрерывном, «криповом» режиме. Что же касается движений по разрывам в среде энергетически активной, то оно приобретает дискретный, «спазматический», сейсмический характер. Подчеркнем, что такой характер систематически проявляется в отношении всех сейсмогенных разрывов, т.е. это эмпирическое наблюдение имеет статус всеобщей, универсальной закономерности.

6-6.2. Вариации сейсмической активности как индикатор тектонических движений

«Сейсмодислокации» определяют как деформации земной поверхности, вызванные большими землетрясениями. Это могут быть деформации, морфологически сходные с тектоническими деформациями, которые происходят за счет медленных тектонических движений, и деформации, обусловленные различными вторичными проявлениями – сходами селевых лавин, откольными явлениями в крутых бортах ущелий и т.д. Далее мы будем иметь в виду только тектоническую составляющую сейсмодислокаций.

Согласно Ю.В. Ризниченко [1985], доля сейсмических подвижек в общей совокупности всех тектонических смещений незначительна: сейсмический вклад в общей сумме «сейсмотектонического течения горных масс» не превышает первые проценты.

При осреднении по большим промежуткам времени, возможно, это и так. Но по мере уменьшения интервалов времени между наблюдениями обнаруживается, что доля деформаций земной поверхности, сопровождающих проявления сейсмической активности, более значительна.

На рис. 6.3 [Архипова, 2004] отражены в графиках годовые изменения уровня Каспия (*1*) и уровня сейсмичности Кавказско-Копетдагского района (*2*). Второй график получен осреднением десятилетних сумм числа землетрясений с M от 4,3 и выше с шагом смещения в 1 год. На рисунке видны отчетливые противофазные изменения сравниваемых кривых. Заметим, что неуклонное понижение уровня Каспия к 1975 г. было в свое время

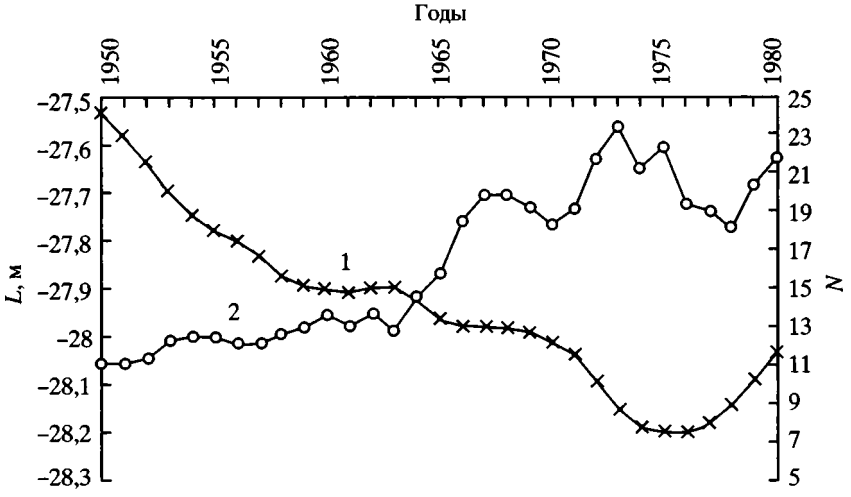


Рис. 6.3. Годовые изменения уровня Каспия (1) и уровня суммарной сейсмичности Кавказа и Копетдага (2) [Архипова, 2005]

интерпретировано как высыхание Каспия за счет прогрессирующего уменьшения речного притока. Как одна из мер стабилизации уровня моря, был отторгнут от моря и превращен в соляную пустыню Карабогазгол. Кроме того, с той же целью планировалась переброска в Каспий стока северных рек.

Из приведенных графиков видно, что понижение уровня Каспия было временным и, по всей видимости, имело тектоническое происхождение. Выглядит вероятным предположение, что изменения уровня сейсмической активности отразили процесс роста горных сооружений в обрамлении Каспия, сопровождавшийся компенсационным прогибанием его дна. В приведенной картине сейсмичность играет роль весьма четкого индикатора тектонических движений.

В отношении связи сейсмичности и тектоники можно привести такую эвристическую аналогию. Тектоника возбуждает природную сейсмичность подобно тому, как ведение горных работ в энергонасыщенной среде возбуждает шахтную сейсмичность. Как отмечалось выше, всплески активности шахтной сейсмичности четко связаны с изменением интенсивности горных работ. Не располагая информацией о плане производства горных работ, об их пространственно-временно́м режиме, тем не менее, можно было бы составить суждение на основании наблюдений за шахтной сейсмичностью. Подобно этому сейсмический режим сейсмо-

активного региона отражает и картину его тектонической жизни. Сравнение же хода временных изменений сейсмичности в разных регионах и их разных частях может дать ценную информацию о системном, геодинамическом единстве их тектонического развития.

Наблюдения показывают, что жесткость связи между интенсивностью горных работ и шахтной сейсмичностью велика только на уровне относительно слабых событий. Значительные сейсмические события уже не имеют столь жесткой связи с ведением горных работ. Следует принять во внимание и то, что в целом темп нарастания активности шахтной сейсмичности по отношению к темпу ведения горных работ не линеен. В развитии шахтной сейсмичности со временем проявляется составляющая ее самовозбуждения, которая по силе своего влияния в режиме сейсмической активизации может привнести вклад по управлению сейсмическим процессом, – вклад, который существенно превышает непосредственное воздействие горных работ. В режиме сейсмической активизации, таким образом, становится определяющей не интенсивность внешнего воздействия, а автокаталитический процесс разгрузки собственного энергетического потенциала среды.

6-6.3. Системное единство изменений сейсмической активности

Представим себе структуру земной коры как мозаику структурных элементов разной величины, организованных в иерархическое сообщество. Во взгляде на их геологическое развитие на уровне определенного масштабного уровня, например на уровне регионов, можно исходить из принципиально разных допущений.

Можно, например, предполагать, что тектоническая жизнь выделенных структурных единиц полностью самостоятельна и не зависит от того, что происходит в других единицах. Из такого предположения, в частности, исходят в сейсмостатистике, в рамках которой сейсмические события рассматриваются как независимые, а изменения сейсмичности во времени – как чисто случайные осцилляции около некоторого постоянного во времени среднего значения, которое в узко специализированном смысле и называют «сейсмической активностью».

В рамках другого предположения можно исходить из того, что тектоническое поведение сообщества структурных элементов подчинено каким-то общим управляющим воздействиям, на-

пример схождением и расхождением литосферных плит, как это рассматривается в рамках тектоники плит. В этом случае литопластины на уровне регионов могут взаимодействовать между собой весьма сложным образом. Сейчас многочисленны попытки рассмотреть механическую сторону таких взаимодействий созданием моделей, в которых сочетаются методы и подходы, наработанные в механике грунтов, в приложениях метода конечных элементов к механике скальных пород и в мезомеханике. В целом же предполагается, что сообщество элементов воспринимает и передает усилия, возбуждаемые вне рассматриваемого структурного ансамбля, т.е. что оно энергетически пассивно. В рамках этого представления предполагается, что ритм, цикличность изменений, составляющих главнейшую особенность геологического развития, задают соответствующие осцилляции внешних воздействий. Геотектонические построения этого типа, в особенности ориентированные на положения тектоники плит, имеют в настоящем самое широкое распространение.

Наконец, можно предположить, что структурные элементы находятся между собой в системном единстве, а система в целом обладает способностью к саморазвитию, т.е. происходящие в ней процессы выражаются в ее непрерывной структурной перестройке. В духе представлений В.И. Вернадского, такое понимание можно обозначить как «модель автаркии». В этом случае ритм, цикличность в тектонической жизни регионов задаются их геологическим саморазвитием, т.е. представляют собой автоколебания, порождаемые процессами, протекающие непосредственно в структурированном субстрате системы. Такая точка зрения также имеет своих последователей (см., например, [Lukyanov, 1972; Романовский, 1976; Хаин, Гончаров, 2006]), хотя пока широкого распространения и не имеет. По существу она тождественна утверждению, что тектонические (геодинамические) системы обладают собственным энергетическим потенциалом.

На взгляд автора, рассмотренные три модели не являются взаимоисключающими. Правильней, видимо, полагать, что в зависимости от разных методических подходов, в первую очередь от выбора пространственно-временны́х параметров рассмотрения, на передний план в обрисовке особенностей тектонической жизни регионов и их частей будут выступать те или иные стороны их тектонической жизни, которые в преобладающей мере будут соответствовать какой-либо из упомянутых моделей. Но далее мы остановимся только на соответствии наблюдаемых фактов модели автаркии, во-первых, потому, что такой подход сравнительно мало обсуждался, а во-вторых и главным образом, пото-

му, что многие особенности сейсмического режима согласуются именно с этой моделью. Если же исходить из того, что в особенностях проявлений сейсмичности отражается и современная геодинамика, то можно придти к тому, что циклический, периодический характер современных тектонических движений имеет составляющую, которую обеспечивают автоколебания, обусловленные функционированием тектонических систем. Пример такой системы, в возможностях которой обеспечить режим прерывистого скольжения по разломам и цикличность проявлений сейсмичности, был рассмотрен выше.

Основным в построениях геодинамики является представление, согласно с которым геологические тела находятся в системном единстве. В задачи геодинамики входит выяснение закономерностей взаимодействия элементов системы.

Выше, анализируя природу осцилляций сейсмичности, мы ориентировались на закономерности разрушения двухслойных моделей. Уже в простейшем случае – в случае разрушения модели при ее одноосном разрушении – обнаруживаются системные начала процесса разрушения. Они выражаются в существовании положительных и отрицательных обратных связей. Положительная связь выражается в том, что возникновение трещины влечет за собой образование локального минимума в поле потенциальной функции, вследствие чего градиенты поля этой функции в окрестности трещины возрастают и провоцируют образование последующих трещин. Отрицательная связь выражается во временном подавлении развития разрушения в окрестности трещины в процессе ее подготовки, вследствие чего автокаталитический по характеру распад поля потенциальной функции не приобретает лавинообразного развития, ограничиваясь в каждый момент возникновением единичной трещины («эффект турникета»).

Выше отмечалось, что при анализе тонкой пространственно-временно́й структуры сейсмичности на Гармском прогностическом полигоне были выделены области динамической связности (ОДС), характеризующиеся примерно одинаковыми длительными тенденциями в изменениях уровня сейсмического фона на разных участках, входящих в их состав. Та же закономерность была выявлена и в пределах района строительства Рогунской ГЭС, смежного с Гармским [Лукк, Пономарев, 1972].

Границы выделенных областей совпадают с границами геологических структур различной истории их геологического развития. Таким образом, крупные структурные блоки обладают единством тектонических проявлений в разных своих частях и,

казалось бы, автономностью по отношению к тектоническим проявлениям в смежных структурных блоках. Однако в части случаев наблюдалось явление, когда рост активности в одном блоке зеркально сопровождался ее понижением в смежном блоке. Такие явления отрицательной корреляции временных изменений в смежных частях сейсмоактивных регионов были определены нами в свое время как динамические взаимодействия [Пономарев, Тейтельбаум, 1974]. Н.А. Введенская называла это явление «эффектом коромысла».

Противофазные изменения сейсмичности наблюдались не только на уровне ОДС. Постепенно выяснилось, что это весьма общая закономерность динамики сейсмического режима, которая наблюдается на разных масштабных уровнях и тем четче, чем интенсивнее протекает сейсмический процесс. Этому явлению и его возможному механизму мы уделили внимание в главе 4. Здесь же мы остановимся еще на одной группе результатов, полученных Е.В. Архиповой.

Исследование долговременных вариаций сейсмичности регионов Альпийско-Гималайского коллизионного пояса показало, что изменения уровня сейсмической активности в разных регионах и их структурных блоках не являются полностью независимыми. На некоторых из них изменения синхронны, на некоторых же они происходят в противофазе, с весьма высокими коэффициентами корреляции, доходящими до +0,8 в первом случае и до –0,8 во втором [Архипова, 2003, 2004, 2006]. Высокую степень сходства между изменениями уровня сейсмичности Кавказа (временной ряд 1) и Копетдага (временной ряд 2) демонстрирует рис. 6.4.

Можно предположить, что сходство прямых и обратных изменений имеет характер случайных совпадений. Однако это сходство прослеживается не только в общности длительных тенденций, но и в частных осцилляциях, возникающих синхронно в сравниваемых регионах. Вероятность же синхронного появления таких осцилляций очень невелика. Явление, скорее, говорит о том, что изменения действительно имеют согласованный характер, что существует некоторая общая причина возбуждения этих осцилляций.

Каковы возможные причины этой согласованности?

В работе [Проблемы..., 1980] А.В. Лукьянов рассмотрел общие подходы к проблеме неравномерного развития геологических явлений, выраженных в возникновении фаз, циклов или ритмов разной продолжительности. Вопрос о причинах этих явлений он отмечает как один из главных вопросов тектоническо-

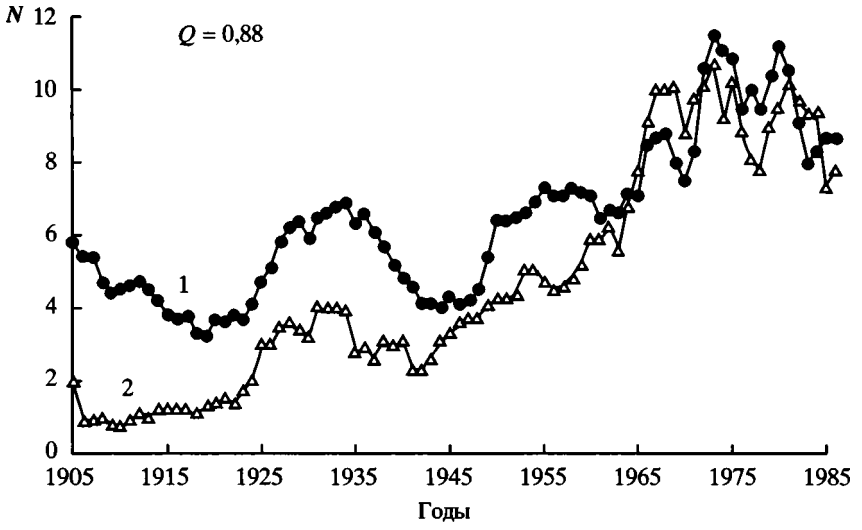


Рис. 6.4. Сравнение изменений уровня сейсмичности Кавказа (1) и Копетдага (2) [Архипова, 2005]

го развития Земли. Причины эти по отношению к системе, в которой формируются ритмы, могут быть внешними либо внутренними. Внешними причинами являются воздействия, оказываемые на систему извне. Если эти воздействия периодичны, то в развитии системы возникает периодичность; однако такая периодичность – наложенная, зародившаяся вне системы и не связанная с ее собственным развитием. Это – вынужденные колебания системы. Внутренние причины – колебания, непосредственно связанные с развитием рассматриваемой системы, обусловленные особенностями ее строения и генерирующиеся в ней самой, т.е. собственные колебания, автоколебания. В данной работе приведен целый ряд колебательных систем, реализующихся в геологической среде.

Возвращаемся к теме согласованных осцилляций.

Можно предположить, что ритм изменений задается неким общим управляющим началом, например ритмичными изменениями величины тектонических напряжений, действующих во всей коллизионной области, или что он обусловлен пульсациями в ротационном режиме планеты. Однако в этом случае требуется объяснить, как одно и то же управляющее начало в своих проявлениях в разных частях объекта, на который оно воздействует, трансформируется в изменения противоположного знака.

Полученная картина логичней согласуется с предположением, что регионы, входящие в коллизионную область, находятся в геодинамическом системном единстве, вследствие чего изменения одного знака в одних частях системы компенсируют изменения противоположного знака в ее других частях, а изменения в системе в целом носят автоколебательный характер.

С одной стороны, автоколебания возможны только за счет собственного потенциала системы. Уже само их появление – свидетельство существования этого потенциала. С другой стороны, сколь бы мы ни углублялись в масштабную иерархию самопроизвольно разрушающихся объектов, противофазные изменения активности этого процесса, выраженные колебательными изменениями признаков, соответствующих этому уровню, можно найти на любом уровне – от крупных геологических регионов до кинетики разрушения верхнего слоя в двухслойной модели. Таким образом, автоколебательный характер изменений, наблюдаемых в огромном масштабном диапазоне разрушающихся объектов, говорит о значительной вероятности того, что они являются выражением самопроизвольного, релаксационного характера протекающих в них процессов разрушения.

Сейсмическая активность в сейсмоактивных регионах в целом и их отдельных частях переменна. В самом общем виде эта особенность может быть обозначена как циклическая смена периодов повышенной сейсмической активности и относительного сейсмического покоя. Периоды повышенной активности имеют характер относительно кратковременных пароксизмов, перемежаемых гораздо более продолжительными периодами покоя. Эта особенность сейсмического режима нашла отражение в концепции «сейсмических циклов», разработанной С.А. Федотовым.

Следует, однако, иметь в виду, что оценка периодов цикличности, в особенности в применении к сейсмичности континентов, зависит от величины площадей, по которым осредняют данные. Так, в работе [Гамбурцев и др., 1991] приведены данные, из которых следует, что в масштабах Средней Азии за время с 1900 г. было три всплеска сейсмической активности: в первом десятилетии, в районе 1948 г. и в 80-е гг. Однако области, в которых возникали большие землетрясения, не перекрывались, так что если ограничить рассмотрение только площадями этих областей, то за период наблюдения в них наблюдалось лишь по одному экстремуму.

Существуют данные, которые говорят о том, что области, находящиеся в фазе относительного сейсмического покоя, реагируют на общее повышение активности в регионе значимым ростом

активности слабых землетрясений сейсмического фона. Однако события с большой энергией в них не происходят.

При этом было выявлено, что в смежных областях динамической связанности изменения сейсмичности могут изменяться в противофазе: повышение уровня фона в одной области сопровождается его понижением в другой. Поскольку в изменениях уровня сейсмичности отражен характер изменения интенсивности тектонических движений, на основании данных о сейсмичности можно судить и об особенностях динамики геолого-структурных единиц земной коры в их системном единстве.

Эту тему мы здесь затронули, чтобы провести одну аналогию: сходная цикличность, лишь в другом масштабе времени, свойственна и проявлениям тектонической активности – относительно кратковременные периоды тектонической активности перемежаются периодами относительного тектонического покоя, гораздо более продолжительными. Притом периоды тектонической активности представлены неперманентной активизацией всех геолого-структурных единиц региона в фазе его повышенной тектонической активности. Изучение тонкой структуры этого процесса показывает, что времена активизации отдельных структурных составляющих между собой могут не совпадать. Они находятся внутри некоторого общего интервала времени, но максимумы их активизации не одновременны. Продолжительность фазы представляет собой суммарную продолжительность экстремальных тектонических событий внутри интервала времени, соответствующего фазе активизации рассматриваемого региона [Леонов, 1976б].

Судя по всему, эта аналогия не является внешней. По-видимому, в этом случае мы имеем дело с трансмасштабной закономерностью, которая инвариантна по отношению к пространственно-временным параметрам осреднения данных и характеризует стиль тектонических движений в его основных существенных чертах.

С другой стороны, на каждом уровне наблюдаются специфические особенности, свойственные только данному уровню. Признаки, маркирующие тектонические движения, как и иные геологические явления, получившие развитие в фазе тектонической активности, на каждом из избранных уровней осреднения данных могут быть различны.

Одной из основных особенностей сейсмического режима являются динамические взаимодействия, которые выражаются в том, что повышение активности в одних регионах или их частях зеркально сопряжено с понижением активности в других регио-

нах или их частях. Имеются основания полагать, что повышение активности скоррелировано с приращением высоты элементов рельефа, а ее понижение – с вертикальными движениями противоположного знака. В этом смысле, например, могут быть интерпретированы изменения уровня Каспия, зеркальные по отношению к изменениям сейсмической активности в пределах Кавказа и Копетдага.

В совокупности такого рода факты приводят к выводу, что пространственно-временные изменения сейсмической активности могут рассматриваться как признак, маркирующий современные тектонические движения. В этом отношении особенности сейсмического режима и их сравнительный анализ могут быть использованы как весьма эффективный инструмент изучения современных геодинамических процессов, открывая этим возможности, недоступные классическим методам геологии.

Исходя из сказанного, вытекает и другая возможность – распространить выявленные геодинамические аспекты на пространственно-временные масштабы, характеризующие основные события формирования лика Земли. Таким путем можно получить более полное представление и о тонкой структуре соответствующих широкомасштабных геодинамических процессов. С этой точки зрения особенности современной геодинамики, выявленные изучением сейсмичности, могут рассматриваться как своего рода модельный шаблон, по которому скроены геодинамические процессы, протекающие уже в измерении длительного геологического времени.

Какие соображения можно привести в пользу такой возможности?

В масштабе длительности геологических эпох и периодов наблюдаются качественно те же черты, которые выявлены и в отношении кратковременных современных процессов, например цикличность фаз орогенеза, перемежаемых относительно длительными периодами относительного тектонического покоя. Причем в этом случае выдерживаются и другие особенности, органично сопряженные с феноменом роста горных сооружений. [Проблемы..., 1980]. В этой же работе отмечается, что существуют необходимые условия, при которых только в массовом количестве происходит образование молассовых континентальных толщ и при которых, следовательно, имеется возможность говорить о контрастном горообразовании: а) расчлененный рельеф, обеспечивающий интенсивный снос обломочного материала; б) большие по площади континентальные массивы, обеспечивающие аккумуляцию в континентальных условиях большой массы

выносимого обломочного материала; в) интенсивное формирование отрицательных структур. Здесь по существу речь идет о противофазных тектонических движениях, сходных в принципе с уже обсуждавшимися выше «динамическими взаимодействиями», свойственными проявлениям современной сейсмичности и тектоники.

Это, в свою очередь, позволяет говорить о том, что в цикличности орогенеза, возможно, проявляются автоколебания данной тектонической системы, мобилизующей при тектонических импульсах собственные энергетические ресурсы, на возобновление которых требуется время, соответствующее периодам относительного тектонического покоя.

Изложенные в этой работе материалы и соображения подводят к тому общему заключению, что в проявлениях тектонической жизни Земли просматривается два принципиально разных стиля поведения геологической среды, вовлекаемой в тектонические процессы. Один из них свойствен среде энергетически активной, энергонасыщенной, другой – среде энергетически пассивной. При этом в разных звеньях системной взаимосвязи геодинамических процессов и на разных стадиях их эволюции, с разной степенью выраженности проявляются оба стиля. Но, как это отмечалось в самом начале этой книги, в настоящем основное русло в исследованиях тектоники земной коры тяготеет к берегу, в свое время четко обозначенном М.М. Тетяевым, который не признавал активности земной коры и рассматривал ее как пассивный субстрат, подверженный действию внешних сил. Становлению такого подхода способствовало то, что породы верхней части земной коры, которая и является основной ареной профессиональной деятельности геологов, обычно энергетически истощены. Энергонасыщенные реликтовые включения здесь, если и встречаются, то сравнительно редко, в порядке исключения. Их индикаторами являются проявления сейсмичности, наведенной техногенными воздействиями. Индикаторами же энергонасыщенного состояния геологической среды на больших глубинах являются проявления природной сейсмичности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе освещено представление об энергонасыщенности геологической среды, согласно которому она рассматривается как энергоноситель и энергетический преобразователь, способный преобразовывать энергию различных видов в энергию упругих деформаций. Геологическая среда обладает свойством длительно сохранять собственный энергетический потенциал и после того, как причины, вызвавшие его появление, уже более не действуют.

Если собственный потенциал достигает некоторого порогового значения, то среда переходит в сильно неравновесное, метастабильное, энергонасыщенное состояние, которое в широком физическом смысле напоминает состояние переохлажденной жидкости или перенасыщенного раствора. При этом физико-механические свойства среды и характер ее механического поведения резко изменяются. В частности, ее разрушение может протекать автокаталитически, принимая форму прогрессирующего разрушения или разрушения, следующего схеме взрыва.

Скорость роста трещин в энергонасыщенной среде может достигать скорости распространения упругих волн. Процесс разрушения в распространенном случае состоит в множественной фрагментации материала. Пусковым импульсом к разрушению могут послужить весьма слабые внешние воздействия. Разрушение может возникнуть самопроизвольно. В любом случае оно осуществляется за счет запасов упругой энергии, накопленной средой.

На те или иные проявления энергонасыщенности геологической среды обращали внимание многие исследователи, начиная с конца XIX в. Однако, в целом, их наблюдения лишены системной основы и в своей большей части имеют разрозненный, описательный характер. В настоящей работе предпринята попытка привести сведения о проявлениях энергонасыщенности в систему. Основания такой системы выработаны в процессе изучения проявлений энергонасыщенности, проводившегося автором на протяжении нескольких десятков лет. Они включают в себя

аналитические обзоры литературных сведений, результаты лабораторного моделирования, результаты, полученные при изучении тонкой структуры сейсмичности, наведенной техногенными воздействиями и природной. В результате был разработан ряд системно связанных частных представлений: *о фиксированных упругих деформациях*, *зонной релаксации*, *хрупком последействии*, *структурном стереотипе зон разгрузки*, *зависимости характера разрушения от вида энергоснабжения*, разрушении, протекающем по *сценарию фрагментации*.

В общих чертах система разработанных представлений сводится к следующим основным положениям.

Элементарными носителями собственного энергетического потенциала энергонасыщенной среды являются упругие деформации, фиксированные структурой тела. Они возникают вследствие несовместных деформаций сопряженных структурных элементов среды, которые могут быть обусловлены действием внешних сил и самыми различными физическими, химическими и иными структурными преобразованиями. Элементарные деформированные образования (*сингулярности*) локальны. Их размеры и размеры областей их влияния определяются масштабным уровнем сопрягающихся структурных элементов.

В «энергетическом» выражении множество сингулярностей предстает как ансамбль автономных источников упругой энергии, дисперсно рассеянных в объеме энергонасыщенной среды. Суммарная энергия, запасенная телом в такой форме, обозначена термином *латентная энергия*. В «силовом» отношении каждая из сингулярностей представляет собой локальную систему напряжений противоположного знака, самоуравновешенных в локальной области несовместного сопряжения структурных элементов. Такие силовые образования обозначены как *латентные напряжения*. Элементарные поля латентных напряжений дискретны и соразмерны областям сопряжения структурных элементов.

Энергонасыщенные системы – это сильно неравновесные системы. Переход системы к равновесию осуществляется в результате ее энергетической разгрузки – самопроизвольно развивающегося процесса релаксации латентной энергии. Этот переход может возникнуть самопроизвольно в процессе энергетически-структурной эволюции системы, но может быть инициирован и внешним воздействием. Процесс начинается не одновременно во всех точках тела (объема). Вначале он локализован в сравнительно узкой зоне разгрузки (*зоне релаксации*) вблизи разгружаемой поверхности, и лишь затем фронт релаксации, постепенно

замедляясь, перемещается в глубину разгружаемого тела. Вследствие этого время релаксации системы зависит от ее размеров, а полная релаксация системы происходит на отрезках времени, продолжительность которых на порядки превосходит оценки времени релаксации, нормативно применяемые в науках о Земле.

Известное в механике деформируемого твердого тела явление упругого последействия в хрупких горных породах сопровождается их разрушением, растрескиванием, структурной дезинтеграцией. Это явление в параллель упругому последействию определено нами как *хрупкое последействие*. Процесс хрупкого последействия, в частности, сосредоточен в зонах разгрузки, вследствие чего геологические тела вблизи поверхностей разгрузки окаймлены оболочками дезинтегрированного материала.

Процесс релаксации имеет макроскопическую структурную выраженность. Одной из ее наиболее распространенных форм является расчленение релаксирующей среды на систему фрагментов. В этом процессе вначале возникают по преимуществу самые крупные трещины, которые и задают структурный план будущей сетки трещин. Каждая вновь возникшая трещина не заканчивается в материале «слепо», а прорастает до выхода на границу отдельности, стремясь к сочленению с ней под прямым углом («закон перпендикулярности»). При этом трещина делит исходную, «материнскую» отдельность примерно пополам («закон параллельности»). В результате в плоском случае образуются полигональные, а в трехмерном – объемные системы трещин отдельности, придающие материалу структуру блоковой делимости.

В случае односторонней разгрузки трещины первых генераций огрубленно повторяют форму поверхности разгрузки и образуют системы трещин, расстояния между которыми убывают по мере удаления от поверхности разгрузки примерно по экспоненте. Трещины последующих генераций расчленяют образовавшиеся породные пластины на отдельные блоки или фрагменты иной формы. Вследствие этого степень раздробленности пород в зоне разгрузки наиболее высока вблизи поверхности разгрузки, где материал переработан трещинами всего спектра их генераций. По мере удаления от зоны интенсивной переработки длина трещин в среднем возрастает, а их ориентировка становится более упорядоченной. Со временем мощность зон дезинтегрированного материала возрастает по схеме «бокового наращивания».

Характер разрушения зависит от вида энергоснабжения элементов разрушаемых систем. Четко различаются по влиянию на характер разрушения два вида энергоснабжения: *зависимое* и *не-*

зависимое. К системам с зависимым энергоснабжением относятся системы с *последовательным энергоснабжением* (одноосное растяжение, изгиб и др.). Именно разрушение систем этого вида использовалось в качестве экспериментальных прототипов ныне общепринятых сценариев разрушения, в том числе и сценариев разрушения геологической среды. К системам с независимым энергоснабжением относятся системы с *параллельным* и *автономным энергоснабжением*. Примером первых являются композитные и двухслойные системы. Энергонасыщенные среды относятся к системам с автономным энергоснабжением. Разрушение подобных систем протекает в соответствии со сценарием фрагментации, который по основным своим особенностям резко, качественно отличается от «классических» сценариев разрушения. По результатам проведенных исследований, именно этот сценарий реализуется в процессе структурной дезинтеграции геологической среды.

Указанный *структурный стереотип* может быть в большей или меньшей мере искажен другими сопутствующими процессами, но он прослеживается в самых различных натурных и техногенных ситуациях на всех масштабных уровнях геологической среды. Системы трещин этого типа возникают при денудации положительных форм рельефа, врезе речных долин, выемке котлованов, вокруг горных выработок и буровых скважин. Они представляют собой своего рода структурную канву, по которой формируются зоны разломов. Тот же структурный стереотип обнаруживается в распределении эпицентров коровых землетрясений – однотипном в регионах с совершенно разным стилем тектоники. Этому стереотипу соответствуют такие общепланетарные явления, как блоковая делимость земной коры и планетарная трещиноватость .

Вместе с тем состояние энергонасыщенности рассматривается как преходящий эпизод в цепи структурно-вещественной эволюции геологической среды, оставляющий по себе своего рода «память» в виде систем «первичной» трещиноватости, дезинтегрированных оболочек массивов пород, раздробленного материала в зонах разрывных нарушений, систем наложенных кинематических связей, управляющих дальнейшими тектоническими трансформациями, и др. В геофизическом отражении эта «память» сохраняется в виде слоев, зон и включений с пониженными скоростями прохождения упругих волн. В своей активной фазе дезинтеграция геологической среды выражается в широком диапазоне различных динамических явлений: от «акустической шумности», «стреляния» и «горных ударов» в шахтах и рудниках до

землетрясений, природных и наведенных различными техногенными воздействиями. В работе намечены предпосылки к созданию качественно новых физических моделей наведенной сейсмичности, сейсмического режима природных землетрясений, процессов, управляющих возможностью подвижек по разломам в поле тектонических сил.

Разработанная концепция энергонасыщенности геологической среды открывает принципиально новую точку зрения на природу сейсмических, тектонических и геодинамических процессов, протекающих в геологической среде. Она дает исследователю новые возможности продуктивного изучения кинетики, динамики и структурной выраженности таких процессов, а также явлений, ими обусловленных.

зависимое. К системам с зависимым энергоснабжением относятся системы с *последовательным энергоснабжением* (одноосное растяжение, изгиб и др.). Именно разрушение систем этого вида использовалось в качестве экспериментальных прототипов ныне общепринятых сценариев разрушения, в том числе и сценариев разрушения геологической среды. К системам с независимым энергоснабжением относятся системы с *параллельным* и *автономным энергоснабжением*. Примером первых являются композитные и двухслойные системы. Энергонасыщенные среды относятся к системам с автономным энергоснабжением. Разрушение подобных систем протекает в соответствии со сценарием фрагментации, который по основным своим особенностям резко, качественно отличается от «классических» сценариев разрушения. По результатам проведенных исследований, именно этот сценарий реализуется в процессе структурной дезинтеграции геологической среды.

Указанный *структурный стереотип* может быть в большей или меньшей мере искажен другими сопутствующими процессами, но он прослеживается в самых различных натурных и техногенных ситуациях на всех масштабных уровнях геологической среды. Системы трещин этого типа возникают при денудации положительных форм рельефа, врезе речных долин, выемке котлованов, вокруг горных выработок и буровых скважин. Они представляют собой своего рода структурную канву, по которой формируются зоны разломов. Тот же структурный стереотип обнаруживается в распределении эпицентров коровых землетрясений – однотипном в регионах с совершенно разным стилем тектоники. Этому стереотипу соответствуют такие общепланетарные явления, как блоковая делимость земной коры и планетарная трещиноватость .

Вместе с тем состояние энергонасыщенности рассматривается как преходящий эпизод в цепи структурно-вещественной эволюции геологической среды, оставляющий по себе своего рода «память» в виде систем «первичной» трещиноватости, дезинтегрированных оболочек массивов пород, раздробленного материала в зонах разрывных нарушений, систем наложенных кинематических связей, управляющих дальнейшими тектоническими трансформациями, и др. В геофизическом отражении эта «память» сохраняется в виде слоев, зон и включений с пониженными скоростями прохождения упругих волн. В своей активной фазе дезинтеграция геологической среды выражается в широком диапазоне различных динамических явлений: от «акустической шумности», «стреляния» и «горных ударов» в шахтах и рудниках до

землетрясений, природных и наведенных различными техногенными воздействиями. В работе намечены предпосылки к созданию качественно новых физических моделей наведенной сейсмичности, сейсмического режима природных землетрясений, процессов, управляющих возможностью подвижек по разломам в поле тектонических сил.

Разработанная концепция энергонасыщенности геологической среды открывает принципиально новую точку зрения на природу сейсмических, тектонических и геодинамических процессов, протекающих в геологической среде. Она дает исследователю новые возможности продуктивного изучения кинетики, динамики и структурной выраженности таких процессов, а также явлений, ими обусловленных.

ЛИТЕРАТУРА

Авершин С.Г. Горные удары. М.: Углетехиздат, 1955. 235 с.

Адушкин В.В., Зецер Ю.И. Перераспределение энергии во внутренней и внешней геосферах при высокоэнергетических воздействиях // Динамические процессы в геосферах: Геофизика сильных возмущений. М.: ИДГ РАН, 1994. С. 10–18.

Адушкин В.В., Спивак А.А., Дубиня М.Г. Сейсмические явления, наведенные подземным ядерным взрывом // Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. С. 199–206.

Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре. М.: ИНЭК, 2005. 250 с.

Ажгирей Г.Д. Структурная геология. М.: Изд-во МГУ, 1956. 493 с.

Айтматов И.Т. Региональный прогноз удароопасных рудных месторождений Средней Азии // Прогноз и предотвращение горных ударов на рудных месторождениях. Апатиты, 1987. С. 34–37.

Айтматов И.Т. Роль остаточных напряжений в горных породах в формировании очагов горных ударов и техногенных землетрясений // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов. М.; Бишкек, 2003. С. 209–221.

Айтматов И.Т., Ахматов В.И., Борщ-Компаниец В.И. и др. Методы и результаты изучения напряженного состояния скальных массивов и создание на их основе эффективных способов управления горным давлением при подземной разработке руд // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1987. № 4. С. 3–32.

Айтматов И.Т., Самородский А.В., Бадаев В.К. Развитие динамических форм разрушения горных пород с увеличением глубины разработки // Безопасность труда в пром-сти. 1978. № 7. С. 34–35.

Александров А.П., Журков С.Н. Явление хрупкого разрыва. Л.; М.: Гостехтеоретиздат, 1933. 52 с. (Пробл. новейшей физики; Вып. 9).

Арефьев С.С. Эпицентральные сейсмологические исследования. М.: Академкнига, 2003. 375 с.

Артемьев М.Е., Голланд В.Э., Ниаури Г.А. Новые данные по изостазии Кавказа // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1985. № 2. С. 3–15.

Архипова Е.В. Закономерности пространственно-временного распределения сейсмичности Анатолии в XX в. // Вулканология и сейсмология. 2003. № 5. С. 73–77.

Архипова Е.В. Корреляция временного хода сейсмичности районов Кавказско-Копетдагского сегмента Альпийского Средиземноморского пояса // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2004. Т. 79. С. 27–32.

Архипова Е.В. Современное развитие Аравийско-Евразиатской коллизионной области как единой сейсмо-геодинамической системы // Области активного тектогенеза в современной и древней истории Земли: (Материалы XXXIX Тектон. совещ.). М.: ГЕОС, 2006. Т. 1. С. 21–24.

Баренблатт Г.И., Ботвина Л.Р. Принципы подобия в механике и физике разрушения // Нелинейная сейсмология: Тез. докл. М., 1986. С. 8.

Безухов Н.И. Теория упругости и пластичности. М.: Гос. изд. технико- теорет. литературы, 1953. 420 с.

Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. М.: Наука, 1984. Ч. I. 596 с.; Ч. II. 431 с.

Белоусов В.В. Основные вопросы геотектоники М.: Госгеолтехиздат, 1962. 380 с.

Белоусов В.В. Структурная геология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 244 с.

Беляев Н.М. Сопротивление материалов. М.: Высш. шк., 1951. 698 с.

Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Физматгиз, 1963. 232 с.

Богданович К.И. Землетрясения в Мессине и Сан Франциско. СПб., 1909. 165 с.

Бриджмен П. Исследования больших пластических деформаций и разрыва. М.: Изд-во иностр. лит., 1955. 448 с.

Броек Д. Основы механики разрушения. М.: Высш. шк., 1980. 367 с.

Брылев В.А. Интенсивность денудации и сохранность реликтов древнего рельефа на юго-востоке Русской равнины // Геоморфология. 1984. № 1. С. 37–44.

Булин Н.К. Современное поле напряжений в верхних горизонтах земной коры // Геотектоника. 1971. № 3. С. 3–15.

Булин Н.К. Некоторые выводы из анализа измерений естественных напряжений в подземных выработках // Напряженное состояние земной коры. М.: Наука, 1973. С. 168–178.

Вернадский В.И. Очерки геохимии. М.: Наука, 1983. 442 с.

Виноградов С.Д. Акустический метод в исследованиях по физике землетрясений. М.: Наука, 1989. 177 с.

Виноградов С.Д., Мирзоев К.М., Саломов Н.Г. Исследования сейсмического режима при разрушении образцов. Душанбе: Дониш, 1975. 115 с.

Виноградов С.Д., Пономарев В.С. Экспериментальное изучение сейсмического режима // Природа. 1999. № 3. С. 77–89.

Винокур Б.Ш. Предотвращение горных ударов на шахтах СУБРа // Безопасность труда промышленности. 1978. № 7. С. 39–41.

Винокур Б.Ш., Русаков А.В., Якушев Г.Ф. Прогноз удароопасности по тектонической трещиноватости // Безопасность труда промышленности. 1983. № 6. С. 55–56.

Витман Ф.Ф. Остаточные напряжения. Л.; М.: Гостехтеоретиздат, 1933. 64 с.

Влияние высоких давлений на вещество. Киев: Наукова думка, 1987. Т. 1. 231 с. Т. 2. 255 с.

Влох Н.П., Сашурин А.Д. Изменение напряжений в массиве крепких горных пород. М.: Недра, 1970. 124 с.

Внутреннее строение Земли. М.: Изд-во иностр. лит., 1949. 321 с.

Володин И.А. Нелинейность и многомасштабность в сейсмоакустике // Проблемы геофизики XXI в. М.: Наука, 2003. Т. 2. С. 5–36.

ЛИТЕРАТУРА

Авершин С.Г. Горные удары. М.: Углетехиздат, 1955. 235 с.

Адушкин В.В., Зецер Ю.И. Перераспределение энергии во внутренней и внешней геосферах при высокоэнергетических воздействиях // Динамические процессы в геосферах: Геофизика сильных возмущений. М.: ИДГ РАН, 1994. С. 10–18.

Адушкин В.В., Спивак А.А., Дубиня М.Г. Сейсмические явления, наведенные подземным ядерным взрывом // Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. С. 199–206.

Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре. М.: ИНЭК, 2005. 250 с.

Ажгирей Г.Д. Структурная геология. М.: Изд-во МГУ, 1956. 493 с.

Айтматов И.Т. Региональный прогноз удароопасных рудных месторождений Средней Азии // Прогноз и предотвращение горных ударов на рудных месторождениях. Апатиты, 1987. С. 34–37.

Айтматов И.Т. Роль остаточных напряжений в горных породах в формировании очагов горных ударов и техногенных землетрясений // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов. М.; Бишкек, 2003. С. 209–221.

Айтматов И.Т., Ахматов В.И., Борщ-Компаниец В.И. и др. Методы и результаты изучения напряженного состояния скальных массивов и создание на их основе эффективных способов управления горным давлением при подземной разработке руд // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1987. № 4. С. 3–32.

Айтматов И.Т., Самородский А.В., Бадаев В.К. Развитие динамических форм разрушения горных пород с увеличением глубины разработки // Безопасность труда в пром-сти. 1978. № 7. С. 34–35.

Александров А.П., Журков С.Н. Явление хрупкого разрыва. Л.; М.: Гостехтеоретиздат, 1933. 52 с. (Пробл. новейшей физики; Вып. 9).

Арефьев С.С. Эпицентральные сейсмологические исследования. М.: Академкнига, 2003. 375 с.

Артемьев М.Е., Голланд В.Э., Ниаури Г.А. Новые данные по изостазии Кавказа // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1985. № 2. С. 3–15.

Архипова Е.В. Закономерности пространственно-временного распределения сейсмичности Анатолии в XX в. // Вулканология и сейсмология. 2003. № 5. С. 73–77.

Архипова Е.В. Корреляция временного хода сейсмичности районов Кавказско-Копетдагского сегмента Альпийского Средиземноморского пояса // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2004. Т. 79. С. 27–32.

Архипова Е.В. Современное развитие Аравийско-Евразиатской коллизионной области как единой сейсмо-геодинамической системы // Области активного тектогенеза в современной и древней истории Земли: (Материалы XXXIX Тектон. совещ.). М.: ГЕОС, 2006. Т. 1. С. 21–24.

Баренблатт Г.И., Ботвина Л.Р. Принципы подобия в механике и физике разрушения // Нелинейная сейсмология: Тез. докл. М., 1986. С. 8.

Безухов Н.И. Теория упругости и пластичности. М.: Гос. изд. технико- теорет. литературы, 1953. 420 с.

Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. М.: Наука, 1984. Ч. I. 596 с.; Ч. II. 431 с.

Белоусов В.В. Основные вопросы геотектоники М.: Госгеолтехиздат, 1962. 380 с.

Белоусов В.В. Структурная геология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 244 с.

Беляев Н.М. Сопротивление материалов. М.: Высш. шк., 1951. 698 с.

Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Физматгиз, 1963. 232 с.

Богданович К.И. Землетрясения в Мессине и Сан Франциско. СПб., 1909. 165 с.

Бриджмен П. Исследования больших пластических деформаций и разрыва. М.: Изд-во иностр. лит., 1955. 448 с.

Броек Д. Основы механики разрушения. М.: Высш. шк., 1980. 367 с.

Брылев В.А. Интенсивность денудации и сохранность реликтов древнего рельефа на юго-востоке Русской равнины // Геоморфология. 1984. № 1. С. 37–44.

Булин Н.К..Современное поле напряжений в верхних горизонтах земной коры // Геотектоника. 1971. № 3. С. 3–15.

Булин Н.К. Некоторые выводы из анализа измерений естественных напряжений в подземных выработках // Напряженное состояние земной коры. М.: Наука, 1973. С. 168–178.

Вернадский В.И. Очерки геохимии. М.: Наука, 1983. 442 с.

Виноградов С.Д. Акустический метод в исследованиях по физике землетрясений. М.: Наука, 1989. 177 с.

Виноградов С.Д., Мирзоев К.М., Саломов Н.Г. Исследования сейсмического режима при разрушении образцов. Душанбе: Дониш, 1975. 115 с.

Виноградов С.Д., Пономарев В.С. Экспериментальное изучение сейсмического режима // Природа. 1999. № 3. С. 77–89.

Винокур Б.Ш. Предотвращение горных ударов на шахтах СУБРа // Безопасность труда промышленности. 1978. № 7. С. 39–41.

Винокур Б.Ш., Русаков А.В., Якушев Г.Ф. Прогноз удароопасности по тектонической трещиноватости // Безопасность труда промышленности. 1983. № 6. С. 55–56.

Витман Ф.Ф. Остаточные напряжения. Л.; М.: Гостехтеоретиздат, 1933. 64 с.

Влияние высоких давлений на вещество. Киев: Наукова думка, 1987. Т. 1. 231 с. Т. 2. 255 с.

Влох Н.П., Сашурин А.Д. Изменение напряжений в массиве крепких горных пород. М.: Недра, 1970. 124 с.

Внутреннее строение Земли. М.: Изд-во иностр. лит., 1949. 321 с.

Володин И.А. Нелинейность и многомасштабность в сейсмоакустике // Проблемы геофизики XXI в. М.: Наука, 2003. Т. 2. С. 5–36.

Гаврилов В.П., Григорьянц Б.В., Дворецкий П.И. и др. Зоны нефтегазонакопления жильного типа. М.: Недра, 2000. 152 с.

Галин Л.А., Рябов В.А., Федосеев Д.В., Черепанов Г.П. О разрушении высокопрочного стекла // Докл. АН СССР. 1966. Т. 169, № 5. С. 1034–1036.

Гамбурцев А.Г., Долбилкина Н.А., Кулагина М.В. и др. Общие свойства временных вариаций по данным разномасштабного сейсмического мониторинга в Средней Азии // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 9. С. 73–81.

Геологические тела. М.: Недра, 1986. 334 с.

Геологический словарь. М.: Недра, 1978. Т. 1. 486 с.; Т. 2. 456 с.

Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 526 с.

Глико А.О., Соболев С.В. Фазовые превращения вещества и вертикальные движения при конвективном утонении континентальной литосферы // Докл. АН СССР. 1986. Т. 289, № 2. С. 318–322.

Гогель Ж. Основы тектоники. М.: Мир, 1969. 440 с.

Гольдин С.В. Деструкция литосферы и физическая мезомеханика // Физ. мезомеханика. 2002. Т. 5, № 5. С. 5–22.

Гончаров М.А. Статистические закономерности распределения трещин вдоль слоя и их тектонофизическая интерпретация // Вопросы геономии. М.: Изд-во МГУ, 1972. С. 120–129.

Гончаров М.А. Инверсия плотности в земной коре и и складкообразование. М.: Недра, 1979. 246 с.

Гончаров М.А., Талицкий В.Г. Зарождаются ли «трещины скалывания» путем скалывания? // Вестн. МГУ. Сер. 4, Геология. 1998. № 3. С. 18–22.

Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С. Введение в тектонофизику. М.: Университет, 2005. 496 с.

Горбунова И.В., Кальметьева З.А. Экспериментальные характеристики очагов слабых землетрясений. Фрунзе: Илим, 1988. 129 с.

Горев Е.С., Микулин Е.И. Решение проблемы борьбы с горными ударами на шахтах СУБРа // Прогноз и предотвращение горных ударов. Фрунзе: Илим, 1979. С. 6–25.

Горяинов П.М., Давиденко И.В. Тектоно-кессонный эффект в массивах горных пород и рудных месторождений – важнейшее явление геодинамики // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247, № 5. С. 1212–1214.

Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

Гуревич Г.И. Деформируемость сред и распространение сейсмических волн. М.: Наука, 1974. 530 с.

Гуфельд И.Л., Гусев Г.А., Лютиков Р.А., Матвеева М.И. Радиационная модель сейсмического процесса: (Новый взгляд на физику сильных землетрясений) // Развитие методов и средств экспериментальной геофизики. М., 1996. Вып. 2. С. 39–64.

Дарков А.В., Шапиро Г.С. Сопротивление материалов. М.: Высш. шк., 1969. 425 с.

Дашко Р.Э. Механика горных пород. М.: Недра, 1987. 264 с.

Джеффрис Г. Земля, ее происхождение, история и строение. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 486с.

Дмитриев А.П., Новик Г.Я., Зильбершмидт М.Г. Результаты исследования механизма измерения физических свойств горных пород при РТ-воздействии // Физические свойства горных пород при высоких давлениях

и температуре для задач сейсмологии: Материалы 6-го Всесоюз. совещ. Ташкент, 1981. С. 20–21.

Дорошенко В.И., Поздин В.И., Корякин Н.М. К разработке критериев оценки удароопасности на шахтах СУБРа // Прогноз и предотвращение горных ударов. Фрунзе: Илим, 1986. С. 119–124.

Достовалов Б.Н. О соотношении основных физических и геологических процессов в развитии земной коры // Общие закономерности геологических явлений. Л.: ВСЕГЕИ, 1965а. С. 91–95.

Достовалов Б.Н. Внутренние (объемно-градиентные) напряжения и деформации в земной коре и образование полигональных систем разломов и поднятий // Там же. 1965б. С. 96–100.

Достовалов Б.Н., Кудрявцев В.А. Общее мерзлотоведение. М.: Изд-во МГУ, 1967. 156 с.

Дэй У.А. Термодинамика простых сред с памятью. М.: Мир, 1974. 190 с.

Ефремов Г.Д. Причины образования внезапных выбросов породы в выработках глубоких шахт // Уголь Украины. 1967. № 2. С. 41–43.

Ефремов Г.Д. Причины образования кернов в дисках скважин // Уголь Украины. 1970. № 11. С. 15–16.

Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестн. АН СССР.1968. № 3. С. 46.

Забигайло В.Е., Белый И.С. Геологические факторы разрушения керна при бурении напряженных горных пород Донбасса. Киев: Наук. думка,1981. 177 с.

Захаров С.А. Вопросы складкообразования и некоторые аспекты нефтегазоносности юго-западного Таджикистана // Вопросы геологического строения и перспективы нефтегазоносности Таджикистана. Душанбе: Ирфон, 1965. С. 8–27.

Захаров С.А. Генезис покровной складчатости. Душанбе: Дониш, 1979. 167 с.

Земля: Введение в общую геологию. М.: Мир, 1974. 839 с.

Зимов С.А. Два типа полигональных разрывных образований на поверхности Земли. Владивосток: Тихоокеан. ин-т географии ДВЦ АН СССР, 1986. 11 с. Деп. в ВИНИТИ 07.08.86, № 5621 В.

Зимов С.А. Азбука рисунков природы. М.: Наука, 1993. 125 с.

Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. М.: Изд-во МГУ, 1987. 287 с.

Кадашевич Ю.И., Новожилов В.В. Об учете микронапряжений при расчетах пластичности и ползучести металлов // 5-й Всесоюз. съезд по теорет. и прикл. механике. Алма-Ата, 1981. С. 176.

Калакуцкий Н.В. Исследования внутренних напряжений в чугуне и стали. СПб., 1887. 135 с.

Калинин Н.И., Кузин И.Г. Возбужденная сейсмичность, условия и возможный механизм возникновения плотинных землетрясений // Гидротехн. стр-во. 1982. № 6. С. 12–16.

Кальметьева З.А. О подобии излучения очагов сильных и слабых землетрясений // Сейсмичность Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1989. С. 71–83.

Камалетдинов М.А., Казанцева Т.Т. Происхождение складчатости. М.: Наука, 1981. 134 с.

Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.

Каток А.П. Повторные толчки, их влияние на параметры сейсмического режима // Динамика земной коры. М.: Наука, 1965.

Кацауров И.Н. Горное давление в вертикальных стволах. М.: Госгеолтехиздат, 1961. 112 с.

Кириллова И.В. Увеличение объема горных пород – одна из возможных причин тектонических деформаций // Изв. АН СССР. Сер геол. 1963. № 1. С. 93–101.

Киссин И.Г. Современный флюидный режим консолидированной земной коры континентов и его геофизические индикаторы // Флюидные потоки в земной коре и верхней мантии. М.: РАН, 2002. С. 57–62.

Комар А. // Журн. техн. физики. 1932. Т. 2, вып. 6. С. 519; Вып. 7/8. С. 671.

Кондратьев В.Н., Кулюкин А.М., Пономарев В.С. и др. Исследование двухслойной модели земной коры при двухосном растяжении нижнего слоя // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1985. № 3. С. 17–28.

Константинова А.Г. Временное изменение шумности при разрушении угольных пластов // Там же. 1967. № 10. С. 38–46.

Конторович И.Е., Лившиц Л.С. Остаточные напряжения в стали. М.: Оборонгиз, 1943. 121 с.

Копп М.Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. М.: Наука, 2004. 340 с.

Корявов В.П., Кузнецов В.М., Куликов В.И., Лившиц Л.Д. Взрыв в предварительно напряженной среде // Физические свойства горных пород при высоких давлениях и температурах для задач сейсмологии: Материалы 6-го Всесоюз. совещ. Ташкент, 1981. С. 57–58.

Кравцов А.И. Основы геологии горючих ископаемых. М.: Высш. шк., 1982. 424 с.

Краснопевцева Г.В. Промежуточный слой земной коры территории СССР по данным региональных сейсмических исследований // Геодинамические исследования. М., 1988. № 12. С. 49–60.

Кренер Э. Общая континуальная теория дислокаций и собственных напряжений. М.: Мир, 1965. 103 с.

Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. Ч. I. Термодинамика и общая кинетическая теория. М.: Мир, 1978. 806 с.

Кропоткин П.Н. Тектонические напряжения в земной коре по данным непосредственных измерений // Напряженное состояние земной коры. М.: Наука, 1973. С. 21–31.

Кропоткин П.Н., Валяев Б.М. О природе аномально высоких пластовых давлений в нефтяных и газовых месторождениях // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1965. № 11. С. 29–46.

Кропоткин П.Н., Валяев Б.М. Дегазация Земли и геотектоника // Дегазация Земли и геотектоника. М.: Наука, 1976. С. 3–11.

Кулюкин А.М., Пономарев В.С., Ромашов А.Н. Некоторые закономерности разрушения в двухслойной модели // Прогноз землетрясений. Душанбе; М.: Дониш, 1983а. № 4. С. 200–210.

Кулюкин А.М., Пономарев В.С., Ромашов А.Н. Сейсмичность как процесс дробления // Там же. 1983б. № 4. С. 211–219.

Кулюкин А.М., Пономарев В.С., Ромашов А.Н. Особенности разрушения блока материала двухслойной модели // Математические и экспериментальные методы в дизъюнктивной тектонике. М., 1986. С. 12–21.

Кулюкин А.М., Пономарев В.С., Ромашов А.Н. Связь между статистиками, отражающими делимость твердых сред // Докл. АН СССР. 1987. Т. 293, № 5. С. 1089–1092.

Кулюкин А.М., Пономарев В.С., Ромашов А.Н. Модельные исследования кинетики разрушения двухслойных систем // Деформирование и разрушение горных пород. Бишкек: Илим, 1990. С. 189–196.

Курдюмов А.В., Дегтярева В.Ф., Понятовский Е.Г. и др. Влияние высоких давлений на вещество. Киев: Наук. думка, 1987. Т. 1. 231 с.; Т. 2. 255 с.

Кутепов В.М. Закономерности в распределении естественных напряжений в массивах скальных трещиноватых пород склонов речных долин // Напряженное состояние земной коры. М.: Наука, 1973. С. 35–147.

Кучай В.К. Потенциальная энергия деформации объема и условия возникновения сильных землетрясений Киргизии // Тр. III Всесоюз. симпоз. по сейсмич. режиму. Новосибирск, 1969. Ч. 1. С. 57–69.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 1976. 520 с.

Ланцош К. Вариационные принципы механики. М.: Мир, 1965. 408 с.

Леонов М.Я., Витивицкий П.М., Ярема С.Я. Полосы пластичности при растяжении пластин с трещиновидным концентратором // Докл. АН СССР. 1963. Т. 148, № 143. С. 905–908.

Леонов Ю.Г. Новейшая активизация и альпийский орогенез // Геотектоника. 1972. № 2. С. 3–14.

Леонов Ю.Г. О некоторых тектонических предпосылках корреляции тектонических движений // Там же. 1976а. № 6. С. 3–14.

Леонов Ю.Г. Тектоническая природа девонского орогенеза. М.: Недра, 1976б.

Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992. 231 с.

Ливщиц Л.Д., Прищепов В.Ф. Микронапряжения в поликристаллах анизотропных веществ под гидростатическим давлением // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 6. С. 9–31.

Лобацкая Р.М. О некоторых количественных характеристиках разломов в связи с особенностями их структурной организации // Изд. вузов. Геология и разведка. 1987. № 10. С. 3–12.

Лукк А.А., Пономарев В.С. Тенденции изменения сейсмического фона во времени // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1972. № 5. С. 3–11.

Лукьянов А.В. Нелинейные эффекты в моделях структурообразования // Проблемы геодинамики литосферы. М.: Наука, 1999. С. 253–287. (Тр. ГИН; Вып. 511).

Лукьянов А.В. Некоторые особенности современной тектонофизики // Тектонофизика сегодня: (К юбилею М.В. Гзовского). М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 22–46.

Макаров В.И., Щукин Ю.К. Оценка активности скрытых разломов // Геотектоника. 1979. № 1. С. 96–109.

Маккавеев Н.И. Образование глобального пенеплена // Основные направления развития геоморфологической теории. Новосибирск, 1982. С. 88–91.

Макклинток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. М.: Мир, 1970. 442 с.

Марков Г.А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л.: Наука, 1977. 213 с.

Марков Г.А. О распространении горизонтальных тектонических напряжений вблизи поверхности в зонах поднятия земной коры // Инж. геология. 1980. № 1. С. 20–29.

Марков Г.А. Напряженное состояние массивов горных пород, проблемы горного давления и значение учета физико-химических процессов // Физико- химическая механика и лиофильность дисперсных систем. Киев: Наук. думка, 1981. Вып. 13. С. 73–77.

Микулин И.Е. Прогнозирование горных ударов на СУБРе на основе механического состояния горных пород в массиве // Физические свойства пород в массиве. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1982. С. 63–67.

Михайлов А.Е. Основы структурной геологии и геологического картирования. М.: Госгеолтехиздат, 1958. 352 с.

Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.

Моделирование процессов деформирования и разрушения верхних слоев Земли. М.: ИФЗ АН СССР. 1985. 150 с.

Морозов А.Н. Водород и азот в стали. М.: Металлургиздат, 1950. 175 с.

Морозов Е.М., Фридман Я.Б. Траектории трещин хрупкого разрушения как геодезические линии на поверхности тела // Докл. АН СССР. 1961. Т. 139, № 1. С. 87–90.

Мюллер Л. Инженерная геология. М.: Мир, 1971. 255 с.

Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясений. М.: Наука, 1975. С. 3–17.

Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Т. 2. М.: Мир, 1969. 864 с.

Напряженное состояние земной коры. М.: Наука, 1973. 178 с.

Напряженное состояние породных массивов. Новосибирск, 1978. 146 с.

Неизвестнов Я.В. Глобальная взаимосвязь экзогенных и эндогенных процессов // Сергеевские чтения. М.: ГЕОС, 2000. Вып. 2. С. 97–102.

Нерсесов И.Л., Пономарев В.С., Кучай В.К. Особенности пространственного распределения сейсмического фона // Поиски предвестников землетрясений на прогностических полигонах. М.: Наука, 1974. С. 119–131.

Нерсесов И.Л., Пономарев В.С., Тейтельбаум Ю.М. Эффект сейсмического затишья при больших землетрясениях // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 149–168.

Нерсесов И.Л., Пономарев В.С., Тейтельбаум Ю.М. Вариации активности коровых землетрясений в различных слоях глубины и сейсмический прогноз // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247, № 5. С. 1100–1102.

Нерсесов И.Л., Тейтельбаум Ю.М., Пономарев В.С. Предваряющая активизация слабой сейсмичности как предиктор сильных землетрясений // Там же. 1979. Т. 249, № 6. С. 1335–1338.

Несмеянов С.А. Инженерная геотектоника. М.: Наука, 2004. 779 с.

Николаев А.В. Развитие нетрадиционных методов в геофизике// Физические основы сейсмического метода. М.: Наука, 1991. С. 5–17.

Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности // Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. С. 5–15.

Николаев А.В. Черты геофизики XXI в. // Проблемы геофизики XXI в. М.: Наука, 2003. С. 7–16.

Николаев А.В., Верещагина Г.М. Об инициировании землетрясений землетрясениями // Докл. АН СССР. 1991. Т. 318, № 2. С. 320–324.

Николаев А.В., Верещагина Г.М. Тонкая структура сейсмичности Средиземноморья и Центральной Европы // Докл. РАН. 1993. Т. 332, № 5. С. 93–96.

Николаев П.Н. Системный анализ тектонических напряжений и деформаций // Изв. вузов. Геология и разведка. 1978. № 5. С. 106–116.

Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 506 с.

Ольшак В., Мруз З., Пежина П. Современное состояние теории пластичности. М.: Мир, 1964. 240 с.

Остаточные напряжения в металлах и металлических конструкциях. М.: Изд-во иностр. лит., 1957. 380 с.

Павлова Н.Н. Трещиноватость и разрушение горных пород. М.: Наука, 1970. 95 с.

Панин В.Е. Основы физической мезомеханики // Физ. мезомеханика. 1998. Т. 1, № 1. С. 5–22.

Панюков П.Н. Инженерная геология. М.: Недра, 1978. 296 с.

Пасечник И.П. Землетрясения, инициированные подземными ядерными взрывами // Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим. М.: Наука, 1977. С. 142–152.

Певнев А.К. Пути к практическому прогнозу землетрясений. М.: ГЕОС, 2003. 152 с.

Пейве А.В. Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1961. № 3. С. 36–54.

Пейве А.В. Геология сегодня и завтра // Природа. 1981. № 8. С. 2–9.

Петухов И.М. Горные удары на угольных шахтах. М.: Недра, 1972. 221 с.

Петухов И.М. Некоторые решения проблемы горных ударов при разработке рудных и нерудных месторождений // Прогноз и предотвращение горных ударов на рудных месторождениях. Апатиты, 1987. С. 10–16.

Петухов И.М., Литвин В.А., Кучерский Л.В. и др. Горные удары и борьба с ними. Пермь, 1969. 397 с.

Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: Теория и приложения. М.: Наука, 1982. 110 с.

Пономарев В.С. О природе сил, действующих в очаге землетрясения // Сейсмический режим. Душанбе: Дониш, 1969а. С. 122–136.

Пономарев В.С. Потенциальная энергия гидростатического сжатия горных пород и сейсмичность // Тр. Третьего Всесоюз. симпоз. по сейсм. режиму. Новосибирск: Наука, 1969б. Ч. 1. С. 30–55.

Пономарев В.С. Упругая энергия горных пород и сейсмичность // Экспериментальная сейсмология. М.: Наука, 1971. С. 75–86.

Пономарев В.С. Зонная релаксация напряжений при разгрузке массивов горных пород // Докл. АН СССР. 1981. Т. 259, № 6. С. 1337–1339.

Пономарев В.С. Процесс релаксации напряжений в горных поодах // Природа. 1985. № 5. С. 53–61.

Пономарев В.С. Особенности напряженного состояния неравновесной геофизической среды // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1987а. № 4. С. 87–94.

Марков Г.А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л.: Наука, 1977. 213 с.

Марков Г.А. О распространении горизонтальных тектонических напряжений вблизи поверхности в зонах поднятия земной коры // Инж. геология. 1980. № 1. С. 20–29.

Марков Г.А. Напряженное состояние массивов горных пород, проблемы горного давления и значение учета физико-химических процессов // Физико- химическая механика и лиофильность дисперсных систем. Киев: Наук. думка, 1981. Вып. 13. С. 73–77.

Микулин И.Е. Прогнозирование горных ударов на СУБРе на основе механического состояния горных пород в массиве // Физические свойства пород в массиве. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1982. С. 63–67.

Михайлов А.Е. Основы структурной геологии и геологического картирования. М.: Госгеолтехиздат, 1958. 352 с.

Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.

Моделирование процессов деформирования и разрушения верхних слоев Земли. М.: ИФЗ АН СССР. 1985. 150 с.

Морозов А.Н. Водород и азот в стали. М.: Металлургиздат, 1950. 175 с.

Морозов Е.М., Фридман Я.Б. Траектории трещин хрупкого разрушения как геодезические линии на поверхности тела // Докл. АН СССР. 1961. Т. 139, № 1. С. 87–90.

Мюллер Л. Инженерная геология. М.: Мир, 1971. 255 с.

Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясений. М.: Наука, 1975. С. 3–17.

Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Т. 2. М.: Мир, 1969. 864 с.

Напряженное состояние земной коры. М.: Наука, 1973. 178 с.

Напряженное состояние породных массивов. Новосибирск, 1978. 146 с.

Неизвестнов Я.В. Глобальная взаимосвязь экзогенных и эндогенных процессов // Сергеевские чтения. М.: ГЕОС, 2000. Вып. 2. С. 97–102.

Нерсесов И.Л., Пономарев В.С., Кучай В.К. Особенности пространственного распределения сейсмического фона // Поиски предвестников землетрясений на прогностических полигонах. М.: Наука, 1974. С. 119–131.

Нерсесов И.Л., Пономарев В.С., Тейтельбаум Ю.М. Эффект сейсмического затишья при больших землетрясениях // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 149–168.

Нерсесов И.Л., Пономарев В.С., Тейтельбаум Ю.М. Вариации активности коровых землетрясений в различных слоях глубины и сейсмический прогноз // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247, № 5. С. 1100–1102.

Нерсесов И.Л., Тейтельбаум Ю.М., Пономарев В.С. Предваряющая активизация слабой сейсмичности как предиктор сильных землетрясений // Там же. 1979. Т. 249, № 6. С. 1335–1338.

Несмеянов С.А. Инженерная геотектоника. М.: Наука, 2004. 779 с.

Николаев А.В. Развитие нетрадиционных методов в геофизике// Физические основы сейсмического метода. М.: Наука, 1991. С. 5–17.

Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности // Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. С. 5–15.

Николаев А.В. Черты геофизики XXI в. // Проблемы геофизики XXI в. М.: Наука, 2003. С. 7–16.

Николаев А.В., Верещагина Г.М. Об инициировании землетрясений землетрясениями // Докл. АН СССР. 1991. Т. 318, № 2. С. 320–324.

Николаев А.В., Верещагина Г.М. Тонкая структура сейсмичности Средиземноморья и Центральной Европы // Докл. РАН. 1993. Т. 332, № 5. С. 93–96.

Николаев П.Н. Системный анализ тектонических напряжений и деформаций // Изв. вузов. Геология и разведка. 1978. № 5. С. 106–116.

Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 506 с.

Ольшак В., Мруз З., Пежина П. Современное состояние теории пластичности. М.: Мир, 1964. 240 с.

Остаточные напряжения в металлах и металлических конструкциях. М.: Изд-во иностр. лит., 1957. 380 с.

Павлова Н.Н. Трещиноватость и разрушение горных пород. М.: Наука, 1970. 95 с.

Панин В.Е. Основы физической мезомеханики // Физ. мезомеханика. 1998. Т. 1, № 1. С. 5–22.

Панюков П.Н. Инженерная геология. М.: Недра, 1978. 296 с.

Пасечник И.П. Землетрясения, инициированные подземными ядерными взрывами // Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим. М.: Наука, 1977. С. 142–152.

Певнев А.К. Пути к практическому прогнозу землетрясений. М.: ГЕОС, 2003. 152 с.

Пейве А.В. Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1961. № 3. С. 36–54.

Пейве А.В. Геология сегодня и завтра // Природа. 1981. № 8. С. 2–9.

Петухов И.М. Горные удары на угольных шахтах. М.: Недра, 1972. 221 с.

Петухов И.М. Некоторые решения проблемы горных ударов при разработке рудных и нерудных месторождений // Прогноз и предотвращение горных ударов на рудных месторождениях. Апатиты, 1987. С. 10–16.

Петухов И.М., Литвин В.А., Кучерский Л.В. и др. Горные удары и борьба с ними. Пермь, 1969. 397 с.

Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: Теория и приложения. М.: Наука, 1982. 110 с.

Пономарев В.С. О природе сил, действующих в очаге землетрясения // Сейсмический режим. Душанбе: Дониш, 1969а. С. 122–136.

Пономарев В.С. Потенциальная энергия гидростатического сжатия горных пород и сейсмичность // Тр. Третьего Всесоюз. симпоз. по сейсм. режиму. Новосибирск: Наука, 1969б. Ч. 1. С. 30–55.

Пономарев В.С. Упругая энергия горных пород и сейсмичность // Экспериментальная сейсмология. М.: Наука, 1971. С. 75–86.

Пономарев В.С. Зонная релаксация напряжений при разгрузке массивов горных пород // Докл. АН СССР. 1981. Т. 259, № 6. С. 1337–1339.

Пономарев В.С. Процесс релаксации напряжений в горных поодах // Природа. 1985. № 5. С. 53–61.

Пономарев В.С. Особенности напряженного состояния неравновесной геофизической среды // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1987а. № 4. С. 87–94.

Пономарев В.С. Горные породы как среды с собственными источниками упругой энергии // Проблемы нелинейной сейсмики. М.: Наука, 1987б. С. 51–64.

Пономарев В.С. Структуры самопроизвольного разрушения в горных породах // Изучение тектонических деформаций. М.: ГИН АН СССР, 1987в. С. 117–136.

Пономарев В.С. Структуры самопроизвольного разрушения в горных породах // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987г. С. 46–57.

Пономарев В.С. Структурные напряжения и блоковая делимость земной коры, наблюдаемые на космических снимках // Аэрокосмическое изучение современных и новейших тектонических процессов. М.: Наука, 1988. С. 57–63.

Пономарев В.С. Излучение Солнца и тектоника Земли // Земля и Вселенная. 1990. № 4. С. 85–89.

Пономарев В.С. Кинетика разрушения двухслойных систем и сейсмичность // Комплексные исследования по прогнозу землетрясений. М.: Наука, 1991а. С. 5–11.

Пономарев В.С. Путь парадоксов // Природа. 1991б. № 10. С.72–81.

Пономарев В.С. Принцип активности геологической среды // Синергетика геологических систем: Тез. докл. Иркутск: СО РАН, 1992а. С. 29.

Пономарев В.С. Самоорганизация геологического вещества в процессе изостатической компенсации // Синергетика геологических систем: Тез. докл. Иркутск: СО РАН, 1992б. С. 29.

Пономарев В.С. Денудация и сейсмичность земной коры // Докл. РАН. 2007. Т. 412, № 2. С. 223–225.

Пономарев В.С., Ромашов А.Н. Зонная релаксация напряжений и ее значение для тектоники // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1986а. Т 1, вып. 2. С. 64–74.

Пономарев В.С., Ромашов А.Н. Модельные исследования процесса зонной релаксации // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986б. № 5. С. 24–33.

Пономарев В.С., Ромашов А.Н. Структурная эволюция естественных двухслойных систем и ее неотектонические аспекты // Современная геодинамика и глубинное строение территории СССР. М.: Наука, 1990. С. 16–25.

Пономарев В.С., Ромашов А.Н. Моделирование блоковой структуры земной коры // Природа. 1994. № 5. С. 94–87.

Пономарев В.С., Ромашов А.Н., Сухотин А.П., Цыганков С.С. Особенности разрушения двухслойных моделей при моделировании геологических процессов // Геология и геофизика. 1995. Т. 36, № 4. С. 116–121.

Пономарев В.С., Ромашов А.Н., Турунтаев С.Б. Закономерности разрушения энергонасыщенных сред в проявлениях наведенной сейсмичности // Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. С. 73–91.

Пономарев В.С., Стрижков С.А., Терентьев В.А. Исследования акустической эмиссии образцов горных пород в условиях разгрузки // Докл. АН СССР. 1991. Т. 317, № 5. С. 1112–1115.

Пономарев В.С., Тейтельбаум Ю.М. Динамические взаимодействия между очагами землетрясений // Региональные исследования сейсмического режима. Кишинев: Штиинца, 1974. С. 79–92.

Пономарев В.С., Тейтельбаум Ю.М. Особенности строения тектоносферы, связанные с процессом восстановления изостазии, и сейсмичность // Результаты комплексных геофизических исследований в сейсмоопасных зонах. М.: Наука, 1978. С. 181–198.

Пономарев В.С., Тейтельбаум Ю.М., Третьякова Н.В. Особенности пространственного распределения сейсмичности в местах возникновения больших землетрясений // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 169–183.

Пономарев В.С., Трифонов В.Г. Факторы тектогенеза // Актуальные проблемы тектоники океанов и континентов. М.: Наука, 1987. С. 81–84.

Пономарев В.С., Трифонов В.Г. Тектонические системы // Природа. 1989. № 7. С. 62–71.

Пономарев В.С., Турунтаев С.Б., Воинов А.К. и др. Исследование режима возбужденной сейсмичности на шахтах СУБРа // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1992. № 4. С. 15–22.

Попов А.Л., Чернышев Г.Н. Влияние остаточных напряжений и внутреннего трения на поверхностные волны // Тр. Всесоюз. симпоз. по остаточ. напряжениям и методам регулирования. М., 1982. С. 342–347.

Потак Я.М. Хрупкие разрушения стали и стальных конструкций. М.: Оборонгиз, 1955. 180 с.

Пригожин И. От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985. 327 с.

Проблемы глобальной корреляции геологических явлений. М.: Наука, 1980. 220 с.

Прозоров А.Г. Удаленные афтершоки – предвестники землетрясений в Южной Калифорнии // Вычислительная сейсмология. М.: Наука, 1982. Вып. 14. С. 20–26.

Прочухан Д.П. Трещины разгрузки в скальных основаниях высоких плотин // Сов. геология. 1964. № 7. С. 76–83.

Пух В.П. Прочность и разрушение стекла. Л.: Наука, 1973. 153 с.

Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.

Развитие идей Г.А.Гамбурцева в геофизике. М.: Наука, 1982. 320 с.

Райс Дж. Механика очага землетрясения. М.: Мир, 1982. 217 с.

Редклифф С.В. Влияние гидростатического давления на дефекты структуры и свойства // Механические свойства материалов под высоким давлением. М.: Мир, 1973. Вып. 1, гл. 5.

Резанов И.А. История геотектонических идей. М.: Наука, 1987. 254 с.

Рейнер М. Реология. М.: Наука,1965. 223 с.

Рейф Ф. Статистическая физика. М.: Наука, 1977. 351 с.

Ривз Т.И., Пети Ж-П., Ронзли К.Д., Разак М. Расстояние между трещинами отдельностей // Механика горных пород. М.: Мир, 1994. С. 328–344.

Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408с.

Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 338 с.

Ритман А. Вулканы и их деятельность. М.: Мир, 1964. 450 с.

Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. М.: Недра, 1986. 300 с.

Романовский О.И. Динамика формирования флиша. Л.: Недра, 1976. 205 с.

Ромашов А.Н. Планета Земля. М.: УРСС, 2003. 261 с.

Руппенейт К.В., Либерман Ю.М. Введение в механику горных пород. М.: Госгеолтехиздат, 1960. 356 с.

Русинов В.Л. Флюидные потоки в рудообразующих системах // Флюидные потоки в земной коре и мантии. М.: РАН, 2002. С. 77–83.

Садовский М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 1999. 535 с.

Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука,1987. 100 с.

Садовский М.А., Денщиков В.А., Кондратьев В.Н. и др. О модели верхних слоев земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 9. С. 3–9.

Сазонов А.В., Монахов А.Л. Динамические явления при образовании воронки обрушения // Всесоюзная научная школа «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках»: Тез. докл. Симферополь, 1987. С. 106–107.

Салов Б.Г., Потужак З., Ирисова Е.Л., Соболев Г.А. Предвестники в акустической эмиссии разрушения барьера сдвигом // Экспериментальные и численные методы в физике очага землетрясения. М.: Наука, 1989. С. 221–226.

Сальников Д.И., Траскин В.Ю. Основные представления физико-химической геомеханики // Изучение тектонических деформаций. М.: ГИН, 1987. С. 33–83.

Сейдж Б.Х. Термодинамика многокомпонентных систем. М.: Мир,1962. 303 с.

Ситтер Л.У. де. Структурная геология. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 471 с.

Слесарев В.Д. Механика горных пород и рудничное крепление. М.: Углетехиздат, 1948. 303 с.

Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическим деформациям. М.: Машгиз, 1949. 350 с.

Смирнов Б.П., Ярошевич В.Д. Современное представление о зарождении трещин // Физическая природа хрупкого разрушения. Киев: Наук. думка, 1965. С. 6–21.

Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 314 с.

Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия). М.: Научный мир. 2005. 399 с.

Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. М.: Металлургия, 1981. 97 с.

Справочник по тектонической терминологии. М.: Недра, 1970. 581 с.

Справочник физических констант горных пород. М.: Мир, 1969. 570 с.

Стрижков С.А., Терентьев В.А., Петровский М.А. и др. Исследование влияния периодических вариаций напряженно деформированного состояния материала на характер излучения сигналов акустической эмиссии // Экспериментальные и численные методы в физике очага землетрясения. М.: Наука, 1989. С. 192–196.

Структурная геология тектоники плит. Т. 2. М.: Мир, 1991. 376 с.

Талицкий В.Г. Структурные уровни деформаций в земной коре // Экспериментальная тектоника в решении задач теоретической и практической геологии: Тез. докл. Второго симпоз. Киев, 1987. С. 205–206.

Талицкий В.Г. Модель структурообразования в неоднородной геологической среде // Вестн. МГУ. Сер. 4, Геология. 1991. № 1. С. 27–33.
Талобр Ж. Механика горных пород. М.: Госгеолтехиздат, 1960. 430 с.
Тейтельбаум Ю.М., Пономарев В.С. Рои слабых землетрясений в прогнозе сильных событий // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1980. № 1. С. 21–33.
Тектоническая расслоенность литосферы. М.: Наука, 1980. 216 с. (Тр. ГИН; Вып. 343).
Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. М.: Мир, 1985. 730 с.
Тетяев М.М. Основы геотектоники. М.: ОНТИ, 1934. 288 с.
Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. М.: Наука, 1971. 807 с.
Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
Тихомиров В.Г. Трещины гранитоидных массивов и их происхождение // Бюл. МОИП, отд. геол. 1983. Т. 58, вып. 1. С. 35–42.
Турчанинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И. Поле тектонических напряжений по данным измерений в Хибинском массиве // Напряженное состояние земной коры. М.: Наука, 1973. С. 50–58.
Файф У., Прайс Н., Томпсон А. Флюиды в земной коре. М.: Мир, 1981. 436 с.
Фандерлик М. Пороки стекла. М.: Стройиздат, 1964. 352 с.
Федоров В.Б., Тананаев И.В. Энергонасыщенные системы и кластеры // Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева. 1987. Т. 32, № 1. С. 43–47.
Финкель В.М. Физика разрушения. М.: Металлургия, 1970. 376 с.
Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.
Фридман Я.Б. Закономерности разрушения твердых тел применительно к задачам тектонофизики // Проблемы тектонофизики. М.: Госгеолтехиздат, 1960. С. 67–77.
Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч. 1. М.: Машиностроение, 1974. 472 с.
Хаин В.Е., Гончаров М.А. Геодинамические циклы и геодинамические системы разного ранга: их соотношение и эволюция в истории Земли // Геотектоника. 2006. № 5. С. 3–24.
Хаст Н., Нильсон Т. Измерения напряжений в скальных породах и их значение для строительства плотин // Проблемы инженерной геологии. М.: Мир, 1967. Вып. 4. С. 13–21.
Христианович С.А., Салганик Р.Л. Выбросоопасные ситуации. Дробление. Волна выброса. М., 1980. 44 с. (Препр. / ИПМ АН СССР; № 152).
Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
Шайдеггер А.Е. Тектонические напряжения и их влияние на геологические смещения // Проблемы инженерной геологии. М.: Мир, 1967. Вып. 4. С. 22–28.
Шаров В.И., Гречишников Г.А. О поведении тектонических разрывов на различных глубинных уровнях земной коры по данным метода отраженных волн (МОВ) // Докл. АН СССР. 1982. Т. 263, № 2. С. 412–416.
Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. Новосибирск: Наука. 1983. 112 с.
Шульц С.С. Тектоника земной коры. Л.: Недра, 1979. 270 с.

Юдахин Ф.Н. О некоторых общих чертах глубинного строения и геодинамики платформ и горно-складчатых областей // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов. М.; Бишкек, 2003. С. 47–68.

Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Физматгиз, 1963. 847 с.

Ярошевский В. Тектоника разрывов и складок. М.: Недра, 1981. 245 с.

Aki K., Defazia T., Peasenberg P., Nur A. Interpretation of seismic data from hydraulic fracturing experimtnts at the Fenton Hill, New Mexico, hot dry rock geotermal site // J. Geophys. Res. B. 1982. Vol. 87, N 2. P. 936–944.

Anderson O.S., Grew P.C. Stress corrosion theory of crack propagation with applications to geophysics // Rev. Geophys. and Space Phys. 1977. Vol. 15, N 1. P. 77–101.

Bankwitz P. Beobachtungen im Thuringischen Schiefergebirge // Geologie. 1965. Bd. 14, N 3.

Binns D.B. Some physical of two phase crystal glas solids // Sci. Ceramics. 1962. N 1. P. 315–334.

Cook N.J.W. The application of seismic techniques to problems in rock mechanics // Intern. J. Rock Mech. and Mining Sci. 1964. Vol. 1, N 2.

Friedeman M. Residual elastic strain in rocks // Tectonophysics. 1972. Vol. 15. P. 297–330.

Gallagher J.J. Photomechanical model studies relating to fracture and residual elastic strain in granular aggregates: Thesis. Texas, 1971. 127 p.

Goward M.P. The evolution of mountain belts: structure of the Himalayas and Tibet // Sci. Progr. 1987. Vol. 71, N 282. P. 249–273.

Gramberg J. Axial cleavage fracturing, a significant process in mining and geology // Eng. Geol. 1965. Vol. 1, N 1. P. 31–72.

Irving R. Why residual stresses can no longer be ignored // Iron Age. 1978. Vol. 221, N 47. P. 48–51.

Kieslinger A. Residuai stress and relaxation in rocks // XXI Intern. geol. congr. Copenhagen, 1960. Pt 18. P. 270–276.

Lukyanov A.V. External and internal causes of the cycles in some geological phenomena // J. Interdiscipl. Cycle Res. 1972. Vol. 3, N 3/4. P. 358.

Macherauch E. Neuere Untersuchungen zur Ausbildung und Auswirkung von Eigenspannungen in metallischen Werkstoffen // Ztg Werkstoffen. 1979. Bd. 10, N 3. S. 93–111.

Milliman J.D., Meade R.H. World-wide delivery of river sediment to the oceans // J. Geol. 1983. Vol. 91, N 1. P. 1–21.

Mogi K. Source locations of elastic shocks in the fracturing process in rocks // Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo. 1968. Vol. 46. P. 1103–1125.

Morlier P. Influence de la pression sur la comportement rheologque des roches // Rev. industr. miner. 1972. P. 405.

Nur A., Simmons G. The origin of small crakes in igneous rocks // Intern. J. Rocks and Mech. 1970. N 7. P. 307–314.

O'Hara M.J. Thermal history of excavation of Archaean gneisses from the base of the continental crust // J. Geol. Soc. 1977. Vol. 134, N 2. P. 185–200.

Reik G. Residueiie Spannungen in quarzreichen Gesteinen Rontgendiffraktometrische Messung und Erklarungsmoglchkeiten ihrer Enstehung // Geol. Rundschau. 1976. Bd. 65, N 1. S. 66–83.

Reik G., Vardar M. Bestehen Zusammenhange zwischen residuallen Spannungen und tectonischer Reanspruchung // Rock Mech. 1974. N 6. P. 101–116.

Rosenfeld Y.L. Stress effects around quartz inclusions in almandine and piezother – momentry of coexisting aluminium silicates// Amer. J. Sci. 1969. Vol. 267, N 3.

Tietz H.D. Entstehung und Einteilung von Eigenspannungenin Werkstoffen // Neue Hutte. 1980. Bd. 25, N 10. S. 371–377.

Voight B. Restspannungen im Gestein // Proc. Inst. Congr. Soc. Rock Mech. 1966. N 2. P. 45–50.

Wise D.U. Microjointing in basemen Middle Rocky Mountains of Montana and Wyoming // Bull. Geol. Soc. Amer. 1964. Vol. 75, N 4.

ТЕЗИСЫ К ОБОСНОВАНИЮ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭНЕРГОМЕХАНИКИ

В настоящем механика деформируемого твердого тела (МДТТ) – высокоразвитая специализированная познавательная система. По своим основаниям она восходит к физике твердого тела, однако в своем становлении отчасти отошла от своей «праосновы». Некоторые положения физики были адаптированы к специфике сложившейся аксиоматики: слишком упрощены или оказались вне поля ее зрения.

В попытках понять особенности механического поведения реальной геологической среды автор этой книги пришел к тому, что для этого необходим возврат к «неадаптированной» физике механических явлений и процессов, протекающих в геологической среде. «Назад, к физике!» – так бы сформулировал автор свое отношение к данной проблеме. Конструктивно это отношение выразилось в попытке создать принципиально иную концептуальную основу, которую он обозначил как *физическая энергомеханика*. Для удобства читателя автор нашел целесообразным компактно изложить основные идеи физической энергомеханики в форме тезисов, прилагаемых к этой книге.

1.1. Методы, аппарат и представления современной (*традиционной*, или *классической*) МДТТ развиты на основе *механики сплошной среды (МСС)*, или, как ее еще называют, *континуальной механики*.

В классической механике изучается не реальная среда, а ее те или иные модели. Модели МСС, при всем их разнообразии, покоятся на двух постулатах: «сплошность» среды и среда не располагает энергетическим потенциалом, помимо того, который обеспечивает ей действие внешних механических сил, приложенных к ней в данный момент времени. Поэтому особенности механического поведения среды, в той или иной мере обусловленные ее структурой или наличием значительного собственного энергетического потенциала, по отношению к основному руслу развития МДТТ оказались периферийными, чужеродными, маргинальными.

1.2. «Отторженность» структурного фактора в МДТТ ныне успешно преодолевается. В отношении геологической среды этому способствовали представление о блоковой делимости земной коры, развитое акад. М.А. Садовским и его сотрудниками, а также работы ряда исследователей, в первую очередь А.В. Лукьянова, М.А. Гончарова, В.Г. Талицкого. В отношении общих задач МДТТ учет структурного фактора осуществлен в рамках ныне активно развивающегося нового направления – *физической мезомеханики*. Все эти направления, помимо своей внутренней значимости, важны еще и тем, что они играют роль своего рода «центров кристаллизации», упорядочивающих разрозненные факты и представления в единую рационально организованную систему.

Что касается влияния собственного энергетического потенциала на механическое поведение твердых тел, дело остается в прежнем положении. В этой области накоплен богатый эмпирический материал, разными исследователями высказан ряд важных конструктивных идей. Однако единой «точки схода» эти потоки информации пока не имеют. В качестве такого организующего центра и предложен подход, обозначенный нами как физическая энергомеханика. Основные положения и смысловое наполнение этого направления получены в процессе уяснения физики природной и техногенной сейсмичности, но по своему значению выходят за указанные частные рамки и имеет общий характер.

2.1. Реальные твердые тела практически всегда содержат в себе некоторое количество потенциальной энергии упругих деформаций (или, коротко, *упругой энергии*), независимо от того, действуют или не действуют в данный момент времени на них внешние силы. Другими словами, твердые тела всегда располагают более или менее значительным *собственным энергетическим ресурсом, собственным энергетическим потенциалом*, представленным упругой энергией. В этом смысле они являются *энергосодержащими*. Наличие упругой энергии в твердых телах не является экзотическим случаем, а представляет собой фундаментальную особенность их реального существования.

2.2. Если плотность упругой энергии в теле достигает некоторого *порогового значения*, то стиль его механического поведения резко изменяется. Тела, в которых плотность упругой энергии достигла порогового значения (или превысила), в дальнейшем мы будем называть *энергонасыщенными*, а область МДТТ, в которой рассматривается механическое поведение энергонасыщенных тел, – *энергомеханикой*.

ТЕЗИСЫ К ОБОСНОВАНИЮ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭНЕРГОМЕХАНИКИ

В настоящем механика деформируемого твердого тела (МДТТ) – высокоразвитая специализированная познавательная система. По своим основаниям она восходит к физике твердого тела, однако в своем становлении отчасти отошла от своей «праосновы». Некоторые положения физики были адаптированы к специфике сложившейся аксиоматики: слишком упрощены или оказались вне поля ее зрения.

В попытках понять особенности механического поведения реальной геологической среды автор этой книги пришел к тому, что для этого необходим возврат к «неадаптированной» физике механических явлений и процессов, протекающих в геологической среде. «Назад, к физике!» – так бы сформулировал автор свое отношение к данной проблеме. Конструктивно это отношение выразилось в попытке создать принципиально иную концептуальную основу, которую он обозначил как *физическая энергомеханика*. Для удобства читателя автор нашел целесообразным компактно изложить основные идеи физической энергомеханики в форме тезисов, прилагаемых к этой книге.

1.1. Методы, аппарат и представления современной (*традиционной*, или *классической*) МДТТ развиты на основе *механики сплошной среды (МСС)*, или, как ее еще называют, *континуальной механики*.

В классической механике изучается не реальная среда, а ее те или иные модели. Модели МСС, при всем их разнообразии, покоятся на двух постулатах: «сплошность» среды и среда не располагает энергетическим потенциалом, помимо того, который обеспечивает ей действие внешних механических сил, приложенных к ней в данный момент времени. Поэтому особенности механического поведения среды, в той или иной мере обусловленные ее структурой или наличием значительного собственного энергетического потенциала, по отношению к основному руслу развития МДТТ оказались периферийными, чужеродными, маргинальными.

1.2. «Отторженность» структурного фактора в МДТТ ныне успешно преодолевается. В отношении геологической среды этому способствовали представление о блоковой делимости земной коры, развитое акад. М.А. Садовским и его сотрудниками, а также работы ряда исследователей, в первую очередь А.В. Лукьянова, М.А. Гончарова, В.Г. Талицкого. В отношении общих задач МДТТ учет структурного фактора осуществлен в рамках ныне активно развивающегося нового направления – *физической мезомеханики*. Все эти направления, помимо своей внутренней значимости, важны еще и тем, что они играют роль своего рода «центров кристаллизации», упорядочивающих разрозненные факты и представления в единую рационально организованную систему.

Что касается влияния собственного энергетического потенциала на механическое поведение твердых тел, дело остается в прежнем положении. В этой области накоплен богатый эмпирический материал, разными исследователями высказан ряд важных конструктивных идей. Однако единой «точки схода» эти потоки информации пока не имеют. В качестве такого организующего центра и предложен подход, обозначенный нами как физическая энергомеханика. Основные положения и смысловое наполнение этого направления получены в процессе уяснения физики природной и техногенной сейсмичности, но по своему значению выходят за указанные частные рамки и имеет общий характер.

2.1. Реальные твердые тела практически всегда содержат в себе некоторое количество потенциальной энергии упругих деформаций (или, коротко, *упругой энергии*), независимо от того, действуют или не действуют в данный момент времени на них внешние силы. Другими словами, твердые тела всегда располагают более или менее значительным *собственным энергетическим ресурсом, собственным энергетическим потенциалом*, представленным упругой энергией. В этом смысле они являются *энергосодержащими*. Наличие упругой энергии в твердых телах не является экзотическим случаем, а представляет собой фундаментальную особенность их реального существования.

2.2. Если плотность упругой энергии в теле достигает некоторого *порогового значения*, то стиль его механического поведения резко изменяется. Тела, в которых плотность упругой энергии достигла порогового значения (или превысила), в дальнейшем мы будем называть *энергонасыщенными*, а область МДТТ, в которой рассматривается механическое поведение энергонасыщенных тел, – *энергомеханикой*.

3.1. Твердые тела способны реагировать на действие внешней нагрузки появлением упругих деформаций двух видов. В начальный момент времени сила, приложенная к телу, вызывает его «мгновенную» начальную упругую деформацию на величину ε_0. Деформацию ε_0 иногда называют также «гуковской». Однако по истечении времени к начальной деформации прибавится добавочная деформация $\varepsilon_ф$. Ее называют деформацией последействия. Если мгновенно снять нагрузку, упругая деформация ε_0 исчезнет, однако деформация последействия останется. На первый взгляд, может показаться, что $\varepsilon_ф$ – пластическая деформация, но это не так. Со временем остаточная деформация будет уменьшаться, стремясь к нулю.

Способность деформированных твердых тел восстанавливать свою исходную форму известна как явление *последействия*, или *запаздывающей упругости*. Иногда говорят об *упругом последействии*. Материалы, обладающие свойством последействия, называют *наследственно-упругими*, или *вязко-упругими*. Поведение таких материалов определяется не только тем воздействием, которое образец испытывает в данный момент, но и историей тех воздействий, которым он подвергался ранее, в течение всей истории своего существования.

3.2. В МДТТ исходят из того основного положения, что суммарная деформация твердого тела состоит из двух составляющих – из деформации остаточной ($e_{ост}$) и деформации упругой (ε), т.е. $e = e_{ост} + \varepsilon(1)$. Соответственно, в МДТТ получили широкое развитие теория пластичности, исследующая пластические свойства твердых тел, и теория упругости, исследующая их упругие свойства.

Однако пример тел с наследственной упругостью с очевидностью указывает на то, что упругие деформации, в свою очередь, могут быть также подразделены на две составляющие: на «мгновенные» упругие деформации (ε_0) и упругие деформации, которые высвобождаются лишь со значительной задержкой времени. Поскольку «задержка» деформаций в твердом теле явно указывает на то, что в нем существует какой-то механизм их временной фиксации, далее мы их будем называть *фиксированными упругими деформациями*, или, коротко, *фиксированными деформациями* ($\varepsilon_Ф$). Таким образом, суммарная упругая деформация твердого тела состоит из двух составляющих: $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_Ф(2)$.

3.3. Упругая составляющая предопределяет наличие в теле напряжений и упругой энергии. Но поскольку в твердом теле могут сосуществовать два вида упругих деформаций – мгновенные

и фиксированные, неизбежен вывод, что в твердых телах могут сосуществовать, соответственно, два вида напряжений и две составляющие упругого потенциала, различные по физической природе. (Говоря об упругой энергии мы в дальнейшем, за исключением особо оговоренных случаев, будем иметь в виду ее плотность, т.е. ее количество, отнесенное к единице объема тела, и обозначать u).

Таким образом, помимо «обычных» напряжений σ_0, обусловленных мгновенными деформациями ε_0, будем различать *латентные напряжения* σ_Φ, обусловленные фиксированными деформациями ε_Φ, а обусловленную ими упругую энергию – как *латентную энергию* u_Φ.

Симметрично выражению (2) в общем случае $\sigma = \sigma_0 + \sigma_\Phi$ (2.1) и $u = u_0 + u_\Phi$ (2.2). В классической механике рассматривается частный случай, при котором $\sigma = \sigma_0$, $\sigma_\Phi = 0$ (3.1), а $u = u_0$, $u_\Phi = 0$ (3.2). Этот случай представляет собой предмет рассмотрения теории упругости. Мы же предлагаем рассмотреть другой частный случай, при котором $\sigma = \sigma_\Phi$, $\sigma_0 = 0$ (4.1) и $u = u_\Phi$, $u_0 = 0$ (4.2). Этот случай и составляет предмет физической энергомеханики.

3.4. В МДТТ для описания поведения материалов со свойством упругого последействия используется механическая модель вязко-упругого тела («тело Кельвина»). Она близка к модели Максвелла, в которой последовательно соединены упругий и вязкий элементы. В ней лишь вместо вязкого элемента включена комбинация двух параллельно соединенных элементов – вязкого и упругого. Недостаточность этой модели применительно к описанию энергонасыщенных тел выражается в следующем.

Во-первых, модель «работает» по принципу «черного ящика» – она рассматривает лишь связь между сигналом на входе и сигналом на выходе твердотельной системы. Физика явления в ней из рассмотрения исключена.

Во-вторых, она исключает из рассмотрения важнейший случай, когда латентная энергия системы вообще не зависит от действия внешних механических сил, а фиксированные деформации возникают за счет самых разных, в том числе и немеханических процессов, например за счет фазовых и полиморфных переходов, вещественных или иных структурных преобразований, изменений температуры и т.д.

В-третьих, упругие деформации, остающиеся в вязко-упругом теле после снятия внешней нагрузки, по характеру их воздействия на субстрат вовсе не адекватны тем напряжениям, которые в обычных упругих телах возникают как функция сопротивления приложенной внешней нагрузке. Единичные локальные области

3.1. Твердые тела способны реагировать на действие внешней нагрузки появлением упругих деформаций двух видов. В начальный момент времени сила, приложенная к телу, вызывает его «мгновенную» начальную упругую деформацию на величину ε_0. Деформацию ε_0 иногда называют также «гуковской». Однако по истечении времени к начальной деформации прибавится добавочная деформация $\varepsilon_ф$. Ее называют деформацией последействия. Если мгновенно снять нагрузку, упругая деформация ε_0 исчезнет, однако деформация последействия останется. На первый взгляд, может показаться, что $\varepsilon_ф$ – пластическая деформация, но это не так. Со временем остаточная деформация будет уменьшаться, стремясь к нулю.

Способность деформированных твердых тел восстанавливать свою исходную форму известна как явление *последействия*, или *запаздывающей упругости*. Иногда говорят об *упругом последействии*. Материалы, обладающие свойством последействия, называют *наследственно-упругими*, или *вязко-упругими*. Поведение таких материалов определяется не только тем воздействием, которое образец испытывает в данный момент, но и историей тех воздействий, которым он подвергался ранее, в течение всей истории своего существования.

3.2. В МДТТ исходят из того основного положения, что суммарная деформация твердого тела состоит из двух составляющих – из деформации остаточной ($e_{ост}$) и деформации упругой (ε), т.е. $e = e_{ост} + \varepsilon(1)$. Соответственно, в МДТТ получили широкое развитие теория пластичности, исследующая пластические свойства твердых тел, и теория упругости, исследующая их упругие свойства.

Однако пример тел с наследственной упругостью с очевидностью указывает на то, что упругие деформации, в свою очередь, могут быть также подразделены на две составляющие: на «мгновенные» упругие деформации (ε_0) и упругие деформации, которые высвобождаются лишь со значительной задержкой времени. Поскольку «задержка» деформаций в твердом теле явно указывает на то, что в нем существует какой-то механизм их временной фиксации, далее мы их будем называть *фиксированными упругими деформациями*, или, коротко, *фиксированными деформациями* ($\varepsilon_ф$). Таким образом, суммарная упругая деформация твердого тела состоит из двух составляющих: $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_ф(2)$.

3.3. Упругая составляющая предопределяет наличие в теле напряжений и упругой энергии. Но поскольку в твердом теле могут сосуществовать два вида упругих деформаций – мгновенные

и фиксированные, неизбежен вывод, что в твердых телах могут сосуществовать, соответственно, два вида напряжений и две составляющие упругого потенциала, различные по физической природе. (Говоря об упругой энергии мы в дальнейшем, за исключением особо оговоренных случаев, будем иметь в виду ее плотность, т.е. ее количество, отнесенное к единице объема тела, и обозначать u).

Таким образом, помимо «обычных» напряжений σ_0, обусловленных мгновенными деформациями ε_0, будем различать *латентные напряжения* σ_Φ, обусловленные фиксированными деформациями ε_Φ, а обусловленную ими упругую энергию – как *латентную энергию* u_Φ.

Симметрично выражению (2) в общем случае $\sigma = \sigma_0 + \sigma_\Phi$ (2.1) и $u = u_0 + u_\Phi$ (2.2). В классической механике рассматривается частный случай, при котором $\sigma = \sigma_0$, $\sigma_\Phi = 0$ (3.1), а $u = u_0$, $u_\Phi = 0$ (3.2). Этот случай представляет собой предмет рассмотрения теории упругости. Мы же предлагаем рассмотреть другой частный случай, при котором $\sigma = \sigma_\Phi$, $\sigma_0 = 0$ (4.1) и $u = u_\Phi$, $u_0 = 0$ (4.2). Этот случай и составляет предмет физической энергомеханики.

3.4. В МДТТ для описания поведения материалов со свойством упругого последействия используется механическая модель вязко-упругого тела («тело Кельвина»). Она близка к модели Максвелла, в которой последовательно соединены упругий и вязкий элементы. В ней лишь вместо вязкого элемента включена комбинация двух параллельно соединенных элементов – вязкого и упругого. Недостаточность этой модели применительно к описанию энергонасыщенных тел выражается в следующем.

Во-первых, модель «работает» по принципу «черного ящика» – она рассматривает лишь связь между сигналом на входе и сигналом на выходе твердотельной системы. Физика явления в ней из рассмотрения исключена.

Во-вторых, она исключает из рассмотрения важнейший случай, когда латентная энергия системы вообще не зависит от действия внешних механических сил, а фиксированные деформации возникают за счет самых разных, в том числе и немеханических процессов, например за счет фазовых и полиморфных переходов, вещественных или иных структурных преобразований, изменений температуры и т.д.

В-третьих, упругие деформации, остающиеся в вязко-упругом теле после снятия внешней нагрузки, по характеру их воздействия на субстрат вовсе не адекватны тем напряжениям, которые в обычных упругих телах возникают как функция сопротивления приложенной внешней нагрузке. Единичные локальные области

средоточия фиксированных упругих деформаций образуют множественные элементарные **дискретные** образования, дисперсно рассеянные в матрице содержащего их субстрата.

Из этого, в свою очередь, вытекают два следствия: 1) напряженно-деформированное состояние сред, содержащих множественные дискретные автономные источники энергии (упругие микродеформации), качественно отличается от напряженно-деформированного состояния, определяемого прямым действием внешних сил, что предопределяет качественно иной стиль их механического поведения, чем в случае непосредственного силового воздействия; 2) традиционные методы описания напряженного состояния с помощью дифференциальных уравнений применительно к описанию дискретных множеств неприменимы.

Общий вывод из сказанного в этом тезисе состоит в том, что в рамках традиционного подхода, основанного на положениях МСС, описать механическое поведение сред, содержащих фиксированные упругие деформации, невозможно. Для этого требуются иные методы и иная система понятий. Попытка удовлетворить этой потребности и осуществлена в форме физической энергомеханики.

4.1. Термины «напряжения» в классической механике деформируемого твердого тела и «латентные напряжения» по своему физическому смыслу представляют собой совершенно разные сущности. Притом настолько разные, что для латентных напряжений предпочтительней был бы термин, в котором, во избежание наложения разных смыслов, слово «напряжения» было бы исключено. Однако инерция традиции здесь труднопреодолима.

Рассмотрим, в чем состоят эти различия.

4.2. Сохранение формы тела, подверженного действию внешней силы, обеспечивают внутренние силы сопротивления этому действию. Силы сопротивления, отнесенные к единице площади поверхности, на которую действует внешняя сила, в механике деформируемого твердого тела называют *внутренними напряжениями,* или, кратко, *напряжениями.* В классической теории предполагается, что силы взаимодействия распределены достаточно равномерно и непрерывно, что и дает возможность описывать законы их изменения с помощью дифференциальных уравнений.

Что касается латентных напряжений, то их поле представляет собой ансамбль дискретных образований – единичных (элементарных) систем напряжений, в каждой из которых напряжения одного знака уравновешиваются напряжениями противоположного знака, причем уравновешивание локализовано в пространственной области, соизмеримой с масштабом соответствующей

упруго деформированной области (с масштабом структурной связи между взаимно деформированными элементами структуры тела). Каждая из таких элементарных систем по существу представляет собой квант упругой энергии, а суммарная энергия множества элементарных систем и составляет собственный энергетический потенциал тела.

4.3. Об «энергетическом» и «силовом» подходах.

Наличие упругих деформаций проявляется в двух формах: «энергетической» и «силовой» («векторной»). В первом случае оперируют *упругой энергией* (*и*), во втором – *силами* (*F*) и *напряжениями* (σ). Напряжения и упругая энергия – следствие одного и того же явления: упругой деформации. Если нет упругой деформации тела в целом или каких-либо его структурных составляющих, то в нем нет ни напряжений, ни упругой энергии. «Упругие напряжения» – тавтология, «неупругие напряжения» – нонсенс. Оба понятия – лишь разные эквиваленты того количества работы, которое было затрачено на упругое деформирование, подобно тому как количество труда, затраченное на изготовление какой-либо вещи, может быть измерено в разных денежных эквивалентах. Упругую энергию путем соответствующих математических преобразований можно выразить посредством напряжений и обратно. Это две разные формы – *силовая* и *энергетическая* – одной и той же физической сущности.

В приложениях МСС к МДТТ по преимуществу развит «силовой» подход. В нем оперируют главным образом «напряжениями». Однако в рамках специфических проблем, связанных с явлением энергонасыщенности, энергетический подход предпочтительней – он физически нагляднее и аналитически проще.

4.4. Поскольку латентные напряжения представляют собой самоуравновешенные **системы** напряжений, для понимания обусловленного ими напряженно-деформированного состояния (НДС) важным становится вопрос о размерах этих систем – вопрос, который применительно к «напряжениям» в их классическом смысле принципиального значения не имеет.

Размеры элементарных систем определяются размерами локально деформированных областей: например областью, в которой значимо сказывается искажение кристаллической решетки, обусловленное внедрением в нее чужеродного атома, областью контакта смежных минеральных зерен горной породы, претерпевших взаимное деформирование при несовместных изменениях их размеров, и т.д. Можно также сказать, что размеры элементарных систем определяются размерами структурных элементов данного твердого тела или размерами его *структурных связей*.

средоточия фиксированных упругих деформаций образуют множественные элементарные **дискретные** образования, дисперсно рассеянные в матрице содержащего их субстрата.

Из этого, в свою очередь, вытекают два следствия: 1) напряженно-деформированное состояние сред, содержащих множественные дискретные автономные источники энергии (упругие микродеформации), качественно отличается от напряженно-деформированного состояния, определяемого прямым действием внешних сил, что предопределяет качественно иной стиль их механического поведения, чем в случае непосредственного силового воздействия; 2) традиционные методы описания напряженного состояния с помощью дифференциальных уравнений применительно к описанию дискретных множеств неприменимы.

Общий вывод из сказанного в этом тезисе состоит в том, что в рамках традиционного подхода, основанного на положениях МСС, описать механическое поведение сред, содержащих фиксированные упругие деформации, невозможно. Для этого требуются иные методы и иная система понятий. Попытка удовлетворить этой потребности и осуществлена в форме физической энергомеханики.

4.1. Термины «напряжения» в классической механике деформируемого твердого тела и «латентные напряжения» по своему физическому смыслу представляют собой совершенно разные сущности. Притом настолько разные, что для латентных напряжений предпочтительней был бы термин, в котором, во избежание наложения разных смыслов, слово «напряжения» было бы исключено. Однако инерция традиции здесь труднопреодолима.

Рассмотрим, в чем состоят эти различия.

4.2. Сохранение формы тела, подверженного действию внешней силы, обеспечивают внутренние силы сопротивления этому действию. Силы сопротивления, отнесенные к единице площади поверхности, на которую действует внешняя сила, в механике деформируемого твердого тела называют *внутренними напряжениями,* или, кратко, *напряжениями.* В классической теории предполагается, что силы взаимодействия распределены достаточно равномерно и непрерывно, что и дает возможность описывать законы их изменения с помощью дифференциальных уравнений.

Что касается латентных напряжений, то их поле представляет собой ансамбль дискретных образований – единичных (элементарных) систем напряжений, в каждой из которых напряжения одного знака уравновешиваются напряжениями противоположного знака, причем уравновешивание локализовано в пространственной области, соизмеримой с масштабом соответствующей

упруго деформированной области (с масштабом структурной связи между взаимно деформированными элементами структуры тела). Каждая из таких элементарных систем по существу представляет собой квант упругой энергии, а суммарная энергия множества элементарных систем и составляет собственный энергетический потенциал тела.

4.3. Об «энергетическом» и «силовом» подходах.

Наличие упругих деформаций проявляется в двух формах: «энергетической» и «силовой» («векторной»). В первом случае оперируют *упругой энергией* (*и*), во втором – *силами* (*F*) и *напряжениями* (σ). Напряжения и упругая энергия – следствие одного и того же явления: упругой деформации. Если нет упругой деформации тела в целом или каких-либо его структурных составляющих, то в нем нет ни напряжений, ни упругой энергии. «Упругие напряжения» – тавтология, «неупругие напряжения» – нонсенс. Оба понятия – лишь разные эквиваленты того количества работы, которое было затрачено на упругое деформирование, подобно тому как количество труда, затраченное на изготовление какой-либо вещи, может быть измерено в разных денежных эквивалентах. Упругую энергию путем соответствующих математических преобразований можно выразить посредством напряжений и обратно. Это две разные формы – *силовая* и *энергетическая* – одной и той же физической сущности.

В приложениях МСС к МДТТ по преимуществу развит «силовой» подход. В нем оперируют главным образом «напряжениями». Однако в рамках специфических проблем, связанных с явлением энергонасыщенности, энергетический подход предпочтительней – он физически нагляднее и аналитически проще.

4.4. Поскольку латентные напряжения представляют собой самоуравновешенные **системы** напряжений, для понимания обусловленного ими напряженно-деформированного состояния (НДС) важным становится вопрос о размерах этих систем – вопрос, который применительно к «напряжениям» в их классическом смысле принципиального значения не имеет.

Размеры элементарных систем определяются размерами локально деформированных областей: например областью, в которой значимо сказывается искажение кристаллической решетки, обусловленное внедрением в нее чужеродного атома, областью контакта смежных минеральных зерен горной породы, претерпевших взаимное деформирование при несовместных изменениях их размеров, и т.д. Можно также сказать, что размеры элементарных систем определяются размерами структурных элементов данного твердого тела или размерами его *структурных связей*.

Приведем следующий пример. В 1 см^3 стали содержится несколько миллионов кристаллов. Это означает, что при несогласованных изменениях размеров этих кристаллов в случае структурной перестройки, вызванной изменением внешних условий, в этом объеме могут существовать несколько миллионов единичных (элементарных) полей напряжений.

Вообще говоря, спектр размеров структурных связей в твердом теле непрерывен. Но в технике принята грубая классификационная градация *остаточных напряжений*, по смыслу эквивалентных напряжениям, обусловленным фиксированными деформациями. Здесь в зависимости от размеров структурных связей, на которых уравновешиваются («замыкаются») элементарные системы напряжений, различают напряжения первого, второго и третьего рода. Напряжения первого рода уравновешиваются на уровне связей одного порядка с размерами деталей машин и конструкций, напряжения второго рода – на уровне связей между кристаллами, напряжения третьего рода – на уровне дефектов кристаллических решеток.

В мире реальных физических тел, как было отмечено, спектр размеров структурных связей непрерывен. Шкала размеров элементарных полей напряжений по отношению к размерам структурных связей, ответственных за возникновение латентных напряжений, может быть представлена по образу шкалы длин волн электромагнитного излучения, которая соответствует размерам излучателей. Возможно, что по своему физическому смыслу это не столько сравнение, сколько аналогия.

4.5. При уяснении НДС, обусловленного латентными напряжениями, должен быть установлен не только масштабный диапазон, в котором проявляются их элементарные поля, но и избранный масштаб рассмотрения этих полей. В технике «по умолчанию» масштаб рассмотрения установлен жестко: он соответствует масштабу человека. Однако картины НДС при разных масштабах рассмотрения существенно разнятся. Некоторые же свойства объекта можно увидеть только при определенном масштабном разрешении или в зависимости от уровня генерализации. Эту мысль иллюстрирует, например, то, что на уровне атомного строения вещества «мир» выглядит совершенно иначе, чем на макроскопическом уровне.

Пусть Q – база измерения (масштаб рассмотрения, размер рассматриваемого элемента объема) и L – характерный размер пространственной области, в которой замыкается единичная система латентных напряжений масштабного ранга i.

При $Q \gg L_i$ совокупность множества элементарных полей латентных напряжений предстанет перед наблюдателем как своего рода фоновая напряженность и он воспримет эффекты их коллективного воздействия как особенные свойства среды, например как ее пониженная прочность или повышенная способность к хрупкому разрушению. На этом уровне понятие напряжений в их «классическом» понимании теряет смысл. При строгом подходе термин «напряжения» здесь должно было бы исключить, заменив его, например, термином «напряженность», или же в качестве основного принять определение, выраженное не в «силовой», а в «энергетической форме».

При $Q \ll L_i$ наблюдатель увидит настолько малый фрагмент целого, что вопрос о системе в целом потеряет для него практическое значение. В измеряемых напряжениях он увидит результат действия внешней силы. Именно этот случай рассматривается в рамках континуальной механики.

При $Q \approx L_i$, выполняя точечные измерения в разных частях единичной системы, наблюдатель столкнется с явлением сильного разброса измеренных значений не только по модулю и знаку, но и по ориентировке в пространстве. Это явление часто обнаруживают при измерении напряжения массивов пород в окрестности горных выработок. Оно является одной из основных причин сложнейшей картины НДС массивов пород, которая в рамках традиционных представлений трудно поддается пониманию и описанию.

Сказанное легко обобщить на тот случай, если значение L принять фиксированным, а Q – переменным.

Зависимость картины НДС от соотношения размеров элементарных систем напряжений и избранного масштаба рассмотрения мы определили как *принцип относительности*. Различные стороны возможного применения принципа относительности к анализу НДС здесь сказанным далеко не исчерпаны. Заметим лишь, что если случай, когда $Q \ll L_i$, указывает область корректного применения континуальной механики, то объекты, рассматриваемые при $Q \geq L_i$, уже переходят в область применения физической энергомеханики.

5.1. С точки зрения представлений термодинамики, рассматривающей твердые тела как твердотельные системы, наличие в них собственного энергетического потенциала является признаком и мерой отклонения состояния этих тел от термодинамического (статистического) равновесия. Согласно основному постулату статистической физики, физическая система, предоставленная самой себе, с течением времени самопроизвольно стремится

Приведем следующий пример. В 1 см^3 стали содержится несколько миллионов кристаллов. Это означает, что при несогласованных изменениях размеров этих кристаллов в случае структурной перестройки, вызванной изменением внешних условий, в этом объеме могут существовать несколько миллионов единичных (элементарных) полей напряжений.

Вообще говоря, спектр размеров структурных связей в твердом теле непрерывен. Но в технике принята грубая классификационная градация *остаточных напряжений*, по смыслу эквивалентных напряжениям, обусловленным фиксированными деформациями. Здесь в зависимости от размеров структурных связей, на которых уравновешиваются («замыкаются») элементарные системы напряжений, различают напряжения первого, второго и третьего рода. Напряжения первого рода уравновешиваются на уровне связей одного порядка с размерами деталей машин и конструкций, напряжения второго рода – на уровне связей между кристаллами, напряжения третьего рода – на уровне дефектов кристаллических решеток.

В мире реальных физических тел, как было отмечено, спектр размеров структурных связей непрерывен. Шкала размеров элементарных полей напряжений по отношению к размерам структурных связей, ответственных за возникновение латентных напряжений, может быть представлена по образу шкалы длин волн электромагнитного излучения, которая соответствует размерам излучателей. Возможно, что по своему физическому смыслу это не столько сравнение, сколько аналогия.

4.5. При уяснении НДС, обусловленного латентными напряжениями, должен быть установлен не только масштабный диапазон, в котором проявляются их элементарные поля, но и избранный масштаб рассмотрения этих полей. В технике «по умолчанию» масштаб рассмотрения установлен жестко: он соответствует масштабу человека. Однако картины НДС при разных масштабах рассмотрения существенно разнятся. Некоторые же свойства объекта можно увидеть только при определенном масштабном разрешении или в зависимости от уровня генерализации. Эту мысль иллюстрирует, например, то, что на уровне атомного строения вещества «мир» выглядит совершенно иначе, чем на макроскопи*ческом уровне*.

Пусть Q – база измерения (масштаб рассмотрения, размер рассматриваемого элемента объема) и L – характерный размер пространственной области, в которой замыкается единичная система латентных напряжений масштабного ранга i.

При $Q \gg L_i$ совокупность множества элементарных полей латентных напряжений предстанет перед наблюдателем как своего рода фоновая напряженность и он воспримет эффекты их коллективного воздействия как особенные свойства среды, например как ее пониженная прочность или повышенная способность к хрупкому разрушению. На этом уровне понятие напряжений в их «классическом» понимании теряет смысл. При строгом подходе термин «напряжения» здесь должно было бы исключить, заменив его, например, термином «напряженность», или же в качестве основного принять определение, выраженное не в «силовой», а в «энергетической форме».

При $Q \ll L_i$ наблюдатель увидит настолько малый фрагмент целого, что вопрос о системе в целом потеряет для него практическое значение. В измеряемых напряжениях он увидит результат действия внешней силы. Именно этот случай рассматривается в рамках континуальной механики.

При $Q \approx L_i$, выполняя точечные измерения в разных частях единичной системы, наблюдатель столкнется с явлением сильного разброса измеренных значений не только по модулю и знаку, но и по ориентировке в пространстве. Это явление часто обнаруживают при измерении напряжения массивов пород в окрестности горных выработок. Оно является одной из основных причин сложнейшей картины НДС массивов пород, которая в рамках традиционных представлений трудно поддается пониманию и описанию.

Сказанное легко обобщить на тот случай, если значение L принять фиксированным, а Q – переменным.

Зависимость картины НДС от соотношения размеров элементарных систем напряжений и избранного масштаба рассмотрения мы определили как *принцип относительности*. Различные стороны возможного применения принципа относительности к анализу НДС здесь сказанным далеко не исчерпаны. Заметим лишь, что если случай, когда $Q \ll L_i$, указывает область корректного применения континуальной механики, то объекты, рассматриваемые при $Q \geq L_i$, уже переходят в область применения физической энергомеханики.

5.1. С точки зрения представлений термодинамики, рассматривающей твердые тела как твердотельные системы, наличие в них собственного энергетического потенциала является признаком и мерой отклонения состояния этих тел от термодинамического (статистического) равновесия. Согласно основному постулату статистической физики, физическая система, предоставленная самой себе, с течением времени самопроизвольно стремится

Приведем следующий пример. В 1 см^3 стали содержится несколько миллионов кристаллов. Это означает, что при несогласованных изменениях размеров этих кристаллов в случае структурной перестройки, вызванной изменением внешних условий, в этом объеме могут существовать несколько миллионов единичных (элементарных) полей напряжений.

Вообще говоря, спектр размеров структурных связей в твердом теле непрерывен. Но в технике принята грубая классификационная градация *остаточных напряжений*, по смыслу эквивалентных напряжениям, обусловленным фиксированными деформациями. Здесь в зависимости от размеров структурных связей, на которых уравновешиваются («замыкаются») элементарные системы напряжений, различают напряжения первого, второго и третьего рода. Напряжения первого рода уравновешиваются на уровне связей одного порядка с размерами деталей машин и конструкций, напряжения второго рода – на уровне связей между кристаллами, напряжения третьего рода – на уровне дефектов кристаллических решеток.

В мире реальных физических тел, как было отмечено, спектр размеров структурных связей непрерывен. Шкала размеров элементарных полей напряжений по отношению к размерам структурных связей, ответственных за возникновение латентных напряжений, может быть представлена по образу шкалы длин волн электромагнитного излучения, которая соответствует размерам излучателей. Возможно, что по своему физическому смыслу это не столько сравнение, сколько аналогия.

4.5. При уяснении НДС, обусловленного латентными напряжениями, должен быть установлен не только масштабный диапазон, в котором проявляются их элементарные поля, но и избранный масштаб рассмотрения этих полей. В технике «по умолчанию» масштаб рассмотрения установлен жестко: он соответствует масштабу человека. Однако картины НДС при разных масштабах рассмотрения существенно разнятся. Некоторые же свойства объекта можно увидеть только при определенном масштабном разрешении или в зависимости от уровня генерализации. Эту мысль иллюстрирует, например, то, что на уровне атомного строения вещества «мир» выглядит совершенно иначе, чем на макроскопи*ческом уровне*.

Пусть Q – база измерения (масштаб рассмотрения, размер рассматриваемого элемента объема) и L – характерный размер пространственной области, в которой замыкается единичная система латентных напряжений масштабного ранга i.

При $Q \gg L_i$ совокупность множества элементарных полей латентных напряжений предстанет перед наблюдателем как своего рода фоновая напряженность и он воспримет эффекты их коллективного воздействия как особенные свойства среды, например как ее пониженная прочность или повышенная способность к хрупкому разрушению. На этом уровне понятие напряжений в их «классическом» понимании теряет смысл. При строгом подходе термин «напряжения» здесь должно было бы исключить, заменив его, например, термином «напряженность», или же в качестве основного принять определение, выраженное не в «силовой», а в «энергетической форме».

При $Q \ll L_i$ наблюдатель увидит настолько малый фрагмент целого, что вопрос о системе в целом потеряет для него практическое значение. В измеряемых напряжениях он увидит результат действия внешней силы. Именно этот случай рассматривается в рамках континуальной механики.

При $Q \approx L_i$, выполняя точечные измерения в разных частях единичной системы, наблюдатель столкнется с явлением сильного разброса измеренных значений не только по модулю и знаку, но и по ориентировке в пространстве. Это явление часто обнаруживают при измерении напряжения массивов пород в окрестности горных выработок. Оно является одной из основных причин сложнейшей картины НДС массивов пород, которая в рамках традиционных представлений трудно поддается пониманию и описанию.

Сказанное легко обобщить на тот случай, если значение L принять фиксированным, а Q – переменным.

Зависимость картины НДС от соотношения размеров элементарных систем напряжений и избранного масштаба рассмотрения мы определили как *принцип относительности*. Различные стороны возможного применения принципа относительности к анализу НДС здесь сказанным далеко не исчерпаны. Заметим лишь, что если случай, когда $Q \ll L_i$, указывает область корректного применения континуальной механики, то объекты, рассматриваемые при $Q \geq L_i$, уже переходят в область применения физической энергомеханики.

5.1. С точки зрения представлений термодинамики, рассматривающей твердые тела как твердотельные системы, наличие в них собственного энергетического потенциала является признаком и мерой отклонения состояния этих тел от термодинамического (статистического) равновесия. Согласно основному постулату статистической физики, физическая система, предоставленная самой себе, с течением времени самопроизвольно стремится

перейти в такое состояние, при котором его энергия в данных условиях минимальна. Таким образом, в свете представлений термодинамики, процесс высвобождения упругой энергии, запасенной вязко-упругим телом, является по своей физической сути **процессом релаксационным**, хотя в рамках представлений об упруго-вязком теле это и не декларируется. Для такого процесса типичным является то, что он часто принимает черты процесса автокаталитического, самоподдерживающегося, самопроизвольного.

5.2. Механическое поведение твердых тел в режиме релаксации, в особенности их разрушение, резко отличается от поведения, обусловленного действием внешних сил. В соответствии с этим, разрушение твердых тел под действием внешних сил имеет смысл обозначить как *принудительное разрушение*, в отличие от *самопроизвольного разрушения*, осуществляющегося за счет собственного энергетического потенциала данного тела. В первом случае работа по разрушению черпается из источника энергии, внешнего по отношению к данному телу, во втором – из источника упругой энергии, который содержится непосредственно в самом теле. Это разумеется само собой, но, тем не менее, заметим, что накопление собственного энергетического потенциала тела могут обеспечивать как немеханические процессы, так и внешние силовые воздействия, которым это тело подвергалось в прошлом.

5.3. В рамках традиционных представлений МДТТ само выражение «релаксационное разрушение» выглядит как некорректное по двум причинам. Во-первых, в МДТТ термин «релаксация» рассматривается только применительно к напряжениям, **но не к энергии**. Во-вторых, согласно континуальной модели среды, релаксация напряжений рассматривается как процесс, который протекает **без разрывов сплошности**. Поскольку понятие «разрушения» означает расчленение тела на части трещинами – разрывами сплошности, выражение «релаксационное разрушение» в свете традиционных представлений выглядит неприемлемым.

В данном случае мы видим пример, к сожалению далеко не единичный, трансформации смысла общепринятых физических представлений в процессе их приспособления к основным установкам парадигмы континуальности. Физическая энергомеханика возвращает теоретические построения к физическим представлениям в их исходном значении.

С точки зрения представлений физики, релаксационным может быть назван процесс перехода системы к равновесию **по любому параметру**: будь то напряжения, энергия, температура, хи-

мический потенциал, количество движения и т.д. С позиции физики выражение «релаксация энергии» совершенно правомочно. Что же касается того, что в процессе релаксации энергии происходит образование трещин (*структурная релаксация*), – это **факт**, с полной достоверностью устанавливаемый из натурных наблюдений и данных лабораторных исследований.

5.4. Понятие «упругое последействие» подразумевает самопроизвольное восстановление исходной формы разгруженного тела, протекающее **без разрывов сплошности**. Соответственно, и тела, в которых это происходит, называют «вязко-упругими». Давно установлено, что «вязкое» поведение материала, за немногочисленными исключениями, на микроскопическом уровне осуществляется дискретными скачками, т.е. представляет собой масштабный эффект, зависящий от выбора масштаба рассмотрения. Между тем, в целом ряде искусственных и природных твердых тел, которые можно было бы в параллель назвать «хрупко-упругими» (например, гранит или песчаник), самопроизвольное восстановление их исходной формы сопровождается образованием трещин и на макроскопическом уровне. Для обозначения фрагментации, структурной дезинтеграции *хрупко-упругих* материалов в процессе их структурной релаксации мы ввели термин *хрупкое последействие*.

5.5. В поле влияния парадигмы континуальности такие объекты из научного рассмотрения были исключены или их изучение, например в механике хрупкого разрушения, осуществлялось на основе методов и представлений, развитых в континуальной механике.

Попытка описать разрывы сплошности континуальными методами противоречива по существу. Выход из этой ситуации обычно видят в том, что потеря устойчивости материала происходит в малой локальной области, возникновение которой может быть предсказано, исходя из классических методов. Что же касается самого разрушения, то его рассматривают как явление второстепенное, выяснение деталей которого в отношении уже разрушенного объекта существенного значения не имеет. В конце концов, это выразилось в том, что общая теория разрушения пока не построена.

5.6. В отличие от такого подхода, в рамках физической энергомеханики одним из основных ее направлений является непосредственное изучение морфологической выраженности структур разрушения, кинетика их образования и динамические явления, которыми сопровождается образование. Именно эта сторона дела имеет решающее значение для уяснения многих проблем наук

о Земле. Среди них можно указать на образование блоковой делимости земной коры, планетарной трещиноватости, тектонической расслоенности, целого ряда других явлений структурного плана. Физическая энергомеханика прямо нацелена на исследование физических условий возникновения природных и техногенных землетрясений, исследование автокаталитических проявлений сейсмического режима и отраженных в них геодинамических параметров. Она может быть использована для понимания причин дезинтеграции пород при вулканических извержениях вплоть до образования вулканической пыли и целого ряда других явлений импактной природы («трубки взрыва», дезинтеграция пород в процессе взрыва и др.). По существу заложенных в ней положений она может иметь прямое отношение к изучению различных динамических явлений в шахтах, таких, в частности, как горные удары, стреляние пород или внезапные выбросы газа и пыли.

В общем плане задач МДТТ положения физической энергомеханики представляются научно-идеологической платформой, адекватно соответствующей цели построения общей механики разрушения.

5.7. Таким образом, «большой наукой», несущим стержнем которой явились представления континуальной механики, явление энергонасыщенности твердых сред практически игнорировалось. С другой стороны, возникали все новые и новые проблемы, связанные именно с этими явлениями.

Примеры бесчисленны. Вот лишь некоторые из них: растрескивание фарфора и кирпича в процессе обжига; трудности в изготовлении больших оптических стекол для телескопов (так и оставшиеся не преодоленными); разрушение стальных стволов артиллерийских орудий; взрывы химических реакторов; самопроизвольные взрывы хрустальных изделий; охрупчивание брони; растрескивание стальных полированных поверхностей; радиационное разрыхление материалов, используемых в атомной энергетике; самопроизвольное коробление листовой стали; внезапное динамическое разрушение стальных балок, мостовых ферм, сварных корпусов кораблей. Решение таких проблем в каждом отдельном случае – это целые технологические эпопеи, иные из которых длились десятилетиями, а иные не завершены и ныне.

5.8. Вследствие отсутствия единой теоретической платформы, проблемы, связанные с энергонасыщенностью материалов и конструкций, решались преимущественно на «ведомственном» уровне. Теоретический разнобой при решении таких проблем сказался уже в том, что для напряжений, обусловленных фикси-

рованными деформациями, употреблены десятки названий. Например, «дисперсные», «поляризационные», «собственные», «начальные», «скрытые», «объемно-градиентные», «латентные», «трансформационные», «тепловые» напряжения. Им также присваивают наименования, когда отражены технологии, которым они обязаны своим появлением: «сварочные», «усадочные», «деформационные», «сборочные», «технологические» напряжения.

Отсутствие установившейся терминологии в отношении такого рода напряжений в горных породах специально обсуждалось на Лиссабонском симпозиуме по механике горных пород (1966г.), где был предложен целый ряд терминов: «начальные», «первичные», «девственные», «остаточные», «врожденные», «естественные», «замороженные» напряжения.

Таким образом, в проблеме энергонасыщенности твердых тел остается нерешенной уже проблема выработки адекватного термина для обозначения действующих в них напряжений. Мы здесь не станем анализировать, по каким причинам предлагаемые наименования либо являются слишком частными, либо не вполне соответствуют физическому существу обозначаемых ими явлений, либо перекрываются по форме с уже принятыми терминами с другим смыслом. Мы приняли термин «латентные напряжения» как один из терминов, уже употреблявшихся другими исследователями и не имеющий других или просто нежелательных смысловых наслоений.

В последние два десятилетия изучение такого рода напряжений развивается ускоренными темпами, но в большинстве случаев это осуществляется паллиативно, адаптацией средств континуальной механики к специфике явления. Что касается наук о Земле, то в этой области дело обстоит, как и прежде, причем, в плане осмысления важности проблемы, не столь масштабно, как это было на рубеже XIX–XX вв. Достаточно сказать, что в большинстве современных сводок по геомеханике, например в фундаментальном двухтомном обзоре «Геодинамика» (Д. Тёркот, Дж. Шуберт, 1985 г.) или труде «Основы геодинамики» (Л. Шейдеггер, М.: Недра, 1987 г.), о явлении естественной энергонасыщенности или любых его смысловых эквивалентах упоминаний нет.

6.1. Основные представления кинетики разрушения, в том числе и представления Гриффитса – основоположника механики хрупкого разрушения, были сформированы на базе опытов по разрушению образцов силами, источники возбуждения которых находились вне разрушаемых образцов, главным образом в условиях одноосного растяжения. В таких опытах энергоснабжение образцов осуществлялось *по схеме последовательного энерго-*

снабжения, когда усилие последовательно передается от одного сечения к другому подобно тому, как механическое усилие передается от одного звена обычной стальной цепи к другому. Такая схема представляет собой разновидность схем *с зависимым энергоснабжением* элементов системы.

Очевидно, что разрыв в каком-либо из звеньев цепи ведет к прекращению энергоснабжения всей цепи в целом, на чем процесс ее дальнейшего разрушения и прекращается.

Общий сценарий кинетики разрушения при такой схеме энергоснабжения сводится к тому, что сначала в образце возникает множество хаотически рассеянных «начальных» трещин. На следующей стадии начинается процесс их концентрации в зоне будущего разрыва, вследствие чего формируется ослабленное сечение. Далее процесс разрушения локализуется в ослабленном сечении, трещины здесь укрупняются, сливаются и, наконец, возникает *магистральный разрыв*. С его образованием образец расчленяется на два фрагмента. Его дальнейшее разрушение прекращается. При различных нюансах в деталях этой схеме следуют практически все основные теории разрушения – теория кинетической прочности, теория лавинно-неустойчивого трещинообразования, теория множественного разрушения, дилатансно-диффузная теория и др.

6.2. Среда, содержащая фиксированные упругие деформации, в случае, когда $Q \gg L_i$, может рассматриваться как среда, содержащая множество рассеянных в ней элементарных источников упругой энергии. Такая среда представляет собой среду с *собственным, независимым, автономным энергоснабжением* ее отдельных частей (элементов), каковой и является среда энергонасыщенная.

Кинетика разрушения такой среды резко отличается от разрушения по классическому сценарию, приведенному в тезисе **6.1**, до впечатления, что природа стремилась создать два сценария, которые бы ни в чем не были похожи. Главная особенность данного сценария – это *сценарий фрагментации*, в соответствии с которым тело статистически равномерно расчленяется *трещинами отдельности* на множество отдельных фрагментов, в объемном случае – на отдельные блоки, в плоском – на отдельные полигональные площадки.

6.3. Независимое энергоснабжение может быть осуществлено и от внешнего источника энергии, в том случае если энергия подается к каждому элементу системы независимо от энергоснабжения других элементов системы. В электрических цепях такое энергоснабжение осуществляется по схеме *параллельного*

энергоснабжения. К механическим системам с подобным типом энергоснабжения относятся *двухслойные системы*, в которых передача усилия от одного слоя к другому осуществляется по всей поверхности их контакта. В лабораторных условиях подобная схема энергоснабжения была осуществлена в различных модификациях двухслойных моделей А.Н. Ромашова. Всесторонние исследования кинетики разрушения этих моделей позволили создать достаточно развитое представление об особенностях морфологии и кинетики разрушения подобных систем.

Не затрагивая здесь массив полученных результатов, отметим лишь то, что сценарии разрушения систем с автономным и параллельным энергоснабжением их элементов обладают принципиальным сходством. Двухслойные модели вследствие этого представляют собой исключительно эффективный инструмент исследования общих закономерностей процесса фрагментации, простой в изготовлении и весьма гибкий в управлении его параметрами.

6.4. В радикальное отличие от «классического» сценария, согласно сценарию фрагментации, вначале образуются **не самые небольшие трещины**, которые затем концентрируются в зоне будущего магистрального разрыва, а преимущественно **самые крупные**, сразу же расчленяющие пространство модельного материала на самые крупные части.

Образование каждой единичной трещины снимает потенциал только в узкой зоне, осевой линией которой трещина и является. Поэтому образование самых крупных трещин не прекращает энергоснабжение других частей системы, в которых со временем появляются все новые и новые трещины, чем и достигается фрагментация субстрата этой системы.

Подчеркнем следующее обстоятельство. Обычная стальная цепь не может быть прочнее ее **наименее прочного элемента**. В этом смысле системы с последовательным энергоснабжением способны к накоплению сравнительно небольшого упругого потенциала. Что же касается систем с независимым энергоснабжением – параллельным или автономным – то, хотя наиболее слабые элементы системы при поступлении в нее энергии могут разрушаться, накопление энергии в других, более прочных элементах, будет продолжаться. По этой причине предельные значения плотности энергии в отдельных элементах системы могут достигать значений, которые соответствуют прочности **самых прочных элементов**. Тем самым они, в отличие от систем с последовательным энергоснабжением, способны к накоплению исключительно высокого потенциала. Следствием этого является

то, что трещина, зародившись в энергонасыщенном субстрате системы, обычно одноактно, без остановок, прорастает до выхода на край блока материала или до встречи с другой трещиной, являясь в этом смысле именно *трещиной отдельности*.

Поскольку прорастающая трещина подпитывается энергией, «складированной» на пути своего распространения, ее образование протекает динамично, с излучением упругих импульсов, причем скорость распространения трещин может достигать скорости распространения упругих волн. Наглядным примером исключительно высокой концентрации упругой энергии в энергонасыщенной естественной среде может служить явление «стреляния» горных пород, когда от контура горной выработки самопроизвольно «отстреливаются» пластины породы, имеющие площадь всего порядка дециметра, со звуком ружейного выстрела или даже взрыва шпурового заряда взрывчатки.

Следует заметить, что в геологической натуре в различных случаях реализуются оба сценария. Кроме того, широко распространены случаи, когда разрушение следует гибридным сценариям, сочетающим в разной степени оба указанные сценария. Но экспериментальные и теоретические исследования в своем подавляющем большинстве ориентированы на разрушение, протекающее по схеме последовательного энергоснабжения.

6.4. Традиционный аналитический аппарат может быть использован в физической энергомеханике в ограниченных пределах. Поэтому возникает вопрос об аналитических методах, адекватно отвечающих ее основным положениям. В главных чертах такой аппарат уже существует. Это *теория разгрузки потенциальных функций*. Изложение данной теории и примеры ее применения можно найти в работе С.А. Зимова (1992 г.). Здесь же мы кратко изложим ее суть.

Под *потенциальной функцией* понимается меняющаяся во времени пространственная функция, характеризующая некоторый потенциал пространства – способность совершать или побуждать действие $E_x = f(x, T)$. В нашем случае – это поле плотности энергии, обусловленной наличием фиксированных упругих деформаций.

Максимальные значения потенциальной функции не могут превышать некоторые пороговые значения, свойственные каждой точке рассматриваемого пространства, т.е. свойства пространства характеризуются некоторой *пороговой функцией* $P_x = f(x, T)$. В нашем случае – это поле энергетической прочности среды. Под энергетической прочностью понимается предельная плотность упругой энергии – e, которую субстрат может накопить в единице своего объема без разрушения.

Потенциальную и пороговую функции можно объединить в одну *порогово-потенциальную функцию* в виде $f(E_x, P_x) = E_x - P_x$. Эта функция не имеет положительных значений. По мере роста значений потенциальной функции или снижения значений пороговой функции значения суммарной функции возрастают – кривая (E_x, P_x) приближается к нулю. Первый структурный элемент появится в момент, когда эта функция примет нулевое значение.

Итак, пока $P_x > E_x$ структурные элементы не образуются. Но если со временем значения P_x в какой-либо точке (области) пространства достигнут уровня E_x, то в этой точке (области) возникает структурный элемент; в нашем случае – трещина. Появление структурного элемента влечет за собой уменьшение потенциала в этой точке и ее близкой окрестности – локальную «разгрузку» потенциальной функции, выражающуюся в локальном высвобождении упругой энергии. Образование следующего элемента возможно в любой точке системы за вычетом разгруженных областей. В конечном счете разгрузка поля потенциальной функции ведет к возникновению структурного рисунка, который предопределен конфигурацией исходных значений функций в пространстве системы.

7.1. Одним из упрощений физических представлений, модифицированных к требованиям континуальной механики, явилось неявно выраженное представление, что время релаксации напряжений не зависит от размеров релаксирующей системы, вопреки одному из основных положений статистической физики, согласно которому время релаксации системы зависит от ее размера. Установлено, что для жидкостей и газов время релаксации, т.е. время, характеризующее скорость перехода системы к равновесию, возрастает с увеличением размеров системы, притом не линейно, а пропорционально квадрату ее размера.

7.2. Мы, исходя из натурных наблюдений и специальных экспериментальных исследований, применительно к твердым телам разработали *модель зонной релаксации*. Суть ее проста. При разгрузке блока среды, до этого находившегося в равновесном состоянии, процесс релаксации начинается не сразу во всех точках блока по всему его объему, а вначале сосредотачивается на разгруженной периферии блока, в *зоне* разгрузки. Ядро блока остается в реликтовом, равновесном состоянии. Лишь затем, по мере развития процесса релаксации, в этот процесс начинают втягиваться части блока, более удаленные от поверхности разгрузки. В результате время перехода в новое равновесное состояние блока в целом оказывается **на порядки** больше времени релаксации, определяемого традиционными методами применительно к образцам материала блока.

7.3. В геологической среде структуры, образование которых следуют сценарию зонной релаксации, выражаются в форме зон дезинтегрированного материала, облекающих массивы пород согласно конфигурации поверхностей разгрузки. Так, это могут быть системы трещин разгрузки, огрубленно повторяющие профиль речных долин, котлованов и т.п. Таковы же по природе и зоны дезинтегрированного материала вокруг горных выработок. Мы показали, что тому же *универсальному структурному стереотипу*, но уже на другом масштабном уровне, подчинено и распределение сейсмичности по разрезу континентальной земной коры.

Основной особенностью стереотипа является постепенная, примерно экспоненциальная убыль числа трещин отдельности при движении по нормали от поверхности разгрузки в глубину массива.

8.1. Настоятельную необходимость возврата к основополагающим началам физики при исследованиях механического поведения твердых тел проиллюстрируем еще на таком примере.

В континуальной механике проигнорировано «зернистое» строение вещества на атомно-молекулярном уровне. Из этого, в частности, следует распространенное представление, что горные породы, вследствие веса налегающих пород на определенной глубине, устанавливаемой теоретически, переходят в пластическое состояние и что ниже определенной глубины в них невозможно образование трещин хрупкого отрыва.

Согласно основной концепции физического материаловедения, высокое внешнее давление изменяет атомное строение твердого тела. В частности, оно меняет межатомные расстояния и выталкивает электроны из их обычных атомных уровней. Это, в свою очередь, влечет за собой изменение энергетической структуры сжатых молекул и атомов, выраженное изменением их фононных спектров, межатомных взаимодействий и т.п. Обобщая, можно сказать, что внешнее давление, действующее на вещество, уравновешивается упругим сопротивлением электронной структуры атомов, из которых оно состоит. При этом электронные оболочки атомов упруго деформируются, т.е. возрастает потенциальная энергия упругих деформаций атомов, или, кратко, их *упругая энергия*. С точки зрения физической энергомеханики атомы представляют собой *упругие тела*.

8.2. В процессе формирования вещество как макроскопическая конструкция подвергается «сборке» из частиц на атомно-молекулярном уровне, **уже уравновешенных с внешним давлением**. «Сборка» структурных образований на надмолекулярном уров-

не, будь это живые существа или минералы, осуществляется из уравновешенных частиц, принявших на себя всю тяжесть внешнего давления. Вследствие этого надмолекулярная структура горной породы оказывается ненагруженной. Такая горная порода как структурная композиция «не ощущает» действующего на нее высокого давления, подобно тому как глубоководная рыба как организм, как конструкция не ощущает давления, в условиях которого она сформировалась, притом каким бы высоким оно ни было.

8.3. Будем называть давление, при котором формируется структурная композиция, независимо от того биологическая это композиция или неорганическая, *номинальным давлением*.

При номинальном давлении энергия упругого сжатия, «закачанная» в атомы, на уровне надмолекулярных композиций не дает о себе знать, как и атомная энергия. Но это верно только по отношению к геологическому бытию структур в номинальных условиях.

При уменьшении номинального давления, т.е. в условиях разгрузки, упругая энергия, «закачанная» этим давлением в деформации электронной структуры атома, начинает «перетекать» в более высокие, надмолекулярные этажи структурной композиции. Теперь в надмолекулярных структурных связях возникают упругие деформации, обусловленные тем, что эти связи препятствуют свободному упругому расширению вещества. Этим они как своеобразная плотина удерживают упругую энергию в веществе. По мере уменьшения давления плотность упругой энергии, поступающей из внутриатомных источников в верхние структурные этажи вещества, продолжает возрастать. Если ее плотность достигнет некоторого порогового значения, то вещество переходит в метастабильное состояние, оно становится энергонасыщенным.

8.4. Из очерченного здесь представления, учитывающего упругие свойства частиц на атомно-молекулярном уровне и обмен энергией между разными структурными этажами вещества, вытекает множество следствий, которые на первый взгляд кажутся неожиданными. В частности, в условиях номинального давления, каким бы оно высоким не было, в механическом отношении вещество должно вести себя примерно так, как и вещество, сформировавшееся вблизи земной поверхности. Вместе с тем очевидно, что исследование такого рода следствий в рамках континуальных представлений невозможно в принципе. Оно является предметом рассмотрения физической энергомеханики.

Мы здесь затронули далеко не все положения, которые в своем развитии могут составить содержание физической энергомеханики и предопределить пути ее дальнейшего развития. В нашу цель входило лишь очертить примерный контур этой концепции и ее место в системе других подразделений МДТТ.

В завершение подчеркнем: представления физической энергомеханики не являются альтернативой представлениям, сложившимся под эгидой континуальной механики, как это иногда воспринимается. Речь идет не о разных методах исследования одних и тех же объектов, а об исследовании различных по природе объектов (или разных сторон этих объектов), для чего естественным образом используются и разные методы.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие (Ю.Г. Леонов) 5

Введение 8

Глава 1
Вводные сведения 11
1-1. Общее представление об энергонасыщенности геологической среды 11
1-2. Близкие представления 14
1-3. Проблематика 18
1-4. Нововведения 20
1-5. Фиксированные упругие деформации 23
1-6. Энергонасыщенность и механика сплошной среды 28
1-7. Генеалогия проблемы энергонасыщенности 34

Глава 2
Основания представлений об энергонасыщенности 48
2-1. Термодинамические основания 48
2-2. Релаксация 54
2-3. Системы возбуждения латентных напряжений 62
2-4. Механизмы возбуждения латентных напряжений 78
2-5. Особенности напряженного состояния, обусловленного латентными напряжениями 85

Глава 3
Разрушение энергонасыщенной среды 103
3-1. Общие подходы к проблеме разрушения 103
3-2.Влияние латентных напряжений 113
3-3. Разрушение в условиях земных недр 125
3-4. Хрупкое последействие 142

Глава 4
Разрушение по сценарию фрагментации 160
4-1. Энергетический подход 161
4-2. Модельные исследования 170
4-3. Одномерная модель 175
4-4. Двумерные модели 189
4-5. Морфология систем трещин отдельности 191
4-6. Кинетика образования системы трещин 197
4-7. Статистики процесса фрагментации 200
4-8. Динамическое разрушение 205

Глава 5
Структура и формирование зон разгрузки 218
5-1. Зонная релаксация 219
5-2. Структура зон разгрузки 223
5-3. Формирование зон разгрузки 227
5-4. Зоны разгрузки в геологической среде 238

Глава 6
Тектоника и сейсмичность 253
6-1. Тектонические силы и тектонические трансформации 254
6-2. Проблема «сейсмичность – асейсмичность» 257
6-3. Деструкция среды в сейсмическом отображении 260
6-4. Тектонические системы 284
6-5. Энергетическая структура земной коры 297
6-6. Геодинамические аспекты 314

Заключение 337

Литература 342

Приложение. Тезисы к обоснованию физической энергомеханики 356

CONTENTS

Editor's preface (*Yu.G. Leonov*) 5

Introduction 8

Chapter 1
Introductory information 11
1-1. Common conception about energy saturation of geological medium 11
1-2. Different conceptions about energy saturation 14
1-3. Range of Problems 18
1-4. Innovations 20
1-5. Fixed elastic deformations 23
1-6. Energy saturation and mechanics of continuous medium 28
1-7. Genealogy of the energy saturation problem 34

Chapter 2
Foundations of conceptions about energy saturation 48
2-1. Thermodynamics foundations 48
2-2. Relaxation 54
2-3. Systems of latent stresses excitement 62
2-4. Mechanisms of latent stresses excitement 78
2-5. Particularities of stress state conditioned by latent stresses 85

Chapter 3
Destruction of energy saturated medium 103
3-1. Common approaches to the problem of destruction 103
3-2. Influence of latent stresses 113
3-3. Destruction in conditions of the earth interior 125
3-4. Fragile after-action 142

Chapter 4
Destruction according to scenario of fragmentation 160
4-1. Energy approach 161
4-2. Pattern investigations 170
4-3. One-dimensional pattern 175
4-4. Two-dimensional patterns 189
4-5. Morphology of slip joint systems 191
4-6. Kinetics of cracks formation systems 197
4-7. Statistics of fragmentation process 200
4-8. Dynamical distruction 205

Chapter 5
Structure and formation of unload discharge zones 218
5-1. Zone relaxation 219
5-2. Structure of discharge zones 223
5-3. Forming of discharge zones 227
5-4. Discharge zones in geological environment 238

Chapter 6
Tectonics and seismicity 253
6-1. Tectonic forces and tectonic transformations 254
6-2. Problem «seismicity – aseismicity» 257
6-3. Destruction of medium in seismic reflection 260
6-4. Tectonic systems 284
6-5. Energetic structure of the Earth crust 297
6-6. Geodynamic aspects 314

Conclusion 337

Literature 342

Supplement. Tesies to foundation of physical energymecanic 356

Responsible Editor
Yu.G. Leonov, Dr. Sc. (Geology & Mineralogy)

Editorial Board:
V.G. Leonov (Editor-in-Chief), *Yu.O. Gavrilov*, *Yu.V. Karyakin*, *M.A. Akhmetiev*, *K.E. Degtyarev*, *Yu.G. Leonov*, *M.A. Semikhatov*, *S.D. Sokolov*, *M.D. Khutorskoy*

Reviewed by:
M.A. Goncharov, Dr. Sc. (Geology & Mineralogy),
V.G. Trifonov, Dr. Sc. (Geology & Mineralogy)

Transactions of the Geological Institute / Geological Inst. of RAS. – Moscow : Publishers of the USSR Academy of Sciences, 1932–1964. – Moscow : Nauka, 1964– . – ISSN 0002-3272.

Vol. 582 : Energy saturation of geological medium / V.S. Ponomaryov; [ed. by Yu. G. Leonov]. 2008. – 379 p. – ISBN 978-5-02-036642-8 (in cloth).

Geological medium is capable to transform the different types of energy to potential energy of elastic deformations and to form at the expense that its own energetic potential up to transform the medium into strongly non-equilibrium energy – saturated condition. The investigation of mechanics of energy-saturated medium caused the advent of system qualitatively new notions, such as fixed elastic deformations, zone relaxation, brittle after-effect, structural stereotypes of energetical off-loading zones, dependance of failure mode from type of energy supply and so on. The state of geological medium over value of accumulated elastic energy is the important bat little understood its fundamental characteristics. The conceptions on energy saturation of a geological medium developed in the book leads to a basically new viewpoint to the nature of seismic and tectonic processed and is related to a broad range of phenomena and practical problems studied by Earth sciences.

The book is for use by geologists, geophysicists and mining engineers of broad profile.

Научное издание

Пономарев Виталий Стефанович

ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОСТЬ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Труды Геологического института РАН
Вып. 582

Утверждено к печати
Редакционной коллегией
Геологического института
Российской академии наук

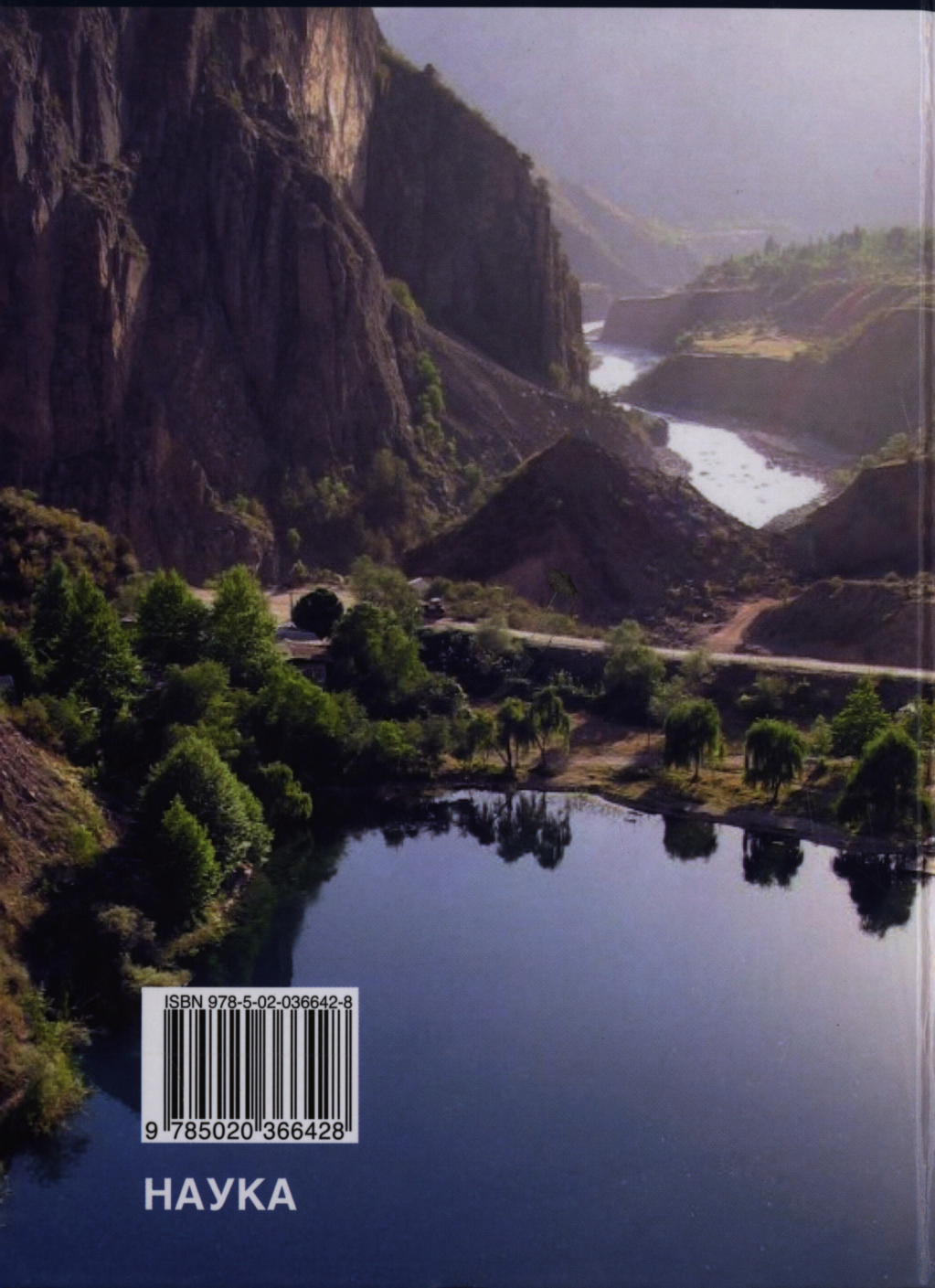
Зав. редакцией *М.В. Грачева*
Редактор *И.С. Власов*
Художник *Ю.И. Духовская*
Художественный редактор *В.Ю. Яковлев*
Технический редактор *О.В. Аредова*
Корректоры *Р.В. Молоканова,*
А.В. Морозова, Т.И. Шеповалова

Подписано к печати 17.07.2008
Формат 60 × 90 1/16. Гарнитура Таймс
Печать офсетная
Усл.печ.л. 24,0. Усл.кр.-отт. 24,5
Уч.-изд.л. 24,5. Тип. зак. 3465

Издательство «Наука»
117997, Москва, Профсоюзная ул., 90
E-mail: secret@naukaran.ru
www.naukaran.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ГУП «Типография «Наука»
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

ТРУДЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА



ISBN 978-5-02-036642-8

НАУКА