

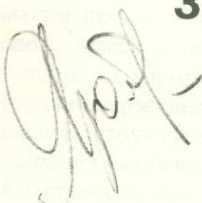
**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
РАЗРУШЕНИЯ
ГОРНЫХ ПОРОД
при
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ**

«Наука»

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
МЕЖДУВЕДОМСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СЕЙСМОЛОГИИ
И СЕЙСМОСТОЙКОМУ СТРОИТЕЛЬСТВУ

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
РАЗРУШЕНИЯ
ГОРНЫХ ПОРОД
при
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ**

18837



Ответственные редакторы:
академик М.А. САДОВСКИЙ,
доктор физико-математических наук,
профессор Г.А. СОБОЛЕВ



МОСКВА "НАУКА"

1987



Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях.
М.: Наука, 1987. 128 с.

В сборнике представлены работы, в которых излагаются подходы к проблеме прогноза динамических явлений в горных породах, разрабатываемые механиками, физиками, сейсмологами и геологами. Рассмотрены вопросы теории, лабораторного эксперимента и результаты натурных наблюдений в сейсмоактивных районах.

Для геофизиков, горняков, геологов и специалистов по физике разрушения.

Рецензенты:

А.И. Савич, О.Г. Шамина

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящий сборник вошли заказные доклады, сделанные на Второй Всесоюзной школе-семинаре "Физические основы прогнозирования разрушения горных пород", состоявшейся в пос. Долинка на Иссык-Куле в сентябре 1985 г. Ставшие уже традиционными семинары с приглашением физиков, механиков, сейсмологов и горняков дают возможность выявить общность и различие подходов к проблемам разрушения, развиваемых в этих отраслях науки, и определить в процессе дискуссий ценность того или иного взгляда на проблему предсказания динамических явлений в горных породах, таких, как землетрясения, горные удары, обрушения и др.

В результате исследований последних лет стало очевидным, что для понимания процесса деформирования, разрушения и восстановления свойств горного массива необходимо проводить взаимосогласованные измерения разнообразными физическими методами на разном масштабном уровне. Первостепенное значение при этом имеют задачи выявления дискретности строения, структуры среды и ее изменчивости во времени, накопления и диссипации различных видов энергии.

Комплекс таких задач может быть решен при совместном использовании методов, развитых в физике, сейсмологии и горном деле.

Материал настоящего сборника подразделяется на три раздела. В первом из них обсуждаются теоретические вопросы деформирования и разрушения сред применительно к задачам сейсмологии. Второй раздел посвящен лабораторным исследованиям процессов подготовки динамических явлений, в третьем излагаются результаты полевых наблюдений.

В I разделе обосновывается идея автомодельности сейсмических процессов, повторяющих себя на различном масштабном уровне. Такая концепция хорошо объясняет эмпирически наблюдаемую независимость величины плотности сброшенной во время землетрясений упругой энергии от магнитуды последних. Одним из подтверждений концепции является существование закономерности, описывающей время подготовки землетрясений как функцию размера очага. Автомодельность сейсмических процессов предполагает существование масштабного подобия протекающих в горных породах процессов самоупорядочения структур. Сам принцип автомодельности сейсмических явлений и соответствующих структурных превращений не вызывает сомнений. В то же время закон иерархии (соподчиненности) сейсмических явлений разного энергетического уровня требует тщательного изучения, как определяющий кинетику развития очагов землетрясений и других динамических явлений.

Интенсивно исследуемые в физике твердого тела вопросы кооперативных эффектов при пластической неустойчивости и трещинообразовании

пока не привлекли должного внимания сейсмологов. В то же время важность эффектов локализации разрушения и торможения на препятствиях уже хорошо понята и используется в исследованиях по физике очага землетрясения.

Развитие идей кинетической концепции прочности позволило выявить согласующиеся с экспериментом закономерности энергосвыделения при разрушении элементов нагруженной иерархической системы. Установлена независимость вероятности разрушения и выделения соответствующей доли энергии от структурного уровня. Ряд получаемых из термодинамических представлений количественных выводов, в частности прогнозные алгоритмы, требуют своей тщательной проверки в сейсмологической практике.

Классические подходы типа энергетического критерия разрушения, относительно новые разработки по локализации и системам разрушения в дилатирующих средах также могут с успехом использоваться в некоторых задачах сейсмологии и горного дела. Следует, однако, заметить, что классические подходы механики сплошной среды развиты для пород, находящихся в докритическом состоянии, тогда как сейсмологи часто имеют дело с подвижками по сформированным разрывам, а сам массив находится в запредельном состоянии.

В конце I раздела поднимаются вопросы учета внутренних сил как основы перестройки структур. Этот подход пока серьезно не обсуждался применительно к сейсмологическим задачам.

Во II разделе обсуждаются результаты лабораторных исследований, посвященных изучению процесса подготовки и предвестников динамических явлений. К наиболее важным результатам можно отнести обоснование закономерной миграции деформаций при подготовке и развитии разрыва и мозаичности распределения предвестников динамических явлений. Последнее связывается с возникновением в материале областей разной жесткости при иерархическом росте разрывов. Показано, что, используя комплекс предвестников и площадные системы наблюдений, можно надежно выявлять стадии формирования разрывов и осуществлять в долгосрочном аспекте прогноз разрушения больших блоков.

Большое внимание уделено экспериментальному обоснованию подобия параметров акустической (сейсмической) эмиссии для лабораторных образцов, массивов пород в шахтах и сейсмоактивных районов. Подобие графиков повторяемости, распределений скорости накопления трещин во времени, коэффициентов вариации времен ожидания динамических явлений согласуется с ранее высказанной гипотезой об автомодельности сейсмических процессов.

На большом экспериментальном материале рассмотрена зависимость дисперсности и локализованности разрушения. Показано, что, несмотря на качественное подобие протекающих на разном уровне процессов деформирования, масштабный эффект влияет на количественные характеристики прочности, предельной деформации, параметры акустической эмиссии.

В составляющих III раздел статей сборника прослеживаются две тенденции. Первая состоит в том, что реальные сейсмологические и геологические данные в целом согласуются с общими идеями физики деформирования и разрушения твердых тел, сформулированными на основании теоре-

тических и лабораторных исследований. Это проявляется в эмпирических зависимостях времени проявления предвестников от энергии землетрясений, изменениях сейсмического режима перед газодинамическими явлениями, применимости концентрационного критерия к геологическим объектам.

В то же время результаты натурных наблюдений показывают, что геолого-тектонические условия района накладывают отпечаток на конкретное проявление общих закономерностей и должны в ряде случаев учитываться. Так, обнаруживается связь типов сейсмического режима с вещественным составом и структурой глубин Земли. Существует зависимость между временем проявления предвестника и эпицентральной расстоянием.

Интересна мысль, высказанная в заключительной работе сборника. Авторы предлагают создать модели сейсмического процесса нескольких иерархических уровней, высший из которых описывает общие, независимые от масштаба и конкретных геологических условий, закономерности. Модели более низких уровней должны разрабатываться по мере необходимости и наличия экспериментальных данных для конкретных регионов и объектов.

Конечно, при всей плодотворности совместного подхода к проблеме сейсмичности специалистами разных наук, что составляет главное идеологическое содержание настоящей книги, смело можно сказать, что мы находимся в самом начале пути создания физически обоснованной теории очага землетрясения и предвестников.

Мало исследованы такие вопросы, как взаимодействие в земных недрах различных полей и видов энергии; фазовые переходы; деформирование, разрушение и консолидация вещества Земли в условиях ползучести; влияние внутрипоровых давлений, химически агрессивной среды и многие другие.

Практически не исследуется идея самоорганизации открытых систем материальных отдельных под действием поступающей в них энергии извне.

Недостаточно развиваются исследования динамики вещества Земли с помощью наблюдения электромагнитных процессов, возникающих при различных механических воздействиях.

Надеемся, что поднятые в настоящем сборнике проблемы, во многом дискуссионные, будут способствовать дальнейшему прогрессу сейсмологии, горного дела и физики Земли в целом.

академик *М.А. Садовский*
профессор *Г.А. Соболев*

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ СЕЙСМИЧНОСТИ

УДК 550.343.6

М.А. Садовский

АВТОМОДЕЛЬНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

За последние десятилетия техника геофизического эксперимента, в частности сейсмологического, получила чрезвычайное развитие. Помимо общего роста чувствительности и точности приборов для полевых и лабораторных наблюдений, невероятно выросли возможности средств обработки и анализа их результатов. Известно, что в основе всех этих успехов лежит развитие электроники, обеспечивающей создание новых точных и чувствительных датчиков, устройств автоматизации их обслуживания и сбора результатов, передачи результатов на обрабатывающие центры и, наконец, ЭВМ для обработки и анализа произвольно больших массивов опытных наблюдений.

Естественно, что результатом огромного роста возможностей геофизических исследований явилось установление ряда фактов, не укладывающихся в рамки ранее выработанных представлений о строении и жизни нашей планеты. Многие из этих представлений приходится ныне пересматривать, а иногда и просто отбрасывать. В целом вопросы эти заслуживают специального рассмотрения и не могут быть детально освещены в статье. Поэтому мы ограничимся лишь обсуждением новой модели геофизической среды. Результаты последних исследований убедительно показали, что принятая в настоящее время сплошная линейно-упругая модель хорошо приспособлена для описания процессов распространения упругих волн, однако бессильна при объяснении процессов, протекающих в очаге землетрясений. Попытки ее усовершенствования мало эффективны также при рассмотрении задач о возникновении электромагнитных процессов, сопровождающих землетрясения. Ограничено ее использование для лабораторного моделирования геодинамических процессов, а также при описании воздействия различных физических полей на свойства горной породы.

Все это позволяет думать, что одним из фундаментальных направлений развития геофизической науки должна быть разработка новой модели геофизической среды. По-видимому, такой вывод особенно справедлив для сейсмологии, изучающей процессы нарушения структуры горной породы, ее разрушения.

Работы в области создания новой модели геофизической среды находятся на ранней стадии, однако уже сейчас имеются результаты, позволяющие рассчитывать на возможность их использования не только в практике научных исследований, но и в народном хозяйстве.

Так, изучение дискретности горной породы [1–3] привело к выводу о возможности представления ее в виде открытой системы блоков разного масштаба, образующих иерархическую последовательность отдельностей "преимущественных" размеров, описываемую геометрической прогрессией с показателем K , значения которого варьируют в узком интервале от 2 до 5.

Было установлено, что значение K в первом приближении не зависит ни от масштаба, ни от физико-химических свойств горной породы, ни от природы процессов, образующих структуру системы (природное трещинообразование, дробление подземными взрывами, размол на мельницах и т.п.).

На основе изложенного было высказано предположение о том, что процессы структурообразования горной породы в любых масштабах (от образования мельчайших песчинок до континентальных плит) должны быть автомодельны. Представлялось интересным рассмотреть некоторые сейсмологические следствия, вытекающие из этого предположения.

Автомодельность процессов, происходящих в очагах землетрясений разного масштаба (различной силы), предполагает существование определенных зависимостей между размерами очага и энергией этих процессов. Мы под сейсмическим очагом подразумеваем блок горной породы (или группу блоков), потерявший устойчивость в процессе самоорганизации системы горной породы. Размеры такого очага отождествляются с размерами области, охваченной афтершоками [3]. В каталогах землетрясений сила их определяется магнитудой M , связанной с энергией E_c сейсмических волн соотношением

$$\lg E_c = 1,5 M + 11,8 ,$$

где E дается в эргах.

Размеры зоны афтершоков обычно задаются длиной L_1 и шириной L_2 проекции этой зоны на поверхность Земли. Для упрощения мы принимаем, что объем V_c области афтершоков равен

$$V_c = (L_1 - L_2)^{3/2} = L^{-3} .$$

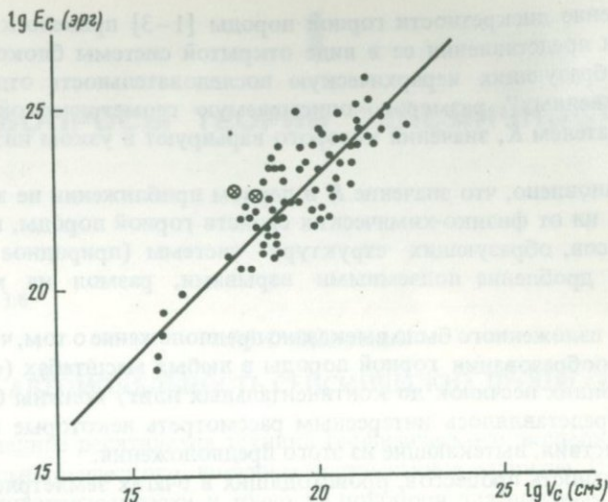
Различные авторы предлагают несколько отличающиеся, но достаточно близкие соотношения E_c и V_c . Мы используем отношение вида

$$\lg E_c = \lg V_c + 3 (E_c [\text{эрг}], V_c [\text{см}^3]), \quad (1)$$

полученное на основе обработки данных более чем сотни землетрясений, происходивших на всем земном шаре. Отметим, что точно такую же формулу предложил ранее японский сейсмолог Касахара.

На рис. 1 представлены эта зависимость и точки, отвечающие опытным значениям $\lg E_c$ и $\lg V_c$. Заметный разброс полученных из опыта значений энергии и объема вполне естествен, если учесть, что приведенные данные соответствуют таким различающимся в геолого-географическом отношении районам, как Курило-Камчатский, Среднеазиатский, Кавказский, Калифорнийский, Новозеландский и др. Важно то, что в первом приближении для всех этих районов средняя плотность энергии упругих волн постоянна и равна 10^3 эрг/см³.

Существование иерархической последовательности "преимуществен-



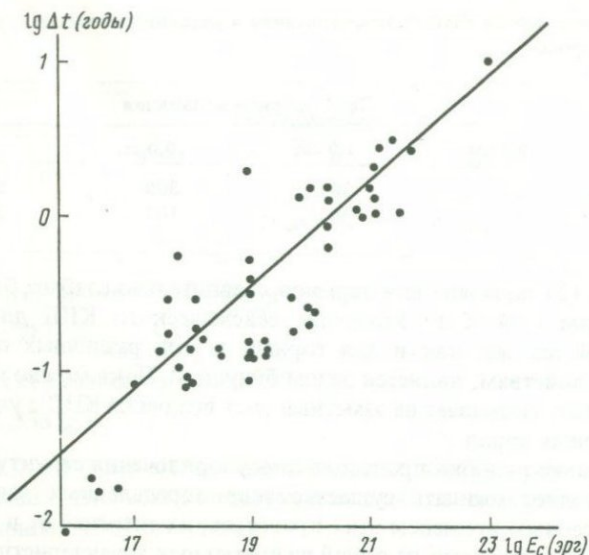
Р и с. 1. Зависимость сейсмической энергии от объема очага землетрясения

Точками отмечены опытные определения для природных землетрясений; крестиками — данные для взрыва Бенхем

ных” размеров объясняет независимость (слабую зависимость) землетрясения от физико-химических свойств горной породы. Не исключено, что на процесс излучения сейсмической энергии могла бы влиять также и скорость поступления в систему энергии извне. Однако полученные результаты указывают на то, что и скорость поступления энергии извне, зависящая от градиентов теплового потока и сейсмического течения, не оказывает влияния на предельную плотность излучаемой энергии. Можно, правда, предположить, что скорость эта практически одинакова во всех точках земного шара. Вспоминая, что образование ”преимущественных” размеров наблюдается не только в природных условиях, для которых характерны большие продолжительности процессов, но и в техногенных, практически мгновенных (размол на мельницах, взрыв), следует, по-видимому, остановиться на предположении о независимости предельной плотности упругой энергии землетрясения от скорости втекания в систему энергии извне.

Этот вывод кажется несколько неожиданным. В сейсмологии принято различать очаги разной природы — сбросовые, надвиговые и др. Известно, что от природы очага зависит спектральный состав излучаемых волн, изменяются, например, макросейсмические проявления землетрясения на поверхности Земли. Однако противоречий здесь нет, так как не зависит от природы очага только полное количество излученной энергии, а не ее характер и действие на окружающий мир. Таким образом, изучение природы различных сейсмических очагов по-прежнему необходимо для решения задач инженерной сейсмологии.

Пытаясь искать не различия, а общие свойства очагов землетрясений, происходивших в любых регионах Земли, мы получили соотношения, связывающие основные физические величины: энергию, размеры и времена, характеризующие землетрясения. Оказалось, что в первом приближении



Р и с. 2. Зависимость времени сейсмических предвестников землетрясений от их сейсмической энергии

землетрясения не зависят от места и строения земной коры, т.е. свойства очага при этом могут не учитываться. Это обстоятельство навело на мысль о том, что коль скоро энергия сейсмических колебаний определяется только размерами очага, то возможно сопоставлять данные, полученные при естественных, природных землетрясениях с данными землетрясений техногенных, например производимых подземными взрывами, для которых хорошо известна полная энергия, выделяемая в очаге.

Мы не умеем определять полную энергию E , выделяющуюся при природных землетрясениях. Для взрывов же она хорошо известна, имеется ряд формул, выражающих зависимость E_c сейсмической энергии взрыва от его полной энергии E . Для примера приведем типичную зависимость, полученную И.П. Пасечником:

$$\lg E_c = 1,2 \lg E - 6,6. \quad (2)$$

В литературе [7] имеются данные о сейсмике американских подземных ядерных взрывов. Так, для взрыва Бенхем, мощностью в 1,1 Мт ($E = 4,6 \cdot 10^{22}$ эрг), приводятся данные о размерах зоны афтершоков. Из данных следует, что объем сейсмического очага для этого взрыва равнялся $3,4 \cdot 10^{18}$ см³. Определяя по формуле (2) значение сейсмической энергии E_c для взрыва Бенхем и рассчитывая через нее по формуле (1) объем соответствующего ей сейсмического очага V_c , получаем $V_c = 8 \cdot 10^{17}$ см³, т.е. величину того же порядка, что и в опыте. Точка, отвечающая взрыву Бенхем, нанесена на рис. 1 крестиком.

Произведя соответствующие расчеты по формулам (1) и (2), можно убедиться в том, что сейсмический КПД измеряется долями процента для слабых землетрясений и до десятка процентов для сильных. Однако, вероятно, КПД сильных землетрясений на самом деле существенно ниже, так

Времена предвестников слабых землетрясений и разрушений лабораторных образцов горной породы

Δt	Лабораторные испытания			
	0,1 см	1,0 см	10,0 см	100 см
По формуле (3)	3 с	30 с	300 с	50 мин
Опыт	1 с	30 с	100 с	30 мин

как формула (2) получена для взрывов сравнительно слабых, отвечающих землетрясениям с $M < 6$. Уточнение сейсмического КПД для сильных землетрясений так же, как и для горных пород, различных по физико-химическим свойствам, является делом будущего. Пока можно утверждать только, что опыт указывает на заметный рост величины КПД с увеличением плотности горных пород.

Существование подобия процессов самоупорядочения структуры горной породы позволяет ожидать существование определенных зависимостей между характерным временем этих процессов, их энергией E_c и размерами \bar{L} . Мы остановимся только на одной из временных характеристик — времени Δt предвестников землетрясения [5].

В литературе имеется большое количество определений этих времен. Данные о них, собранные в книге "Предсказание землетрясений" Рикитаке [6], характеризуются большим разбросом, исключающим возможность установления зависимости средней величины Δt от E_c . Это и неудивительно, так как относятся они к предвестникам различной физико-химической природы. Если отобрать из них предвестники, связанные только с процессами в сейсмическом очаге, то оказывается возможным построить зависимость Δt от сейсмической энергии E_c . К числу предвестников, связанных непосредственно с процессами в очаге, относятся, например: изменение скоростей распространения упругих волн, электрической проводимости, микросейсмические предвестники, анизотропия и т.п., свидетельствующие о начале необратимых нарушений структуры горной породы.

В результате обработки опытных данных было установлено, что среднее значение величины $\lg \Delta t$ связано с $\lg E_c$ зависимостью вида

$$\lg \Delta t = \frac{1}{3} \lg E_c - 7 = \lg \bar{L} - 6, \quad (3)$$

графически изображенной на рис. 2.

Полученное соотношение, по существу, определяет интервал времени от момента появления первых признаков необратимых изменений структуры горной породы до ее окончательного разрушения. Интересно сопоставить результаты расчетов по формуле (3) с оценками времени Δt , вытекающими из деформационных предвестников землетрясений, найденных А.А. Никоновым [7] для районов Тихого океана и Средиземного моря, описываемых соответственно следующими формулами:

$$\lg \Delta t = 0,57 M - 3,2 = 0,38 \lg E_c - 7,6,$$

$$\lg \Delta t = 0,56 M - 2,9 = 0,37 \lg E_c - 7,3.$$

Землетрясения				
$2 \cdot 10^3$ см	10^4 см	$4 \cdot 10^4$ см	$2 \cdot 10^5$ см	10^6 см
20 ч	4 дн.	15 дн.	2 мес.	1 год
—	—	30 дн.	40 дн.	13 мес.

Считая, что, по А.А. Никонову, в среднем

$$\lg \Delta t = 0,37 \lg E_c - 7,5,$$

и сравнивая его зависимость с нашей:

$$\lg \Delta t = 0,333 \lg E_c - 7,$$

мы видим, что в среднем, по Никонову, получаются времена, в 2–3 раза большие наших, что нельзя считать сколько-нибудь заметным отклонением, учитывая приближенность оценок.

В этих же пределах лежат и оценки времени, полученные по методу долгосрочных прогнозов, разработанному В.И. Кейлис-Бороком и его сотрудниками в Институте физики Земли АН СССР.

Формула (3) была построена по данным о землетрясениях с энергиями E_c от 10^{17} до 10^{24} эрг, отвечающими размерам очага, лежащим в пределах $5 \leq \bar{L} \leq 100$ км.

Если принять во внимание, что процессы самообразования структур в системе горной породы автомодельны, то приведенная формула может быть использована для оценки времен разрушения объектов существенно меньших масштабов, таких, например, которые характерны для лабораторных экспериментов. Конечно, в этом случае возникают трудности с оценкой размера очага разрушения, аналогичного очагу землетрясения. Однако если не стремиться к высокой точности, размеры \bar{L} в этом случае можно было бы принять лежащими в сантиметровых масштабах. В этом случае времена Δt , протекающие от момента появления первых необратимых признаков до полного разрушения, оказываются лежащими в промежутке от 30 до 300 с. По данным Г.А. Соболева, опытные наблюдения определяют значения Δt секундами и минутами.

По данным, полученным сотрудниками Физико-технического института АН СССР, были оценены времена Δt для объектов миллиметрового масштаба. В этом случае опыт и расчет дают соответственно значения Δt , равные 1 и 3 с.

Некоторые результаты сравнения расчетных и опытных определений Δt для лабораторных испытаний и слабых ($8 \leq K \leq 11$) землетрясений приведены в таблице.

Можно заметить, что опытные и расчетные определения величины Δt более чем удовлетворительно совпадают, если учесть вероятностный характер самих процессов землетрясения и разрушения образцов. Нет сомнений в том, что значение изложенных выше результатов состоит не только в том, что они позволяют заранее давать правильные оценки некоторых опытных результатов. Подтверждая приемлемость новой блочно-иерархической

модели горной породы для объяснения процессов трансформации и перераспределения энергии, поступающей в горную породу, они открывают новые общие пути в исследовании бесконечно многообразной жизни Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовский М.А. О естественной кусковатости горных пород // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247, № 4. С. 829.
2. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. О свойствах дискретности горной породы // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 12. С. 3–18.
3. Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Штейнберг В.В. О зависимости энергии землетрясений от объема сейсмического очага // Докл. АН СССР. 1983. Т. 271, № 3. С. 598–602.
4. Садовский М.А., Пасечник И.П., Кедров О.П. О сейсмической энергии и объеме очагов при прикорковых землетрясениях и подземных взрывах // Там же. 1985. Т. 283, № 5. С. 1153–1156.
5. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. О зависимости времени подготовки землетрясения от его энергии // Там же. 1983. Т. 271, № 2. С. 330–333.
6. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 388 с.
7. Никонов А.А. Голоценовые и современные движения земной коры. М.: Наука, 1977. С. 215–236.

УДК 539.4

В.И. Владимиров

ОСНОВЫ ФИЗИКИ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Нет принципиальных отличий в кинетике процесса разрушения горных пород и других твердых тел, например конструкционных материалов. Поэтому основы физического подхода к пластической деформации и разрушению для твердых тел одинаковы. В работе изложены основы физики разрушения и ее возможные особенности для горных пород (по материалам [1–4]).

1. Горные породы как твердое тело. Если подходить к горным породам с представлениями, разработанными для конструкционных материалов, то они представляют собой композит со следующим набором свойств.

1. Сочетания слоев кристаллических и аморфных. Большие различия в пластичности как между ними, так и между различными типами кристаллических структур.

2. Анизотропия свойств, связанная как с чередованием различных слоев, так и с анизотропией структуры самих слоев, обусловленная их предысторией.

3. Сильная дисперсия всех свойств как от слоя к слою, так и внутри каждого слоя.

4. Увеличение характеристических масштабов, особенно масштабов структурных неоднородностей.

Кроме того, в большинстве случаев приходится сталкиваться с напряжениями трехосного сжатия, насыщенностью водными растворами и временными и пространственными градиентами температуры.

Хотя такие сочетания свойств и условия напряженного состояния в

искусственных композиционных материалах и не встречаются, особенности кинетики процесса разрушения горных пород не столь велики, как можно было бы ожидать. Действительно, в горных породах, как и в остальных твердых телах, действуют следующие факторы.

1. Многомасштабность процессов — наличие нескольких масштабных уровней, на которых события происходят одновременно и взаимосвязанно, увеличение характеристик длин со временем (т.е. укрупнение масштаба главных событий).

2. Взаимосвязь пластической деформации и разрушения, вытекающая из энергетического и силового критериев зарождения трещин, с одной стороны, и снятия локальных перенапряжений после зарождения — с другой.

3. Коллективные эффекты в системах дефектов как пластических (дислокаций и дисклинаций), так и трещин. Главными из них для горных пород являются пластические неустойчивости — образование слоев с пониженным сопротивлением деформации — и упругопластические закономерности развития очага разрушения.

Поэтому в данном обзоре основное внимание уделено закономерностям, общим для всех твердых тел, причем в каждом случае отмечены особенности, которые, по нашему мнению, могут быть существенными для горных пород.

II. Энергетический и силовой критерии. Пусть в материале, находящемся под действием однородных растягивающих напряжений σ , зарождается трещина диаметром d . С достаточной точностью можно считать, что в шаре с диаметром d напряжения при этом полностью релаксируют, а в остальном объеме не изменяются. Если γ_0 — удельная поверхностная энергия тела, то для чисто хрупкой трещины (зарождение которой не сопровождается никакой пластической деформацией) работа по созданию новых свободных

поверхностей $A \geq 2 \frac{\pi d}{4} \gamma_0$. Энергия релаксирующих напряжений $W_\sigma = \frac{\sigma^2}{2E} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3$, и полное измерение энергии при зарождении трещины W_c равно

$$W_c \approx \frac{\pi \gamma_0}{2} d^2 - \frac{\pi \sigma^2}{12 E} d^3. \quad (1)$$

Это выражение имеет максимум в точке d_0 , определяемой из условия $\partial W_c / \partial d|_{d=d_0} = 0$, откуда

$$d_0 = 4 \gamma_0 E / \sigma_0^2, \text{ или } \sigma_0 = \sqrt{4 \gamma_0 E / d_0}, \quad (2)$$

размер d_0 обычно называют гриффитсовским. При $d < d_0$ зарождение трещины энергетически невыгодно. Но и при $d > d_0$, когда оно выгодно, зарождение происходит не всегда, а только после достижения локальными напряжениями σ_l предельных значений σ_{\max}^2 . Обычно $\sigma_{\max} > \sigma_0$, т.е.

¹ Реально из-за ступенек и других неровностей поверхности трещины площадь ее поверхности всегда больше $\pi d^2 / 4$.

² При термофлуктуационном зарождении трещин σ_{\max} зависит от температуры T , времени ожидания t и структурных параметров ν_i : $\sigma_{\max} = \sigma_{\max}(T, t, \nu_i)$. Но здесь эти зависимости не учитываются.

трещина реально зарождается в условиях избытка энергии ΔW :

$$\Delta W = \frac{\pi \sigma_{\max}^2}{12E} d^3 - \frac{\pi \gamma_0}{2} d^2.$$

Этот избыток выделяется в окружающее пространство и тратится на пластическую деформацию W_p , фазовые переходы W_{ph} и т.д., а остаток уходит на большие расстояния в виде упругих волн W_{el} : $W_{el} = \Delta W - W_p - W_{ph} - \dots$ При зарождении макротрещин в горных породах эти упругие волны воспринимаются на поверхности земли как землетрясения.

III. Пластическая деформация. Пластическая деформация играет тройную роль в процессе разрушения. Во-первых, она на начальном этапе за счет перераспределения напряжений повышает локальные напряжения σ_l до уровня σ_{\max} . Одновременно происходит перенос упругой энергии и ее локальное увеличение по сравнению с однородно-напряженным состоянием. Следовательно, изменяются как условия зарождения трещин, так и энергетический баланс. Во-вторых, за счет дефектов, создаваемых пластической деформацией, формируются плоскости с пониженной энергией образования новой поверхности $\gamma_{ef} < \gamma_0$ и, следовательно, с пониженными значениями напряжений зарождения трещины $\sigma_{ef} < \sigma_{\max}$. В-третьих, после зарождения трещины пластическая деформация затупляет ее вершину, уменьшая $\sigma_l < \sigma_{\max}$ (или $\sigma_l < \sigma_{ef}$) и, следовательно, стабилизируя трещину, т.е. пластическая деформация способствует зарождению трещин и мешает их развитию, переводя разрушение из разряда внезапных событий в процесс накопления и развития системы трещин, только заканчивающийся катастрофическим актом, связанным с большим выделением энергии.

Основными параметрами, характеризующими пластическую деформацию в нашем представлении, являются общая мощность сдвига и степень их локализации. Общая мощность сдвига может быть определена по смещению отрезков линии, нанесенной на тело (рис. 1, а, б), или любого другого исходного репера. Степень локализации деформации и ее величина $\epsilon \approx u/\Delta$ определяются толщиной полосы деформации Δ .

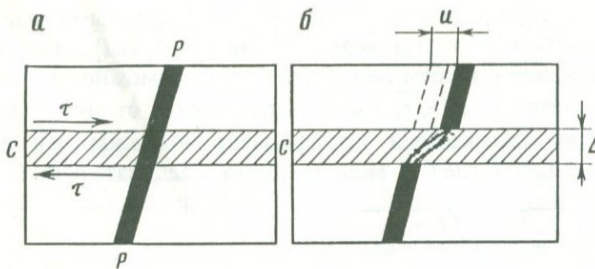
Деформация в хрупких материалах или композиционных материалах с хрупкими включениями протекает, как правило, с образованием трещин. Число трещин тем больше, чем больше деформация, а в случае нескольких полос с равной деформацией — чем больше мощность сдвига, т.е. больше Δ^3 . Кроме того, на количество и размер трещин влияют форма, размер и прочностные свойства включений, их концентрация. Поэтому общую зависимость числа трещин от всех параметров дать невозможно.

Различают два основных вида пластической деформации — сдвиговую и ротационную (рис. 2). При сдвиговой деформации (рис. 2,а) суммарный сдвиг u набирается за счет элементарных смещений отдельных продольных

слоев $\delta u_i = u_i - u_{i-1}$; $u = \sum_{i=1}^N \delta u_i$, т.е. смещения внутри полосы деформации

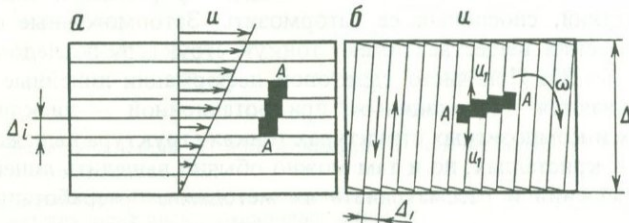
направлены в ту же сторону, что и суммарный сдвиг. При ротационной деформации (рис. 2,б) происходят смещения отдельных слоев перпендикулярно полосе. Если смещения равны u_i , то слои поворачиваются на угол

³ Эта зависимость связана с увеличением локальных напряжений от соседних хрупких включений, которых тем больше, чем больше Δ .



Р и с. 1. Определение мощности сдвига и деформации

СС – полоса сдвига; РР – репер; а – исходное, б – конечное состояния; u – суммарный сдвиг; $\epsilon = u/\Delta$ – локальная деформация



Р и с. 2. Сдвиговая (а) и ротационная (б) полосы деформации

АА – раскол хрупких включений за счет элементарных сдвигов внутри полосы

$\omega = u_1/\Delta_1$, при этом $u = \Delta\omega = u_1\Delta/\Delta_1$. Эти выражения верны только для малых ω (практически до $\omega < 10^\circ$), при больших ω они немного сложнее. Реальная полоса деформации может быть комбинацией сдвиговой и ротационной полос, а элементарные сдвиги в ней проходят под углом $0^\circ < \alpha < 90^\circ$.

Включения, мешающие элементарным сдвигам, в сдвиговой полосе раскалываются вдоль u , в ротационной – вдоль u_1 , т.е. перпендикулярно u , а в комбинированной – под промежуточными углами⁴.

Внутренние напряжения вызываются заторможенной деформацией. Следовательно, они возникают в местах, где имеются максимальные изменения u . Поскольку имеются по крайней мере два масштаба смещений – локальные δu между слоями и суммарный сдвиг во всей полосе u , то и возникающие напряжения могут иметь два масштаба. Низший масштаб определяется размером препятствий (например, хрупких включений) внутри полосы, больший – торможением всей полосы. Если внутри полосы имеется спектр препятствий или других источников неоднородности сдвига, то возникает спектр масштабов внутренних напряжений.

Пусть имеется градиент сдвига $\nabla u_i \approx u_i/L_j$, тогда в объеме, окружающем место торможения, возникают напряжения

$$\sigma_l \approx \frac{E}{5} \frac{\delta u_i}{L_j},$$

где $\delta u_i = u_{i\max} - u_{i\min}$ – перепад сдвига в зоне торможения; E – модуль

⁴ Это утверждение справедливо только для сферических включений с изотропной прочностью. При наличии во включениях плоскостей с пониженной прочностью (спайности) или сложной формы закономерности расколов более сложны.

Юнга. Масштаб L_j определяется средними касательными напряжениями в полосе τ : чем больше τ , тем меньше L_j , но $L_j = L_j(\Delta i)$, поэтому аналитическое выражение в общем виде привести невозможно. В частном случае одиночного сдвига $\sigma_i = K/\sqrt{r}$, где r — расстояние от точки торможения; $K = \tau\sqrt{L_j}$ — так называемый коэффициент интенсивности напряжений. При этом $u_i \approx 2 L_j \tau / G$, где G — модуль сдвига. Следовательно:

$$K \approx \sqrt{\frac{G\tau}{2}} \quad u_i \approx \sqrt{\frac{E\tau}{4}} \quad u_i. \quad (3)$$

Из сказанного ясно, что для катастрофических разрушений определяющими являются высокая степень локализации деформации и наличие мощных препятствий, способных ее затормозить. Заторможенные смещения в кристаллических веществах имеют тонкую структуру последовательных ступенек (рис. 3). При чисто сдвиговой деформации линейные дефекты сдвига называются дислокациями, при ротационной — дисклинациями. В аморфных и композитных структурах тонкая структура выражена не так четко, как в кристаллах, но и там можно обычно выделить линейные особенности смещений и рассматривать их методами, разработанными для кристаллов⁵.

Дислокации характеризуются значениями вектора элементарных смещений b_i , которые для кристаллов принимают значения из дискретного набора, определяемого симметрией кристаллической решетки, и имеют порядок межатомного расстояния. Для аморфных и композитных структур величины b не имеют определенных значений, их порядок определяется как структурой вещества (например, размерами включений и расстояниями между ними), так и действующими напряжениями.

Дисклинации характеризуются вектором Франка, величина которого определяет скачок поворота материала $\Delta\varphi_i$. Ротационная полоса образуется при движении диполя дисклинаций с векторами Франка φ и $-\varphi$ или их цепочки $(\pm\varphi_1, \pm\varphi_2, \dots, \pm\varphi_n)$.

Дислокации и дисклинации являются источниками внутренних напряжений:

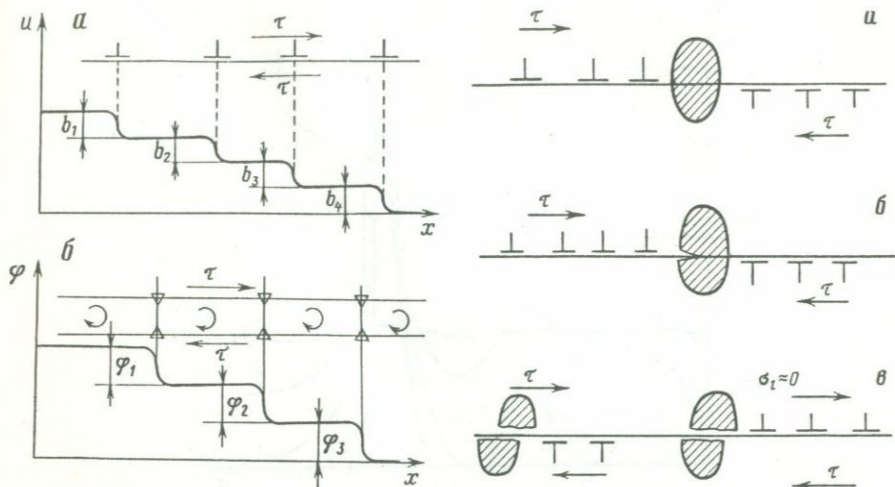
$$\sigma_{\perp} \cong Gb/5r, \quad \sigma_{\nabla} \approx G\omega, \quad (4)$$

или, учитывая, что $\omega \approx u/\Delta$, получим

$$G_{\nabla} \approx Gu/\Delta.$$

Поэтому расчеты внутренних напряжений в заторможенных сдвигах удобно проводить путем их суммирования от дислокаций и дисклинаций в ансамблях. Формула (3) для напряжений от заторможенного сдвига получена именно таким способом.

⁵ Понятия дислокаций и дисклинаций были первоначально введены в геологии как линейные особенности полей смещений в горных породах и только потом перенесены в физику кристаллов, где и были разработаны их основные законы. В геологии под дислокацией обычно понимают дефект на поверхности Земли, возникающий при выходе на нее сдвига. С точки зрения физики это уже не сама дислокация, а след ее выхода на поверхность. В дальнейшем мы используем термин "дислокация" в физическом смысле подвижного линейного дефекта.



Р и с. 3. Введение дислокаций (а) и дисклинаций (б) как особенностей поля смещений u (а) и поля углов поворота φ (б)

b_1, \dots, b_4 — векторы Бюргера дислокаций; φ_1, φ_2 и φ_3 — векторы Франка дисклинаций в соответствующих дисклинационных диполях

Р и с. 4. Раскол хрупкого включения скоплением дислокаций

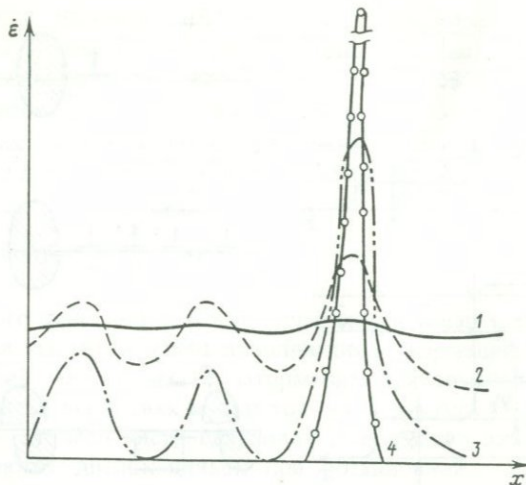
а — торможение дислокаций, $K < K_c$; б — раскол включения, $K = K_c$; в — создание плоскости с малым сопротивлением сдвигу

Локализация деформации возникает как результат разрушения движущимися дислокациями (или дисклинациями) препятствий для их движения. Если препятствия — хрупкие и жесткие включения, то их разрушение происходит, когда напряжения от группы дефектов на них достигают критического значения σ_{\max} (напомним, что $\sigma_{\max} = \sigma_{\max}(T, t, \nu_i)$). Так как включения имеют свои дефекты структуры, обычно — микротрещины, то их прочность удобнее характеризовать критическим значением коэффициента интенсивности напряжений K_c . Тогда разрушение включения происходит при условии

$$K = K_c, \quad (5)$$

где K — коэффициент интенсивности напряжений от дислокаций или дисклинаций, а K_c — характеристика прочности препятствия (рис. 4). Если препятствие расположено внутри полосы скольжения, то оно тормозит перемещающиеся там дислокации до тех пор, пока напряжение от них не превысит критический уровень (5). После этого оно раскалывается, и дальнейшая деформация идет по линии скольжения в данном месте беспрепятственно (рис. 4,в). Если же раскалывается несколько последовательных включений, то формируется разупрочненное сечение, в котором локализуется пластическая деформация.

Раскол включений по нескольким близким линиям приводит к образованию разупрочненной полосы. Этот процесс и называется пластической неустойчивостью: чем большая деформация уже прошла по какой-либо полосе, тем в большей степени в ней разрушились препятствия



Р и с. 5. Развитие пластической неустойчивости в последовательные моменты времени 1, ..., 4

1 — начальное распределение скорости деформации $\dot{\epsilon}$ со случайными неоднородностями; 2 — усиление неоднородностей за счет разупрочнения областей с большими $\dot{\epsilon}$; 3 — затухание $\dot{\epsilon}$ во всем объеме, кроме главной полосы; 4 — полная локализация деформации

скольжению и тем выше в полосе степень последующей деформации (рис. 5).

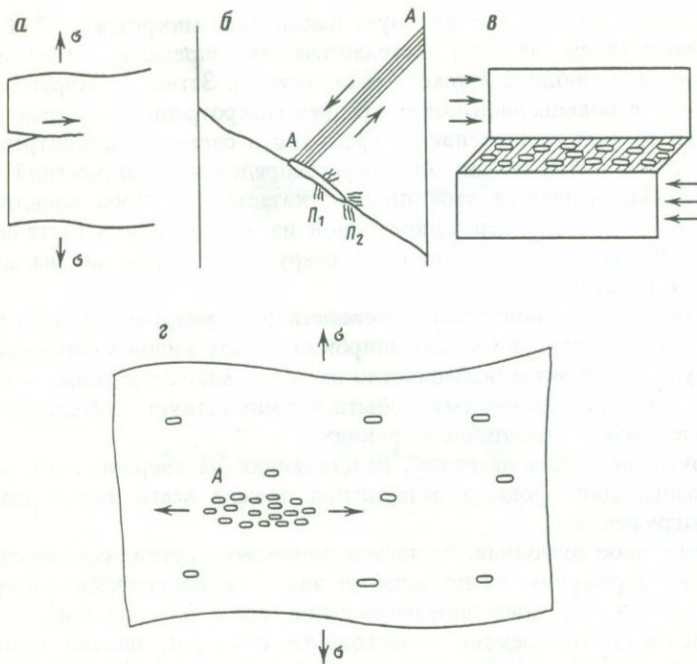
И наконец, вопрос о деформации за счет локальных сдвигов. Для получения конечной микроскопической деформации не обязательно, чтобы полосы деформации пересекали все тело. Достаточно, чтобы в конечном числе мест произошли локальные сдвиги. Пусть в теле есть N таких очагов на единицу объема, причем площадь каждого очага равна S и в нем сдвинулись n дислокаций с вектором Бюргерса b . Тогда

$$\epsilon = NnSb. \quad (6)$$

Тот же эффект наблюдается, если в теле проходит множественное разрушение: смещение берегов всех трещин эквивалентно появлению локальных очагов пластической деформации. Следовательно, даже в чисто хрупких телах может наблюдаться заметная пластическая деформация за счет множественного разрушения.

IV. Виды разрушения. В зависимости от пластических свойств тела, исходных неоднородностей структуры и концентраторов и вида напряженного состояния наблюдается несколько основных видов разрушения.

1. Хрупкое разрушение от исходного концентратора наблюдается в твердых телах с малой пластичностью. Оно возможно, если в концентраторе значение K , обусловленное приложенными напряжениями и дефектами, превосходит K_c материала при сравнительно низких средних напряжениях, когда в основном объеме никакие другие процессы еще не идут. Оно типично для твердых несовершенных включений в сравнительно пластичной среде. Трещина в этом случае растет быстро, со скоростями порядка скорости звука (рис. 6,а).



Р и с. 6. Виды разрушений

a — хрупкое, от исходного концентратора; *б* — квазихрупкое, связанное с заторможенной деформационной полосой *AA*; Π_1 и Π_2 — зоны микропластической деформации в местах последовательных остановок вершины трещины; *в* — разрушение срезом за счет пластической неустойчивости; *г* — развитие очага разрушения *A* для материала со стабильными микротрещинами

2. Квазихрупкое разрушение может происходить как от исходного надреза, так и от новой микротрещины. Оно имеет две отличительные черты: постоянную энергетическую "подпитку" за счет пластической деформации и затупление вершины за счет микропластичности. Следовательно, квазихрупкие трещины всегда привязаны к большим по масштабу пластическим зонам и порождают меньшие по масштабу сдвиги около вершины. Последние могут происходить за счет зарождения у вершины ансамблей микротрещин. На этом примере видна взаимосвязь трех масштабных уровней: большого — макросдвиг, среднего — квазихрупкая трещина и малого — микросдвиг или микротрещина у вершины макротрещины (рис. 6, б).

3. Разрушение срезом осуществляется обычно механизмом пластической неустойчивости, описанным выше. Для материалов с хрупкими включениями оно связано с зарождением микротрещин на нижнем масштабном уровне (рис. 6, в).

4. Развитие объемного очага разрушения происходит в тех случаях, когда исходные микротрещины быстро стабилизируются за счет структурного фактора (остановка более прочным материалом) или истощения локальной упругой энергии и затупления вершины. В этих условиях окончатель-

ному макроразрушению предшествует накопление микротрещин⁶. Распределение микротрещин сначала — стохастическое, определяемое случайным характером неоднородности исходной структуры. Затем формируются очаги — области с повышенной концентрацией микротрещин, которые развиваются уже за счет коллективных эффектов в системах микротрещин — взаимодействия пластических зон, перераспределения напряжений и т.д. (рис. 6,з). Заканчивается этот процесс катастрофическим событием — перколяцией очага, или переходом одной из его трещин в нестабильное состояние. В обоих случаях процесс разрушения переходит на другой масштабный уровень.

Таким образом, в зависимости от свойств и структуры твердого тела и параметров нагружения возможен широкий спектр видов макроскопического разрушения, причем большинство из них — многостадийные и многоуровневые; катастрофическому событию предшествует длительный процесс на более низких масштабных уровнях.

V. Нагружение. Виды нагрузок, действующих на твердое тело, весьма многообразны. Для процесса разрушения прежде всего имеют значение три типа нагружения.

1. Напряженное состояние. Различают одноосное растяжение или сжатие, многоосные нагружения, их предельный вид — гидростатическое нагружение ($\sigma_{xx} \approx \sigma_{yy} \approx \sigma_{zz}$), сдвиговое нагружение (срез) (см. рис. 6,в).

2. Зависимость от времени — постоянные $\sigma \approx \text{const}$, плавно изменяющиеся циклические, и все виды их наложения.

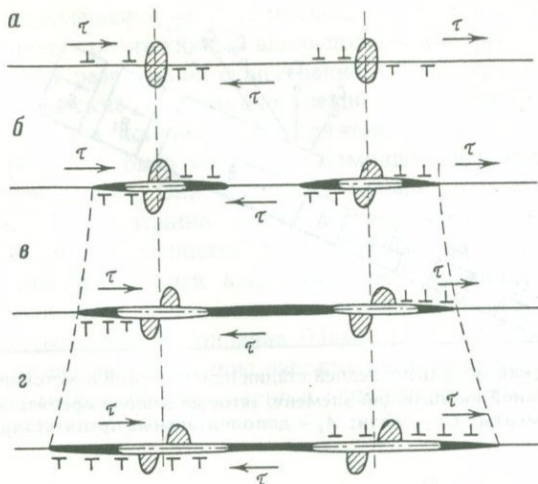
3. Различие в энергетических потоках — мягкое, жесткое и сверхжесткое нагружения. При мягком нагружении в зону очага разрушения перетекает только упругая энергия из сферы радиуса d , где d — характеристический размер очага. При жестком нагружении перемещения, вызванные ростом трещин, доходят до внешней поверхности; внешняя сила совершает работу, помогая развитию разрушения; при сверхжестком нагружении, кроме этого, разгружается материал на больших расстояниях от трещины и вся упругая энергия стекает в очаг разрушения.

Даже тела с одинаковой исходной структурой разрушаются различно при изменении типа и характера нагружения. Например, рассеянное разрушение и медленный рост очагов разрушения при очаговом нагружении сменяются катастрофическим развитием первого же очага при жестком нагружении. Из сказанного ясно, что для предсказания землетрясений необходимо как минимум знание основных упругопластических и структурных свойств материалов в зоне очага, вида напряженного состояния и типа нагружения⁷.

VI. Кооперативные эффекты в системах микротрещин. Выше уже

⁶ Правильнее сказать — накопление трещин на более низком масштабном уровне. При наличии нескольких последовательных масштабных уровней, определяемых неоднородностью структуры, возможно несколько количественно-качественных переходов: накопление критической концентрации микротрещин на самом низком уровне — зарождение трещин на следующем уровне, накопление их критической концентрации — переход на следующий уровень и т.д.

⁷ На наш взгляд, основная задача в этом направлении — разработка 10–20 базовых моделей, отражающих основные типы пород, нагружения и виды напряженного состояния.



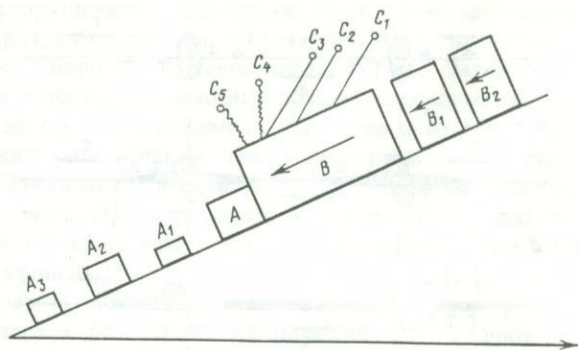
Р и с. 7. Пластический пробой промежутка между двумя трещинами
 а — исходное состояние; б — раскол включений и образование пластических зон;
 в — слияние пластических зон; z — образование у включений пластических зон проти-
 воположного знака

упоминались два основных кооперативных эффекта, важных для перехода системы микротрещин в неустойчивое состояние, т.е. для перехода процесса разрушения на более высокий масштабный уровень: пластическая неустойчивость и развитие очага разрушения. В общем случае может наблюдаться и комбинация этих эффектов. Рассмотрим их более подробно.

1. Пластический пробой промежутка между двумя трещинами состоит из трех стадий (рис. 7). После образования трещин (например, после раскола хрупких включений) заторможенные у препятствий сдвиги проходят через трещины и формируют около их концов пластические зоны (рис. 7,б). После увеличения локальных напряжений пластические зоны соседних трещин сливаются в заторможенные в них дислокации противоположного знака — аннигилируют⁸. Общее сопротивление сдвигу рассматриваемой области при этом уменьшается. Следовательно, растет размер внешней части пластических зон и мощность заторможенного в них сдвига (рис. 7,в). Наконец, на третьей стадии крип в промежутке между трещинами приводит к формированию в нем дислокаций противоположного знака, т.е. вся область создает дальнедействующие напряжения, подобные напряжениям от большой трещины (рис. 7,з).

Если в области этих напряжений окажется еще одна трещина со своей пластической зоной или хрупкое включение, способное к расколу, то процесс может захватить и их, размер эффективной трещины еще более увеличится и т.д. Катастрофическое событие наступает тогда, когда разрушается наиболее мощное препятствие и все эффективное скопление дислокаций уходит вдоль линии сдвига на расстояния, большие его размера. Аналогично процесс идет и в том случае, когда в деформационной

⁸ Если матрица достаточно вязкая, то слияние может произойти и при постоянном напряжении за счет крипа в промежутке между пластическими зонами.



Р и с. 8. Механическая модель последней стадии пластической неустойчивости

Брус B — основной скользящий элемент, заторможенный препятствием A ; B_i — дополнительные элементы; C_i — связи; A_i — дополнительные препятствия

полосе перемещается дисклинация или дисклинационный диполь (см. рис. 3,б).

Для последней стадии этого процесса можно предложить следующую механическую модель (рис. 8). Пусть на наклонной плоскости заторможен препятствием A скользящий брус B . Кроме того, брус закреплен связями C_1, C_2, \dots, C_n . Все вместе они его удерживают, но каждая из них в отдельности слишком слаба для этого. Напряжения на связях и препятствии могут расти за счет подхода новых элементов B_1, \dots, B_m (прорыв мелких препятствий хвостовой частью массива или просто добавочный крип). Из-за этой догрузки или из-за временной зависимости прочности связей одна из них, наконец, не выдерживает и разрушается. Брус B при этом немного смещается вперед, увеличивая нагрузку на препятствие и остальные связи. Вследствие этого последовательно рвутся все связи C_i , а затем разрушается и основное препятствие A . После этого брус перемещается уже на большое расстояние, последовательно ломая более слабые препятствия A_1, \dots, A_m , натягивая и разрывая новые связи $C_{n+1}, \dots, C_{n+n_1}$ (C_4 и C_5 на рис. 8).

Так как на последней стадии процесса обычно приходится иметь дело с большими характерными длинами (большими d_0 из (2)), то каждый разрыв связи и разрушение препятствия сопровождаются выделением упругой энергии в виде импульсов.

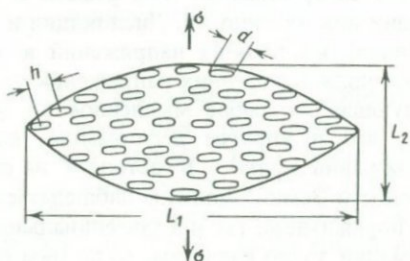
В случае землетрясения разрыву связей C_1, \dots, C_n соответствуют форшоки, разрушению препятствия A — главный удар, а разрыву связей $C_{n+1}, \dots, C_{n+n_1}$ и разрушению препятствий A_1, \dots, A_m — афтершоки. Поскольку геометрия системы при разрыве связей C_1, \dots, C_n примерно сохраняется, то следует ожидать, что форшоки по форме будут близки к главному импульсу⁹. Напротив, после прорыва главного препятствия геометрия меняется и форма сигналов уже не сохраняется.

После разрушения всех препятствий заторможенный сдвиг уходит на большие расстояния по области, препятствия в которой разрушены

⁹ Чем ближе к нему, тем больше подобия. Возможно, что этот признак можно использовать в качестве прогностического.

предыдущими перемещениями. Весь процесс может повториться в области с новыми большими препятствиями вдоль полосы деформации.

2. Развитие очага разрушения существенно в более хрупких материалах, в которых пластические зоны около трещин малы или отсутствуют совсем. Тогда основным источником напряжений является сама трещина. Эти напряжения могут быть описаны с помощью дислокаций (так называемых раскалывающих). Они несколько меньше, чем в случае, изображенном на рис. 7 (расстояния между дислокациями противоположного знака и их число определяются только размером трещины), и обратимы — при снятии внешней нагрузки берега трещины возвращаются в исходное состояние и напряжения снимаются. Поэтому для коллективных эффектов требуется накопление бóльшей концентрации трещин. Но в этом случае вклад во внутренние напряжения вносят все микротрещины очага, а не только лежащие примерно в одной плоскости, как при пластическом пробое.



Р и с. 9. Схема очага разрушения

Рассмотрим, например, очаг разрушения, изображенный на рис. 9. При увеличении концентрации трещин в нем наблюдаются два эффекта:

локальные перколяции — слияния групп трещин, зародившихся в зоне взаимной неустойчивости. Число групп слившихся трещин нелинейно зависит от их концентрации. При $h/d \sim 3$ в очаге без учета эффектов напряжений начинаются цепные реакции слияния, заканчивающиеся полным разрушением очага;

перераспределение напряжений. Расчеты показывают, что даже в условиях однородного растяжения на большей части трещин образуются раскалывающие дислокации. Поэтому как в самом очаге, так и вокруг него возникает сложнапряженное состояние. Приложенные напряжения релаксируют во внутренней части очага и концентрируются на его периферии, т.е. весь очаг подобен одной большой трещине.

Для очага без учета эффекта перколяций коэффициент интенсивности напряжений для периферийных трещин

$$K = K_0 [1 - \beta f(d/h) \ln(L_1/h)]^{-1},$$

где β — коэффициент порядка 1, зависящий от формы очага и трещин; $f(d/h)$ — функция, малая при $d/h < 1/6$ и быстро растущая при $d/h \gtrsim 1/3$. Для реальных β и $\ln \sim 6-9$ система теряет устойчивость: $K \rightarrow \infty$ при $h/d = 2-4$. Этот результат имеет принципиальное значение. Он показывает, что переход в неустойчивое состояние зависит не только от абсолютной кон-

центрации трещин, но и от размеров и формы очага. Следовательно, для предсказания начала момента неустойчивости недостаточно знания одной дилатации (разуплотнения), необходимы сведения о целом ряде параметров. Вариации этих параметров для различных условий могут изменять критическую концентрацию в 2–3 раза. Другими словами, концентрационный критерий для объемных очагов разрушения¹⁰ справедлив только с логарифмической точностью.

○ Полная задача, учитывающая как перколяции, так и эффекты перераспределения напряжений, еще не решена. Но из общих соображений можно ожидать, что очаг теряет устойчивость при $h/d = 3-8$.

○ Нижний предел ~ 3 реализуется в материалах с затрудненной перколяцией, быстро затухающими напряжениями и малыми очагами, верхний $h/d \sim 8$ – при $\ln(L_1/h) \sim 9$ (т.е. больших очагах), облегченных перколяциях и более пластичной среде.

VII. Форма поверхности. Уже говорилось, что макроразрушению предшествует заторможенная деформация в виде скопления дислокаций, дисклинаций или их диполей. Дислокации и дисклинации есть линейные источники полей внутренних напряжений и, следовательно, упругих деформаций. Все поля внутренних напряжений уравновешены, т.е. суммарная сила, действующая на любое мысленное полное сечение тела, равна нулю. Это значит, что и упругие деформации, наблюдаемые на этом сечении, в среднем равны нулю¹¹. В частности, на свободной поверхности (например, поверхности Земли) должны наблюдаться упругие смещения обоих знаков как в нормальном, так и в тангенциальном направлении (рис. 10). Если эти деформации точно известны, то по ним можно восстановить расположение в глубине и мощность источников. Одна такая попытка нам известна, источник напряжений был идентифицирован как дисклинационная полупетля [5]. Основная трудность, по нашему мнению, – разделение упругих и пластических смещений – может быть преодолена.

VIII. Напряжения. Обсудим оценку особенностей полей напряжений в земной коре.

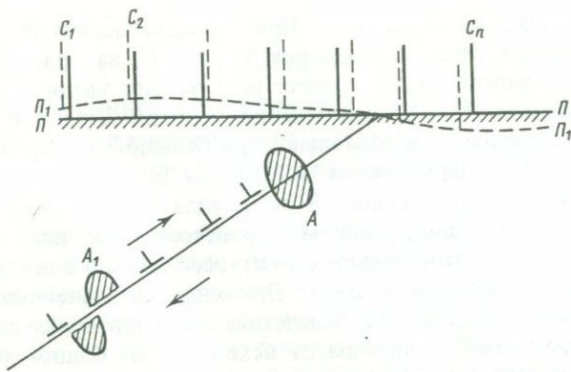
1. Всестороннее сжатие. В макроскопическом масштабе горные породы в большинстве случаев подвергаются трехосному сжатию. Сжатие неоднородно, поэтому касательные напряжения конечны и на микроуровне¹² появляются сдвиги, связанные с ними линейные дефекты и внутренние напряжения σ_1 . Эти напряжения, как уже говорилось, имеют все компоненты, в том числе и растягивающую. При некотором уровне сжимающих напряжений локальные растягивающие напряжения становятся больше приложенных, начинается растрескивание.

2. Влияние неоднородностей. Если тело находится в условиях гидростатического сжатия, то касательные напряжения в нем равны нулю. Однако

¹⁰ В плоском случае (например, пластины) с очагом достаточно протяженным, большим толщины пластины, концентрационный критерий выполняется лучше.

¹¹ Если деформации очень велики (настолько, что закон Гука уже не выполняется), то это не совсем точно. Хотя средние деформации все равно меньше локальных.

¹² В физике сейчас популярна многоуровневая система дефектной структуры и дефектов [3–4]. По этой системе есть по крайней мере четыре уровня – микро, мезо, структурный и макро. Автору, к сожалению, не известна геологическая терминология.



Р и с. 10. Упругая деформация свободной поверхности под действием заторможенной в глубине пластической деформации

A — препятствие, разрушение которого даст главный толчок; A_1 — разрушенное препятствие, давшее форшок; $ПП$ — исходное состояние поверхности; $П_1П_1$ — линия поверхности после упругих горизонтальных деформаций; C_i — реперы, смещения которых демонстрируют горизонтальную деформацию

это утверждение справедливо только для однородного и изотропного тела. Для тела с неоднородностями (включениями или трещинами) возникают касательные напряжения двух масштабов: микро (характерная длина L порядка размера неоднородности) и мезо (L порядка размера флуктуации в распределении неоднородностей, например группы включений или очага разрушения). На этой основе возможен еще один кооперативный эффект в гидростатически сжатом теле: первая же группа ориентированных трещин стимулирует усиление касательных напряжений и зарождение новых трещин, увеличение очага и т.д.

3. Влияние свободной поверхности. Если в сжатом теле внезапно появляется свободная поверхность, то вблизи нее напряженное состояние резко меняется. Во-первых, компоненты напряжения, нормальные к ней, релаксируют и поверхность прогибается. При больших значениях исходных напряжений в прогибе из-за нелинейных эффектов могут появляться локальные растягивающие напряжения. Во-вторых, изменяются поля дефектов, особенно линейных. Дефекты переходят в неравновесное состояние, происходит добавочное их перемещение, т.е. пластические сдвиги. Если при этом зарождаются микротрещины, то возможен один из описанных выше кооперативных процессов, приводящих к лавинообразному разрушению и высвобождению всей упругой энергии объема. По-видимому, эти эффекты определяют горные удары.

4. Нагружение. Для геологических процессов, вероятно, характерно нагружение за счет задания полной скорости перемещения $\dot{\epsilon} = \text{const}$ на больших расстояниях от блокировочных центров. В таких условиях мощность заторможенного сдвига у препятствия все время нарастает, т.е. реализуется жесткое или сверхжесткое нагружение в отличие от мягкого нагружения при горных ударах. В зависимости от дисперсии прочностных свойств препятствия возможны два механизма его разрушения. При малой дисперсии оно будет происходить за счет лавинообразного развития очага разрушения, сопровождаемого лавинообразным нарастанием числа и

мощности акустических сигналов¹³. При большой дисперсии после разрушения всех вспомогательных барьеров (C_1, \dots, C_n на рис. 10) сдвиг тормозится на главном (A) и процесс идет за счет увеличения напряжений (подход блоков B_i) до выполнения условия $K = K_c$, после чего и происходит разрушение. Следовательно, при большой дисперсии главному удару предшествует "зона молчания".

5. Залечивание микротрещин. В кристаллах возможно залечивание микротрещин за счет диффузионных процессов. Так как переносятся те же атомы, то после залечивания структура, а вместе с ней и прочность могут полностью восстанавливаться. Движение же линейных дефектов приводит к эффекту упрочнения. Вследствие этого повторные сдвиги обычно идут по плоскостям, отличным от исходных. Из общих соображений можно полагать, что залечивание трещин в горных породах (особенно на мезо- и макроуровнях) не может быть столь эффективным. Упрочнение же их ничтожно по сравнению с упрочнением пластичных кристаллов. Поэтому пластические полосы (разломы) должны быть более устойчивы, чем полосы скольжения в кристаллах.

Заключение. Сделана попытка изложить современные идеи физики разрушения твердых тел. Основные ее моменты, по нашему мнению: представление о заторможенной деформации и ее носителях — линейных дефектах; кооперативные эффекты пластической неустойчивости и в ансамблях микротрещин; взаимосвязь пластической деформации и разрушения. Автор статьи сознательно избегал деталей и математических выкладок с целью сосредоточения внимания на основных идеях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красовский А.Я. Физические основы прочности. Киев: Наук. думка, 1977. 140 с.
2. Тамуж В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. Рига: Зинатне, 1976. 294 с.
3. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.
4. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. М.: Наука, 1985. 230 с.
5. Chou T.-W., Malasky M.G. // J. Geophys. Res. 1979. Vol. 84, N 11. P. 6093–6089.

¹³ Это утверждение верно только в среднем. Реальные зависимости числа и мощности сигналов определяются целым рядом параметров и до сих пор корректно не рассчитаны.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В РАЗРУШАЕМОЙ НЕОДНОРОДНОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

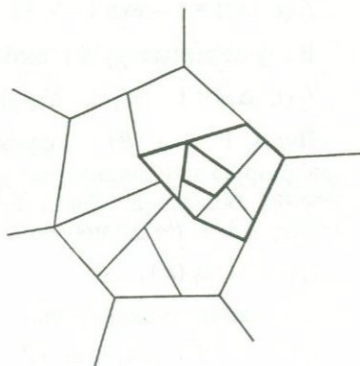
Согласно современным представлениям [1], землетрясение является следствием выделения энергии тектонических напряжений при разрыве пород Земли в результате развивающегося в ней кинетического процесса трещинообразования иерархически возрастающего размера.

Этот процесс обусловлен структурной организацией земной коры и горных пород (рис. 1), состоящей из блоков, характерные линейные размеры которых образуют дискретный спектр r_j ($j = 1, 2, \dots$) [2]. Возникающие трещины стабилизируются на границах блоков и имеют размеры r_j . Как показывает теоретический анализ [3, 4] и совокупность лабораторных [5] и сейсмологических [6, 7] данных, при не слишком больших действующих напряжениях формирование трещины размера r_j лимитируется накоплением критической концентрации $C_*(r_j) \sim (er_j)^{-3}$ трещин размера r_j (e – основание натуральных логарифмов). В этом состоит иерархия трещинообразования, в которой j приобретает смысл ранга.

Обработка большого числа землетрясений обнаруживает, что объемная плотность энерговыведения не зависит от класса землетрясения, так что выделение энергии прямо пропорционально величине объема, разружаемого при трещинообразовании.

Таким образом, ожидание землетрясения выбранного класса определяется разрушением блока соответствующего объема, которое контролируется кинетикой накопления трещин меньшего ранга до критической концентрации. В этой связи построение кинетики укрупнения трещин в иерархической системе имеет для прогноза землетрясений первостепенное значение.

В силу термофлуктуационной природы разрушения, неоднородностей материала и напряженного состояния кинетика трещинообразования оказывается статистической. Это приводит к вероятностной формулировке задачи прогноза, которая состоит в оценке вероятности того, что землетрясение с энергией от E до $E + \Delta E$ произойдет в данной области в интервале времени от t до $t + \Delta t$. Попытка ее теоретического решения, опирающаяся на изложенные представления о физических основах сейсмического процесса, предпринята в данной работе. Развита общий подход, конкретиза-



Р и с. 1. Схема блочного строения материала Земли

Выделены элементы различных уровней

ция которого для частной модели (совокупности предположений о структуре, действующих напряжениях, энерговыделении и кинетике трещинообразования) дает алгоритм прогноза "сильного" землетрясения (энерговыделения) на основе регистрации некоторого числа "слабых".

1. ОБЩИЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ

Пусть в системе, схематически представленной на рис. 1, имеются N_j статистически независимых блоков j -го уровня (ранга) структурной организации с функцией распределения $p_j(t)$ их времени жизни t (которое предполагается случайной величиной). Это означает, что к моменту t разрушились

$$n_j(t) = N_j p_j(t)$$

таких блоков, причем последний — точно в момент t . Следующий блок разрушится в интервале $t, t + \Delta t$; Δt — случайная величина. Найдем ее функцию распределения $f_j(t, \Delta t)$. Очевидно,

$$f_j(t, \Delta t) = 1 - \chi_j(t, \Delta t),$$

где $\chi_j(t, \Delta t)$ — вероятность того, что интервал ожидания между двумя последовательными разрушениями больше Δt . Она равна вероятности того, что на j -м уровне в интервале $t, t + \Delta t$ не разрушится ни один блок, т.е.

$$\chi_j(t, \Delta t) = [1 - \Delta p_j(t, \Delta t)]^{N_j - n_j},$$

$$\Delta p_j(t, \Delta t) = p_j(t + \Delta t) - p_j(t) = \int_t^{t+\Delta t} \dot{p}_j(t') dt' = \dot{p}_j(t^*) \Delta t, \\ t < t^* < t + \Delta t.$$

При малых Δp и больших $N - n$, используя определение числа e :

$\lim_{x \rightarrow \infty} (1 - a/x)^x = e^{-a}$, асимптотически имеем

$$\chi = \exp[-(N - n) \Delta p],$$

откуда

$$f_j(t, \Delta t) = 1 - \exp\{-N_j [1 - p_j(t)] \dot{p}_j(t^*) \Delta t\}. \quad (1)$$

В случае малых $p_j \ll 1$ окончательно находим

$$f_j(t, \Delta t) = 1 - \exp\{-N_j \dot{p}_j(t^*) \Delta t\}. \quad (2)$$

Пусть $1 - \varphi_j(E)$ — функция распределения энергии E , выделяемой при разрушении блока j -го уровня, т.е. $\varphi(E)$ есть вероятность энерговыделения больше E . Тогда вероятность того, что на j -м уровне системы в интервале $t, t + \Delta t$ произойдет энерговыделение больше E , есть

$$f_j(t, \Delta t) \varphi_j(E),$$

а число таких событий равно

$$q_j(t, \Delta t, E) = [N_j - n_j(t)] f_j(t, \Delta t) \varphi_j(E),$$

Сумма $\sum q_j$ дает полное число актов выделения энергии больше E во всей системе объема V в интервале времени $t, t + \Delta t$. Величина

$$P_V(t, \Delta t, E) = \frac{\sum_j q_j}{\sum_j N_j - n_j} = \frac{\sum_j [1 - p_j(t)] f_j(t, \Delta t) \varphi_j(E)}{\sum_j [1 - p_j(t)]}, \quad (3)$$

дополненная выражением (1), дает общую формулу для вероятности энерговыделения больше E в многоуровневой системе. В приближении (2) при $p_j \ll 1$ в (3) имеем

$$P_V(t, \Delta t, E) = \frac{\sum_j N_j \varphi_j(E) \left[1 - e^{-N_j p_j(t^*) \Delta t} \right]}{\sum_j N_j}. \quad (4)$$

В (4) случайные величины Δt и E разделены, поэтому можно легко найти их различные числовые характеристики. Например, средний интервал ожидания события с энерговыделением больше E :

$$\overline{\Delta t}_V(t, E) = \frac{\sum_j \varphi_j(E) p_j^{-1}(t^*)}{\sum_j N_j}. \quad (5)$$

Использование полученных выражений требует конкретизации величин $N_j, \varphi_j(E), p_j(t)$ и установления их иерархических связей. Попытка решения этих задач предпринята далее.

2. СТРУКТУРА И НАПРЯЖЕНИЯ

2.1. Согласно отмечавшимся выше данным [1, 2], материал Земли имеет блочное строение. Блоки j -го уровня имеют средний объем v_j , разбиты на блоки объемом v_{j-1} и т.д., причем существует иерархия

$$v_j/v_{j-1} \sim (r_j/r_{j-1})^3 = \text{const} \equiv \alpha, \quad (6)$$

приводящая к геометрической прогрессии

$$v_j = v_1 \alpha^{j-1}, \quad j = 1, 2, \dots \quad (6a)$$

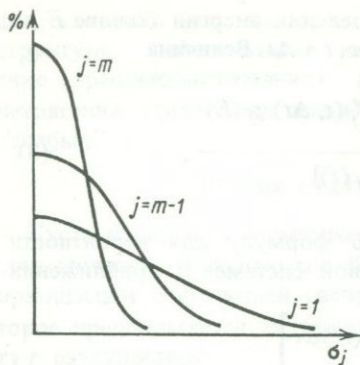
Соотношение (6a) позволяет величину некоторого объема V (разрушение которого нас интересует) связать с рангом j структурной иерархии, а именно

$$j = 1 + (\lg V v_1^{-1}) / \lg \alpha. \quad (6b)$$

Согласно [2], $\alpha \sim 10^2$, а объем первичной трещины для горной породы $v_1 \sim 10^{-18} \text{ м}^3$. В системе объемом V число N_j блоков на j -м уровне есть

$$N_j = V/v_j = V/v_1 \alpha^{1-j}. \quad (7)$$

2.2. В силу неоднородностей среды и напряженного состояния существ-



Р и с. 2. Распределение напряжений σ , действующих на различных j -уровнях m -ранговой неоднородной системы

вует распределение по прочности блоков и их границ, так что можно представить два предельных случая:

А. Трещина разрушает блок, но тормозится на его границе.

Б. Трещина проходит в соседний блок и вызывает его разрушение¹. В этой связи выделим блоки типов А и Б. Предположим, что блоки А образуют матрицу,

в которую случайно включены блоки Б. В силу концентрационных флуктуаций возможна кластеризация блоков Б. Повторяя рассуждения [4] при выводе концентрационного критерия кластеризации, можно показать, что вероятность нахождения определенного блока Б в кластере не менее, чем из i ему подобных (типа Б) при наличии кластеризации, есть

$$\varphi_i = i^{-1/2}. \quad (8)$$

Другими словами, разрушение блока приводит к образованию трещины в i раз больше его размера с вероятностью φ_i (8).

2.3. Напряжения, действующие в блоках, различны в силу ряда причин. Простейшей причиной является разброс ориентации блоков относительно вектора нагрузки. Это приводит к флуктуационному размытию действующих напряжений, возрастающему с увеличением числа степеней свободы блока, т.е. с уменьшением номера ранга j . Качественное распределение напряжений в блоках на разных уровнях структурной организации m -ранговой системы характеризует рис. 2.

В данной схеме напряжения σ_j в блоках на j -м уровне можно представить в виде

$$\sigma_j = \sigma_{j+1} + \sigma', \quad j = 1, 2, \dots, m-1, \quad (9)$$

$$\sigma_m = \sigma' \in [0, \Delta\sigma],$$

где σ_{j+1} — напряжение в "вышестоящем" блоке объема v_{j+1} (в состав которого входит рассматриваемый блок j -го уровня); σ' — "флуктуация" в объеме блока, полагаемая для простоты распределенной равномерно в интервале $\Delta\sigma$, одинаковом для всех j .

Будем предполагать выполненным критерий сильного разброса напряжений

$$\eta\Delta\sigma > 1 \quad (10)$$

для любых $\eta > 0$.

¹Заметим, что изложенные представления о блоках двух типов близки к концепции работы [8], где распределение трещин по размерам связано с наличием в среде различно напряженных областей, способствующих либо препятствующих росту трещины.

3. ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ

Выделение энергии определяет причинность разрушения нагруженной системы. При этом разрушение выступает как способ релаксации напряжений, когда пластическая мода релаксации заторможена либо исчерпана.

Для характеристики энерговыделения при землетрясениях будем пользоваться эмпирической формулой [1, с. 65]

$$E = \epsilon V_0, \quad \epsilon = 10^2 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (11)$$

где V_0 — объем очага; ϵ — объемная плотность энергии (постоянная для различных регионов). В силу (11) энерговыделение однозначно определяется величиной объема V_0 , разгружаемого при возникновении в нем трещины. Введя величину энергетического класса $K = \lg(E, \text{Дж})$, выражение (11) можно переписать в виде

$$K = 2 + \lg(V_0, \text{м}^3), \quad (11a)$$

связывающем величину K и разрушаемого объема V_0 .

В двублоковой среде п. 2.2 разрушение блока может инициировать разрушение $i-1$ соседей с вероятностью φ_i (8); при этом энерговыделение на j -м уровне, согласно (11), составит величину $E = \epsilon v_j i$. Подстановка этого выражения в (8) дает

$$\varphi_j(E) = (E_j/E)^{1/2}, \quad (12)$$

$E_j = \epsilon v_j$ — распределение вероятностей энерговыделения больше E .

Отметим, что функциональная зависимость $\varphi(E)$ (12) одинакова на различных структурных уровнях и совпадает с известным законом повторяемости землетрясений. Согласно (4), (1), (7) с учетом (12), в системе объемом V число актов энерговыделения E в интервале времени $t, t + \Delta t$ есть

$$Q_V(t, \Delta t, E) = V \left(\frac{\epsilon}{E} \right)^{1/2} \sum_j v_j^{-1/2} f_j(t, \Delta t).$$

Наклон графика $Q_V(E)$ в полулогарифмических координатах равен $-1/2$. Вследствие зависимости от t график со временем смещается относительно координатных осей.

Очевидно, максимальное энерговыделение в блоке на j -м уровне меньше E_{j+1} . Другими словами, на j -м уровне энерговыделение варьирует в интервале

$$E_j, E_j + \Delta E_j < E_{j+1}$$

(распределение по E в интервале ΔE_j описывается зависимостью (12)). Это означает, что при энерговыделении "перемешивания" уровней не происходит, т.е. между E и j существует однозначное соответствие.

4. КИНЕТИКА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ

Вероятность $p_j(t)$ разрушения блока на j -м уровне к моменту времени t найдем, используя метод индукции.

Уровень $j = 1$ отвечает генерации первичных трещин; ее вероятность, контролируемая статистикой тепловых разрушающих флуктуаций, в неоднородном материале при стационарном напряжении σ_1 (9) есть [4]

$$p_1(t) = \int_0^{\Delta\sigma} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{t}{\Theta(\sigma_1)} \right] \right\} \frac{d\sigma'}{\Delta\sigma} \sim \frac{1}{\omega} \ln \left(1 + \frac{t}{\Theta_1} \right), \quad (13)$$

$$\omega = \gamma \Delta\sigma / (kT), \quad \Theta_1 \approx \Theta(\sigma_2 + \Delta\sigma).$$

Здесь выражение для $\Theta(\sigma)$ задается формулой Журкова [9]:

$$\Theta = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}. \quad (14)$$

Асимптотика в (13) соответствует $\omega > 1$, что считается выполненным в силу (10), и значениям $p \ll 1$.

Кинетика образования трещин на 2-м уровне отражает функцию распределения долговечности однорангового образца. В связи с анализом природы разброса прочностных характеристик это распределение детально изучалось [10]. В марковском приближении оно определяется из решения кинетического уравнения, являющегося координатно-временным аналогом уравнения Смолуховского, и достаточно громоздко. Рассмотрим предельный случай. Характерное время τ_2 генерации трещины в некотором блоке 2-го уровня определяется уравнением

$$p_1(\tau_2) = \frac{C_F(r_1, v_2)}{C_{r_1}(\sigma_2)} \equiv \beta_{12}, \quad (15)$$

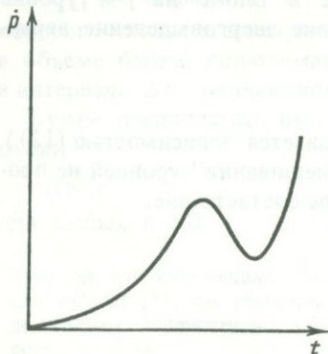
решение которого с учетом (13) имеет вид

$$\tau_2 = \exp(\omega\beta_{12}) \Theta(\sigma_2 + \Delta\sigma). \quad (15a)$$

Здесь C_{r_1} — объемная концентрация блоков, разрушение которых при действующем напряжении термодинамически выгодно [11]; C_F — концентрационный порог разрушения [3, 5], зависящий от объема разрушаемого тела, в данном случае — блока v_2 . Если считать потенциально возможным разрушение всех блоков и пренебречь размерным эффектом величины C_F , то $C_r \sim r^{-3}$, $C_F \sim (er)^{-3}$ и

$$\beta_{12} = e^{-3} \equiv \beta. \quad (16)$$

Положим далее, что в силу (10) накопление критической концентрации (15) ли-



Р и с. 3. Качественная зависимость скорости трещинообразования \dot{p} от времени t в неоднородной системе при нагружении с постоянной скоростью роста напряжений

митируется "последним шагом" (подробнее см. комментарий к формуле (18) статьи [4]). Его вероятность равна

$$1 - \exp \frac{-t}{\tau_2 (\sigma_2)} .$$

В этом случае вероятность разрушения любого блока 2-го ранга

$$p_2(t) = \int_0^{\Delta\sigma} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{t}{\tau_2 (\sigma_2)} \right] \right\} \frac{d\sigma'}{\Delta\sigma} \sim \frac{1}{\omega} \ln \left(1 + \frac{t}{\Theta_2} \right),$$

$$\Theta_2 = e^{\omega\beta} \Theta (\sigma_3 + \Delta\sigma).$$

Продолжая подобные рассуждения, найдем, что

$$p_j(t) \sim \frac{1}{\omega} \ln \left(1 + \frac{t}{\Theta_j} \right), \quad (17)$$

$$\Theta_j = \exp [(j-1)\omega\beta] \Theta (\sigma_{j+1} + \Delta\sigma).$$

Согласно (9):

$$\sigma_{j+1} = (m-j-1)\Delta\sigma + \sigma',$$

так что в (17)

$$\Theta_j = \exp [(j-1)\omega(1+\beta)] \Theta (m\Delta\sigma + \sigma'). \quad (17a)$$

Таким образом, в рассмотренном предельном случае сильного разброса напряжений (10) кинетика образования трещин различного ранга оказывается подобной и описывается логарифмической зависимостью (17); характеристическое время Θ_j (17a) экспоненциально возрастает с ростом j , сохраняя структуру формулы Журкова (14).

В случае динамического нагружения с постоянной скоростью возрастания напряжения $\dot{\sigma}$ аналог (17) связан с заменой $t/\Theta(\sigma)$ на $\int_0^t dt'/\Theta(\dot{\sigma}t')$ [12]. Возникающее здесь аналитическое выражение громоздко; качественный вид $\dot{p}(t)$ при динамическом нагружении приведен на рис. 3. Для нее характерны резкие увеличения скорости трещинообразования после инкубационного периода и затиший.

5. АЛГОРИТМ ПРОГНОЗА

Допустим, нас интересует энерговыделение k -го класса в системе с объемом V . В рамках рассмотренной модели, согласно (6б), (11a), ему отвечает разрушение блока на уровне

$$j_k = 1 + \frac{k - 2 - \lg(v_1, \text{м}^3)}{\lg \alpha}. \quad (18)$$

Из-за наличия распределения (12) ожидаемое энерговыделение $E_{jk} \equiv E$ характеризуется неопределенностью

$$\frac{\Delta E}{E} \sim \frac{E_{jk+1} - E_{jk}}{E_{jk}} = \alpha - 1. \quad (19)$$

Отсутствие "перемешивания рангов" при энерговыделении позволяет в сумме (4) ограничиться одним слагаемым j_k , так что для вероятности в интервале времени $t, t + \Delta t$ энерговыделения от E до $E + \Delta E$ в системе объемом V имеем

$$P_V(t, \Delta t, E, \Delta E) = 1 - \exp \left[- \frac{V}{v_1} \alpha^{1-j_k} \dot{p}_{j_k}(t^*) \Delta t \right].$$

Согласно (17) и (17а), где величиной $\beta \ll 1$ (16) пренебрегаем:

$$\dot{p}_{j_k} = \omega^{-1} (\Theta_{j_k} + t^*) \leq \frac{\exp[(2-j_k)\omega]}{\omega \Theta(m\Delta\sigma)}.$$

Таким образом, для верхней оценки искомой вероятности получаем

$$P_V(\Delta t, E, \Delta E) \leq \frac{V \alpha^{1-j_k} \exp[(2-j_k)\omega]}{\omega \Theta(m\Delta\sigma)}. \quad (20)$$

При заданных V и j_k (18) (для определенных значений α и v_1 , см. п. 2) в формуле (20) остаются неизвестными всего два параметра: ω и $\Theta(m\Delta\sigma)$. Их можно оценить на основе регистрации более слабых энерговыделений. Пусть, например, за время наблюдения Δt_n произошло большое число событий, которые на основе (18) можно квалифицировать как разрушения n_j и $n_{j''}$ блоков на уровнях j' и j'' . Определив $N_{j'}$ и $N_{j''}$, находим

$$\frac{n_{j'}}{N_{j'}} = \frac{1}{\omega} \ln \left\{ \frac{\Delta t_n}{\Theta(m\Delta\sigma + \sigma')} \exp[(1-j')\omega] \right\},$$

$$\frac{n_{j''}}{N_{j''}} = \frac{1}{\omega} \ln \left\{ \frac{\Delta t_n}{\Theta(m\Delta\sigma + \sigma')} \exp[(1-j'')\omega] \right\}, \quad (21)$$

Эти выражения – система уравнений для отыскания ω и $\Theta(m\Delta\sigma)$. Последнее определяется с погрешностью, задаваемой случайной величиной σ' .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа является первой попыткой построения прогноза кинетики энерговыделения при разрушении элементов нагруженной иерархической системы, опирающегося на современные физические представления и сейсмологические данные (термофлуктуационно-статистическая природа разрушения, концентрационный критерий укрупнения трещин, блоковое строение материала Земли и др.). Построены выражения для вероятности энерговыделения заданной величины в заданном интервале времени и процедура ее оценки. С целью перехода от общих выражений к явным аналитическим оценкам и выявления основных параметров рассмотрена максимально упрощенная модель структуры и ее напряженного состояния. Более адекватное описание сейсмической обстановки, по-видимому, потребует привлечения методов моделирования на ЭВМ.

Показано, что прогноз имеет принципиально вероятностный характер, что обусловлено статистической природой разрушения, а также неоднородностями материала и напряженного состояния. Это проявляется в неопределенности момента времени, места и величины энерговыделения.

1. Основы прогноза землетрясений // Прогноз землетрясений / Под ред. Н.А. Садовского. М.; Душанбе: Дониш, 1983. Вып. 3. С. 220.
2. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // Докл. АН СССР. 1983. Т. 269, вып. 1. С. 69–72.
3. Петров В.А. Термодинамический подход к микромеханике разрушения твердых тел // ФТТ. 1983. Т. 25, вып. 10. С. 3110–3113.
4. Петров В.А. Основы кинетической теории разрушения и его прогнозирования // Прогноз землетрясений. 1984. Вып. 5. С. 30–44.
5. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Физические основы прогнозирования механического разрушения // Докл. АН СССР. 1981. Т. 259, вып. 6. С. 1350–1353.
6. Соболев Г.А., Завьялов А.Д. О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов // Там же. 1980. Т. 252, вып. 1. С. 69–72.
7. Куксенко В.С., Пичулин В.А., Негматуллаев С.Х., Мирзоев К.М. Долгосрочный прогноз землетрясений по кинетике накопления разрывов: (Район Нурекского водохранилища) // Прогноз землетрясений. 1984. Вып. 5. С. 139–148.
8. Кузнецова К.И., Шумилина Л.С., Белова Н.А. Об отражении сейсмического процесса в вариациях графиков повторяемости землетрясений // Там же. С. 71–84.
9. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности // Вестн. АН СССР. 1968. Вып. 3. С. 46–52.
10. Петров В.А. Явления термофлуктуационного разрушения // ФТТ. 1976. Т. 18, вып. 5. С. 1290–1298.
11. Петров В.А. Долговечность твердых тел при малых нагрузках: Неразрушающие напряжения // Там же. 1984. Т. 26, вып. 7. С. 2116–2119.
12. Петров В.А., Горобей Н.Н. Статистика тепловых разрушающих флуктуаций в нестационарных условиях // Там же. 1978. Т. 20, вып. 11. С. 3505–3507.

УДК 622.835

Ш.А. Мухамедиев, Л.В. Никитин, Е.И. Рыжак

МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД СО СЛОЖНЫМИ РЕОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

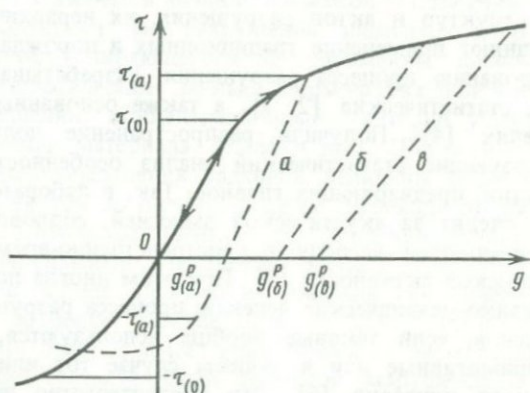
В настоящее время проявляется большой интерес к изучению процессов разрушения горных пород. Сложность и многообразие проявлений процесса разрушения, таких, как наблюдаемые пространственная и временная закономерности структур и актов разрушения, их иерархичность и подобие [1], затрудняют применение традиционных и порождают новые подходы к исследованию процесса разрушения. Разрабатываются подходы вероятностные, статистические [2, 3], а также основанные на перколяционных моделях [4]. Получили распространение полуэмпирические методы, использующие статистический анализ особенностей последовательности событий, предвещающих главное. Так, в лабораторных и шахтных условиях следят за акустической эмиссией, сопровождающей разрушение, в сейсмологии исследуют пространственно-временное группирование сейсмической активности [5]. При этом иногда почти полностью игнорируют физико-механические аспекты процесса разрушения. Из критериев разрушения, если таковые вообще используются, применяются лишь самые примитивные или в лучшем случае тот или иной вариант концентрационного критерия [6]. Это обстоятельство частично объясняется трудностью постановки задачи механики из-за отсутствия в геолого-геофизических приложениях достаточной информации о строении масси-

ва и граничных условиях. Однако существует, как представляется, и другая причина, заключающаяся в том, что многие исследователи отказываются от феноменологических подходов механики, не видя возможности объяснить наблюдаемые проявления процессов разрушения при использовании лишь методов теории упругости (зачастую в приближении сопротивления материалов) и локальных прочностных критериев. При этом упускаются из виду возможности механики сплошной среды в описании разрушения, которые открываются при более полном учете реологических свойств материала горной породы и выборе более адекватных критериев разрушения.

Целью настоящей работы является обсуждение феноменологических подходов к разрушению горной породы в рамках механики сплошной среды.

1. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕОМАТЕРИАЛОВ

В широких диапазонах пространственных и временных масштабов геоматериалы проявляют большое разнообразие реологических свойств. Это приводит к необходимости моделировать их по-разному для различных условий протекания процесса деформирования. Существуют модели геоматериалов со свойствами как зависящими, так и не зависящими от времени. Для сравнительно кратковременных процессов разрушения на первое место выступают свойства, не зависящие от времени. При этом поведение материала делится на обратимое, или упругое, и необратимое, или пластическое. На рис. 1 представлена характерная диаграмма зависимости касательного напряжения τ от сдвига g для упругопластического материала. За начальным пределом упругости τ_0 в материале начинают накапливаться остаточные деформации g^p , уменьшению τ соответствует состояние разгрузки, проходящей по упругому закону (пунктирные прямые $a, б, в$). При этом материал упрочняется: новый предел упругости $\tau_{(a)}$ превышает τ_0 . Как правило, наблюдается эффект Баушингера, заключающийся в том, что величина обратного предела упругости пада-

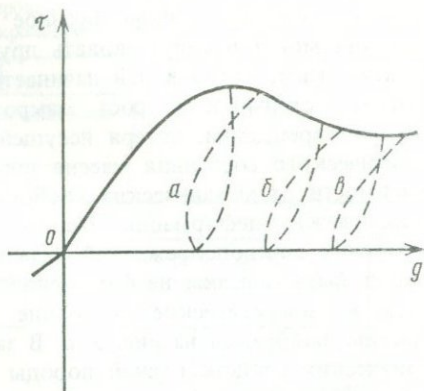


Р и с. 1. Характерная диаграмма зависимости касательного напряжения τ от сдвига g для упругопластического материала

$\tau_{(a)}, \tau_{(б)}, \tau_{(в)}$ — прямой и обратный пределы упругости; $a, б, в$ — кривые разгрузки

Р и с. 2. Характерная диаграмма зависимости касательного напряжения τ от сдвига g для горной породы при фиксированном гидростатическом давлении
 $a, б, в$ — кривые разгрузки

ет: $\tau'(a) < \tau(a)$. Такое поведение характерно для тех материалов, в частности металлов и при определенных условиях некоторых горных пород, в которых механизмом неупругих деформаций служит пластическое скольжение без трения (или дислокации).



Для геоматериалов (грунтов, скальных пород и т.д.) при умеренных температурах и давлениях основным механизмом неупругих деформаций является микрорастрескивание или перестройка кристаллической структуры с разделением зерен. Характерный вид зависимости касательного напряжения τ от сдвига g при заданном гидростатическом давлении p представлен на рис. 2. Экспериментальные данные для подобных материалов необходимо моделировать теориями пластичности, включающими в себя эффекты внутреннего трения и дилатансии [7, 8]. Если процесс разрушения длительный, то в реологические соотношения необходимо включать временные эффекты. В первом приближении можно использовать известные модели вязкоупругих или упруговязкопластических тел.

2. СХЕМА РАЗРУШЕНИЯ

Внешнее воздействие на твердое тело может привести к его механическому разрушению. Предельными случаями разрушения являются идеально хрупкое разрушение, при котором тело разделяется на части без остаточных деформаций, и идеально вязкое разрушение, при котором неограниченно уменьшается хотя бы один из линейных размеров тела. На практике обычно встречаются смешанные виды разрушения. Поэтому под хрупким и вязким разрушениями понимают разделение тела на части соответственно без заметных или при ярко выраженных остаточных деформациях. В отдельный тип имеет смысл выделить разрушение при предельном накоплении микроразрушений (разрыхлений). Понятие разрушение можно относить как к самому материалу горной породы, т.е. к его представительному элементу, так и к массиву.

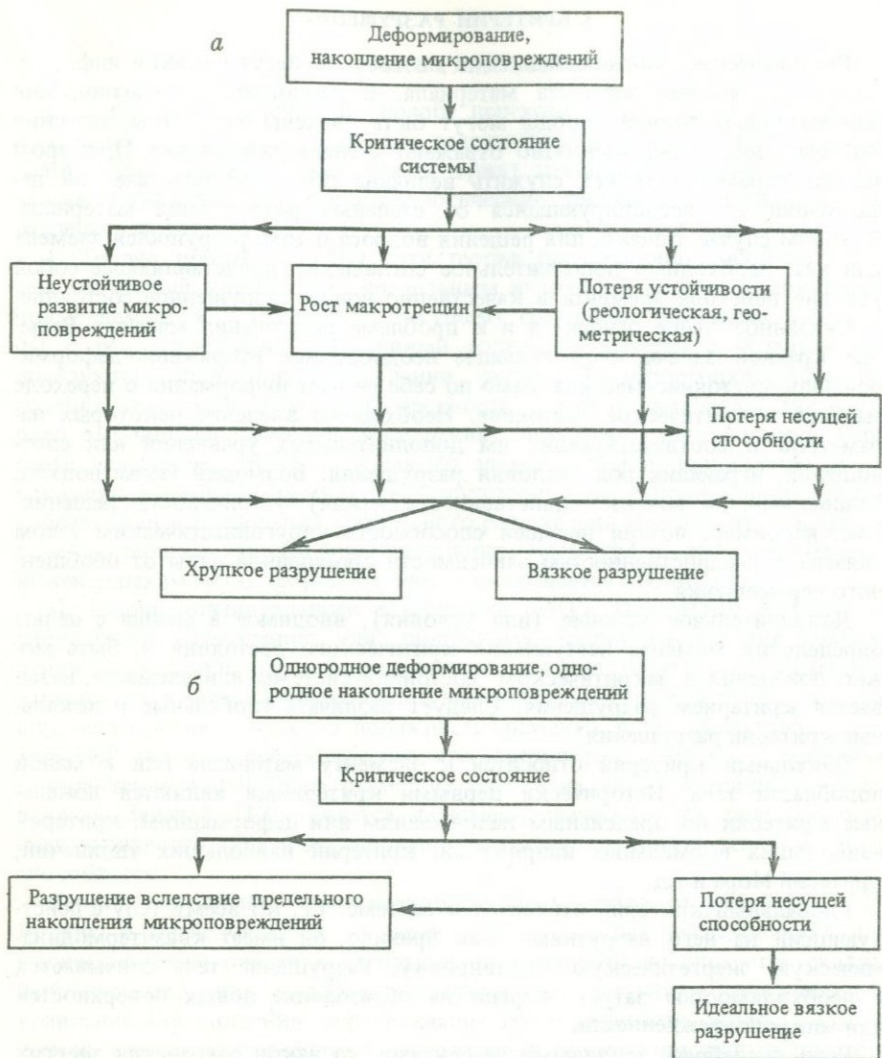
В технике разрушение обычно сопровождается или следует за потерей несущей способности конструкций, т.е. за таким состоянием, когда в конструкции могут появиться неограниченные деформации без приложения дополнительных нагрузок. В природе массив горной породы зачастую разрушается без потери несущей способности. Это происходит в силу специфики условий стеснения, не позволяющих развиваться большим деформациям в массиве или разъединяться вновь образованным его частям. Разрушению могут предшествовать потеря устойчивости, как геометрическая, так и реологическая, подрастание микротрещин в массиве

или неустойчивое лавинообразное накопление микроповреждений. Эти явления могут и сопутствовать друг другу. Состояние системы назовем критическим, когда в ней начинается один из перечисленных процессов: потеря устойчивости, рост макротрещин, лавинообразное накопление микроповреждений, потеря несущей способности. Вплоть до наступления критического состояния массив при нагружении может испытывать в зависимости от механических свойств слагающей его породы упругие или пластические деформации. Процессы постепенного количественного накопления микроповреждений (стадии скрытого разрушения), если они могут быть описаны на феноменологическом уровне, тоже можно включать в докритическое состояние. Схематически процесс разрушения массива изображен на рис. 3, а. В зависимости от геометрии массива, механических свойств горной породы и условий нагружения возможен тот или иной путь по диаграмме. Любой из этих путей будем называть схемой разрушения.

Введенное выше определение разрушения как разделения тела на части касается фактически финального этапа разрушения. Процесс, однако, может закончиться в любом месте схемы. Вопрос о том, считать ли разрушившимся тело, если процесс разрушения не дошел до финальной стадии, требует особой договоренности. В технике утвердительный ответ на этот вопрос обычно дается, если конструкция перестает отвечать предъявляемым к ее работе требованиям. В геомеханике такой критерий отсутствует, и мы условимся считать разрушившимся массив, находящийся в закритическом состоянии.

В отличие от массива элемент материала горной породы как в докритическом состоянии, так и в процессе разрушения сохраняет однородность напряженно-деформированного состояния. Так как для рассмотрения неоднородных критических состояний и видов разрушения необходимы по меньшей мере два элемента, то хрупкое разрушение в схему разрушения элемента (рис. 3, б) не включается. Возможными видами разрушения для элемента являются идеально вязкое разрушение и разрушение при идеальном накоплении микроповреждений, если вплоть до этого предельного состояния поведение поврежденного элемента может быть описано на феноменологическом уровне однородным образом. Этот последний тип разрушения не включен в качестве финального этапа в схему разрушения массива (см. рис. 3, а), потому что в сложнапряженном состоянии, как правило, накопление приводит к развитию магистральной трещины.

При теоретическом анализе схемы разрушения важное значение имеют принятые для материала массива реологические соотношения. В рамках феноменологического подхода последовательный учет реологических свойств материала позволяет анализировать различные более сложные схемы разрушения. При этом, как правило, удается вводить в рассмотрение виды закритических процессов, являющиеся либо принципиально новыми, либо уточненными по сравнению с предыдущими членами реологического ряда. Так, например, в рамках линейной теории упругости возможно рассмотрение процессов роста трещин и геометрической потери устойчивости. Учет вязких или пластических свойств горной породы позволяет не только анализировать более сложные виды геометрической



Р и с. 3. Схемы процесса разрушения массива (*a*) и элемента горной породы (*б*)

потери устойчивости, такие, как поверхностная неустойчивость слоистого массива [9], но и приводит к возможности рассмотрения неограниченного вязкого или пластического течения. Еще более сложные реологические модели материала с внутренним трением и дилатансией позволяют рассматривать реологическую неустойчивость горной породы, проявляющуюся в явлении локализации пластических деформаций и массиве из этого материала [8, 10]. Количество приведенных примеров можно увеличить.

3. КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ

Реологические соотношения сами по себе не несут никакой информации о разрушении элемента материала. В реологические соотношения для материала горной породы могут быть введены параметры, значения которых достаточно адекватно отражают степень разрушения. Примером такого параметра может служить величина объемной пластической деформации ϵ^p , ассоциирующаяся со степенью разрыхления материала. В любом случае, однако, для решения вопроса о том, разрушился элемент или нет, необходимо дополнительное соглашение, представляющее собой условие перехода элемента в качественно новое, разрушенное состояние.

Сказанное выше относится и к проблеме разрушения массива. Решение краевой задачи, определяющее неоднородное напряженно-деформированное состояние массива, само по себе не дает информации о переходе массива в критическое состояние. Необходимо введение некоторых параметров и соответствующих им дополнительных уравнений или соотношений, играющих роль условия разрушения. Возможен также подход, основанный на анализе единственности и (или) устойчивости решения. Так, например, потеря несущей способности упругопластическим телом связана с неединственностью зависимости обобщенной силы от обобщенного перемещения.

Дополнительное условие (или условия), вводимое в анализ с целью определения момента наступления критического состояния и, быть может, поведения в закритическом состоянии системы или элемента, называется критерием разрушения. Следует различать глобальные и локальные критерии разрушения.

Локальный критерий относится к элементу материала или к малой подобласти тела. Исторически первыми критериями являются локальные критерии по предельным напряжениям или деформациям: критерий наибольших нормальных напряжений, критерий наибольших удлинений, критерий Мора и т.д.

Глобальный критерий относится к системе, т.е. ко всему телу с действующими на него нагрузками. Как правило, он имеет квазитермодинамическую энергетическую мотивировку. Разрушение тела связывается с необходимостью затрат энергии на образование новых поверхностей или микроповрежденности.

Если пренебречь тепловыми эффектами, то закон сохранения энергии для разрушающего тела можно записать в виде

$$dE + dK = dA - dW, \quad (1)$$

где dE — изменение внутренней энергии; dK — кинетической энергии; dA — элементарная работа внешних сил; dW — внешний приток немеханической энергии. Разрушение тела связано с отличием от нуля dW , т.е. энергозатратами на разрушение, как правило на образование новых поверхностей.

Будучи использованным для всего тела в целом, уравнение (1) является глобальным критерием разрушения. Если все слагаемые в (1) используются как полевые величины (в этом случае A — работа внутренних сил), то уравнение (1) отвечает локальному критерию разрушения.

Систему представлений о способе перехода в разрушенное состояние и формах проявления процесса разрушения будем называть теорией разрушения. Теории разрушения содержат тот или иной критерий разрушения. Существующие феноменологические теории разрушения можно разделить на три типа.

I. Теории прочности (ТП). Эти теории представляют собой не более чем локальный критерий по предельным напряжениям или деформациям, применяемый, как правило, к текущему состоянию. ТП никак не связаны с реологическими уравнениями состояния материала, которые используются лишь при определении напряженно-деформированного состояния тела, исследуемого на прочность. Элемент материала, для которого выполнен критерий разрушения, считается разрушившимся. Описание дальнейшего поведения такого элемента при продолжающемся нагружении массива в рамках ТП отсутствует. Эти теории плохо приспособлены для исследования глобального разрушения массива, находящегося в неоднородном напряженном состоянии. Несмотря на это, в некоторых инженерных расчетах теорий прочности оказывается достаточно.

II. Теории континуального разрушения (ТКР). Предметом теории континуального разрушения, или, по-другому, теории накопления повреждений, служат процессы деформирования, которые сопровождаются ростом имеющихся и образованием новых микродефектов-микротрещин, микропор, межзеренных пустот в поликристаллических телах. Исходной посылкой ТКР является предположение, что микродефекты малы по сравнению с характерным линейным размером тела, а их число в единице объема велико. Задачей ТКР является феноменологическое описание реологии сред указанного типа и исследование возможности потери телом несущей способности.

Теория накопления поврежденности берет начало от работ [11, 12]. В этих и последовавших за ними многочисленных исследованиях для количественного описания степени поврежденности используется скалярный параметр, для которого постулируется некоторое эволюционное уравнение. Соотношения, определяющие закон упругости, скорость пластической или вязкой деформации, считаются также зависящими от этого параметра, который, однако, не поддается прямому макроскопическому измерению.

Более общий подход, в котором поврежденность характеризуется тензором (как минимум второго ранга), являющимся функционалом, определяемым всем процессом нагружения, рассматривался в [13].

В настоящее время развивается вариант ТКР [14], основанный на учете в принципах термодинамики трансформации термомеханических видов энергии в поверхностную энергию микродефектов. При таком подходе уравнение (1) рассматривается как полевое уравнение, где dW — распределенный сток энергии, сопровождающий образование новых поверхностей при росте микроповреждений. Второй закон термодинамики постулируется в виде условия неотрицательности диссипации, которая принимается равной сумме как традиционных видов диссипации — механической и тепловой, так и диссипации разрушения. Последняя пред-

ставляет собой разность между поглощаемой энергией и энергией, высвобождаемой при росте распределенных дефектов.

Даже в рамках относительно простых моделей рассматриваемый подход описывает ряд важных качественных эффектов, типичных для материалов горных пород: отсутствие разрушения при чисто гидростатическом сжатии; пороговое значение напряжений, при которых начинается разрушение; различие сдвигового разрушения и разрушения отрыва; дилатансию материала; различие динамического и статического предела прочности; комбинированный рост поврежденности, когда наряду с монотонным накоплением поврежденности возможно скачкообразное ее изменение (за счет хрупкого континуального разрушения).

III. Теории хрупкого разрушения (ТХР). В отличие от рассматриваемых выше теорий ТХР, или механика трещин, предполагает заданной первоначальную геометрию дефектов-микротрещин. Задачей теории является исследование эволюции трещин при заданных законах изменения внешней нагрузки на массив. Классический энергетический подход в ТХР предполагает применение баланса (1) ко всему телу в целом с дополнительным условием $dW = \gamma dS$, где γ — эффективная поверхностная энергия; dS — полное приращение поверхности трещин в процессе разрушения. Положительность величины потока энергии в кончик трещины при ее продвижении, что в конечном счете предопределяет корректность использования глобального энергетического критерия (1), для упругих тел обеспечивается видом напряженного состояния у вершины трещины. Это состояние определяется из решения задач теории упругости; в нем напряжения и деформации сингулярны, а их свертка (плотность упругой энергии) имеет способность r^{-1} , где r — расстояние от кончика трещины. В асимптотике сингулярная часть напряжений имеет универсальную угловую зависимость с точностью до сомножителя k — коэффициента интенсивности напряжений. Для квазистатического процесса разрушения в упругих телах глобальный энергетический критерий эквивалентен критерию Ирвина

$$k = k_c, \quad (2)$$

где k_c — константа материала. Несмотря на свою локальную форму, критерий (2) имеет глобальный характер, так как k зависит функциональным образом от данных задачи.

Предлагались также различные локальные критерии предельного равновесия трещин. Они основываются на сравнении каких-либо элементов напряженно-деформированного состояния на некотором заданном расстоянии от вершины трещины с их критическими значениями. Все эти критерии для квазистатического процесса разрушения в упругом теле эквивалентны энергетическому критерию. В динамике различные критерии уже приводят к различным выводам, большую роль здесь играет скорость распространения трещин [15]. Еще более принципиальная разница между критериями возникает при усложнении реологии горной породы.

5. ХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

В реальных телах при нагружении вследствие концентрации напряжений у вершины возникает пластическая зона, поэтому изучение эффектов пластичности приобретает большое значение в ТХР горных пород.

При малой пластической зоне в качестве критерия страгивания трещины можно использовать критерий (2). Однако это уже не справедливо при развитой пластичности, когда размеры пластической зоны становятся сравнимыми с длиной трещины или линейными размерами массива (образца). Для практических нужд удобно сохранить единственный параметр, достижение критического значения которым соответствует страгиванию трещины. В качестве такого параметра предлагалась [16] величина контурного I -интеграла [17]. При исследовании зависимости I от величины внешней нагрузки необходимо с большой точностью учитывать реальные свойства материала [18].

Для квазистатически или динамически распространяющейся трещины, как показано асимптотическим анализом напряженно-деформированного состояния в предположении его непрерывности [19], из-за наличия зон разгрузки порядок особенности напряжений и деформаций в кончике трещины ниже, чем в случае неподвижной трещины. Можно показать, что подобная ситуация имеет место и при наличии в асимптотическом решении поверхностей сильных разрывов, во всяком случае, если эти поверхности не подходят к фронту трещины под нулевым углом к ее берегам или к плоскости ее продолжения. Отмеченные результаты свидетельствуют об отсутствии ненулевого потока энергии в кончик движущегося разреза в упругопластической среде, т.е. о невозможности учета собственно поверхностной энергии γ и использования глобального критерия (1).

Заметим, что эти результаты получены в предположениях неизменности упругих модулей при продолжающемся накоплении остаточных деформаций и изотропном характере упрочнения, т.е. при идеализированных свойствах некоторых металлов, перенесенных, кроме того, на "далекие" участки диаграммы связи напряжение—деформация. Для горных пород характерно существенное уменьшение модулей жесткости с ростом нагрузки (пунктирные линии разгрузки на рис. 1 и 2) и неизотропный характер упрочнения (эффект Баушингера). Можно показать, что если остаточные деформации являются ограниченными при любых уровнях нагрузки, то восстанавливается необходимый порядок особенности напряженно-деформированного состояния у вершины трещины, и парадокс с отсутствием потока энергии в кончик трещины исчезает. К такому же результату приводит и ограниченность разницы между прямым и обратным пределами текучести при любых уровнях нагрузки.

6. ХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ В ВЯЗКОУПРУГОЙ СРЕДЕ

Разрушение массива горной породы является развивающимся во времени процессом. Чаще всего динамический процесс развития магистральной трещины — финальный этап разрушения — начинается лишь через некоторое время после приложения нагрузок. До этого даже при фиксированных внешних нагрузках в массиве происходят медленные процессы подготовки разрушения: постепенные структурные изменения в мате-

риале (накопление поврежденности) или медленное подрастание трещин (см. рис. 3). Чтобы описать эти процессы, необходимо в первую очередь учесть реологические свойства горной породы, явно зависящие от времени. В простейшем случае можно принять, что материал горной породы является линейным вязкоупругим телом.

Недавно было выяснено [20], что в этом случае существует некоторый диапазон нагрузок (P_* , P^*), определяемый реологическими параметрами модели и длиной существующей трещины, который характеризует тип процесса разрушения. Если приложенная фиксированная нагрузка $P < P_*$, то трещина остается неподвижной сколь угодно длительное время. Если $P > P^*$, то трещина сразу же динамически распространяется. При $P_* < P < P^*$ трещина сначала неподвижна, но всегда наступит такой вполне определенный момент t_c , когда она начнет динамически двигаться. Время t_c представляет собой скрытое время задержки разрушения.

Из анализа, проведенного в [20], может быть получен еще один интересный результат. Если геометрия массива и приложенных внешних усилий такова, что трещина устойчива (для увеличения длины трещины необходимо увеличение нагрузок), то распространение трещины происходит скачкообразно: периоды продвижения сменяются периодами покоя при монотонно увеличивающейся нагрузке. Все эти результаты могут найти применение в сейсмологии при исследовании временного группирования землетрясений в сейсмически опасных районах.

7. РЕОЛОГИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД КАК МЕХАНИЗМ ЗАРОЖДЕНИЯ СИСТЕМ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ

Характерной чертой разрушения горных пород как в естественных, так и в лабораторных условиях [21–23] является образование систем параллельных и равноудаленных нарушений, обнаруживающих подобие строения в диапазоне масштабов от сантиметров до десятков километров.

Хотя механизмом разрушения служит микрорастрескивание, наличие глобальных закономерностей подсказывает возможность макроскопического их описания. При этом микрорастрескивание не игнорируется, а учитывается феноменологически через реологические свойства среды (конкретно — через уменьшение пластического модуля). Разрывные же нарушения и их системы в момент своего зарождения отождествляются с особыми, локализационными формами потери устойчивости без нарушения сплошности среды на макроскопическом уровне ($dW = 0$ в (1)).

Такой подход к описанию закономерностей разрушения горных пород на основе и в развитие первоначальных представлений о реологической неустойчивости локализационного типа, заключенных в [8], осуществлен в [10, 24]. Отличие подхода [10, 24] от [8] определяется в основном следующими двумя моментами. Прежде всего это учет конечности массива горной породы через наличие в уравнениях энергетического баланса работы граничных усилий. Учет конечности массива позволил выяснить, что именно достаточно сильное стесняющее действие граничных условий приводит к тому, что наиболее выгоднейшими формами проявления внутренней неустойчивости среды оказываются локализационные формы (сдвиговые

деформации локализируются в предельно тонких слоях, определенным образом ориентированных относительно осей напряжений). Вторым моментом является введение дополнительного "постулата дискретности", предписывающего наличие характерной для материала минимальной конечной толщины d слоев локализации. Введение постулата дискретности позволяет выделять наиболее выгодную среди локализационных форм потери устойчивости. Оказывается, что геометрия соответствующей системы слоев локализации не зависит от d , что влечет за собой геометрическое подобие таких систем. Для массива, представляющего собой полосу или достаточно длинную ее часть, удастся обобщить и регулярность строения систем слоев (и отождествляемых с ними зародышей разрывных нарушений). Сделанные оценки геометрических параметров систем нарушений сопоставимы с имеющимися экспериментальными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе затронуты некоторые вопросы применения феноменологического подхода к описанию процессов разрушения горных пород. Описываемый подход позволяет объяснить большое разнообразие проявлений процесса разрушения горных пород на различных пространственно-временных масштабах. Это обстоятельство дает основание надеяться, что он не потеряет своего значения и в дальнейших теоретических исследованиях в сейсмологии и горном деле. Опыт современных исследований показывает, что даже минимальный учет простейших законов механики разрушения при использовании аппарата иных подходов к описанию и анализу процесса разрушения может дать ценные плоды.

Будущее теории разрушения горных пород состоит, по-видимому, в уже намечающемся в ряде работ разумном сочетании статистического и феноменологического подходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовский М.А., Сардаров С.С. Соподчиненность и подобие геодвижений в связи с естественной кусковатостью пород // Докл. АН СССР. 1980. Т. 250, № 4. С. 846–848.
2. Габриэлов А.М., Кейлис-Борок В.И., Левшина Т.А., Шапошников В.А. Блоковая модель динамики литосферы // Вычислительная сейсмология. М.: Наука, 1985. Вып. 18. С. 31–38.
3. Писаренко В.Ф., Пручкина Ф.М., Шнирман М.Г. Стохастические модели эволюции системы с дефектами // Вычислительная геофизика. М.: Наука, 1984. Вып. 17. С. 25–29.
4. Челидзе Т.Л. Методы теории перколяции в механике разрушения // Изв. АН СССР. МТТ. 1983. № 6. С. 114–123.
5. Прозоров А.Г. Об автомодельности распределения афтершоков по магнитуде // Докл. АН СССР. 1984. Т. 277, № 3. С. 573–577.
6. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. О прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 6. С. 11–18.
7. Николаевский В.Н. Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучей среды // ПММ. 1971. Т. 35, вып. 6. С. 1070–1082.
8. Rudnicki J.W., Rice J.R. Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials // J. Mech. and Phys. Solids. 1975. Vol. 23. N 6. P. 371–394.
9. Гузь А.Н., Чехов В.И. Поверхностная потеря устойчивости слоистой полуплоскости при упругопластическом деформировании слоев // Докл. АН СССР. 1983. Т. 272, № 3. С. 546–550.

10. Никитин Л.В., Рыжак Е.И. Закономерности разрушения горной породы с внутренним трением и дилатансией // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977, № 5. С. 22–37.
11. Качанов Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. 1958. № 8. С. 26–31.
12. Работнов Ю.Н. Механизм длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 215.
13. Ильющин А.А. Об одной теории длительной прочности // Изв. АН СССР. МТТ. 1967. № 3. С. 31–43.
14. Кондауров В.И., Петров И.Б. Расчет процессов динамического деформирования упругопластических тел с учетом континуального разрушения // Докл. АН СССР. 1985. Т. 285, № 6. С. 1344–1347.
15. Костров Б.В., Никитин Л.В., Флитман Л.М. Механика хрупкого разрушения // Изв. АН СССР. МТТ. 1968. № 3. С. 112–125.
16. Broberg K.B. Crack growth criteria and nonlinear fracture mechanics // J. Mech. and Phys. Solids. 1971. Vol. 19, N 6. P. 407–418.
17. Райс Дж. Математические методы в механике разрушения // Разрушение. М.: Мир, 1975. Т. 2. С. 204–335.
18. Мухамедиев Ш.А., Никитин Л.В., Юнга С.Л. Применение модифицированного метода локальных вариаций к задачам нелинейной механики разрушения // Изв. АН СССР. МТТ. 1976. № 1. С. 76–83.
19. Слепян Л.И. Механика трещин. Л.: Судостроение, 1981. 295 с.
20. Nikitin L. V. Application of the Griffith's approach to analysis of rupture in viscoelastic solids // Intern. J. Fract. 1984. Vol. 24. P. 149–157.
21. Стоянов С.С. Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра, 1977. 144 с.
22. Byerlee J., Myachkin V., Summers R., Voevoda O. Structures developed in fault gouge during stable sliding and stick slip // Tectonophysics. 1978. Vol. 44, N 1/4. P. 161–171.
23. Ревуженко А.Ф., Стажевский С.Б., Шемякин Е.И. О механизме деформирования сыпучего материала при больших сдвигах // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1974. № 3. С. 130–133.
24. Рыжак Е.И. Об эшелонной структуре как форме потери устойчивости горной породы // Изв. АН СССР. МТТ. 1983. № 5. С. 127–136.

УДК 539.21+550.36+620.18

В. С. Пономарев

СТРУКТУРЫ САМОПРОИЗВОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Сейчас многие специалисты склоняются к тому, что понять особенности поведения горной породы в массиве исходя из классических моделей среды затруднительно, что для этого требуются другие физические подходы. С наибольшей определенностью эта мысль выражена в работе [1].

Настоящая статья представляет собой попытку взглянуть на разрушение горной породы в массиве с нетрадиционной точки зрения, а именно с точки зрения представлений статистической физики.

1. ИСХОДНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

В статистической физике все физические тела рассматриваются как системы, состояние которых определяется их термодинамическими параметрами (параметрами состояния): температурой, давлением, плотностью, энерго содержанием, химическим потенциалом и т.д.

Согласно одному из основных постулатов статистической физики, макроскопические системы, находясь в фиксированных внешних условиях, самопроизвольно стремятся к такому состоянию, когда в системе прекращаются всякие микроскопические изменения. Параметры системы при этом принимают постоянные значения и далее от времени не зависят. Такое состояние получило название термодинамического (статистического) равновесия.

Самопроизвольный процесс перехода к равновесному состоянию называют релаксацией системы, а период времени, в течение которого осуществляется этот переход, — периодом (или временем) релаксации.

Релаксация по каждому из параметров протекает в общем случае с различной скоростью. Вследствие этого система может находиться в состоянии неполного равновесия. В этом состоянии одни параметры имеют значения, отличные от равновесных, тогда как по другим параметрам релаксация уже произошла.

Обычно движение систем к равновесию рассматривается по какому-либо одному параметру из всей совокупности. В настоящей работе будут рассмотрены только процессы структурной релаксации.

Под структурной релаксацией понимается следующее.

Каждому термодинамическому состоянию системы соответствует ее определенная структура — определенное взаимное расположение частиц (или более крупных частей) системы и образуемая ими пространственная конфигурация. При изменении состояния системы, а это происходит при изменении значений хотя бы одного из ее параметров, в ней возбуждаются процессы, направленные на соответствующую перестройку структуры. Эти процессы и называют структурной релаксацией системы.

На микроуровне самопроизвольная перестройка структуры тела состоит в перегруппировке молекул и их комплексов в результате теплового движения к такому взаимному расположению, при котором энергия системы принимает минимальное значение [2].

Структурная релаксация на микроуровне принимает многообразные выражения. Так, ее выражением являются фазовые и полиморфные изменения вещества, его перекристаллизация, изменение соотношения фазовых и вещественных составляющих и др.

В механике проявления структурной релаксации изучают в двух формах — в форме релаксации напряжений и в форме релаксации деформаций (ползучести). Обе эти формы являются выражением одного и того же процесса — постепенного перехода упругих деформаций в остаточные. Под временем релаксации понимают время, в течение которого напряжения убывают от своей исходной величины (в теле с фиксированной деформацией) в $1/e$ раз. Вместе с тем время релаксации напряжений рассматривают также как характеристическое время, по истечении которого вязкое поведение материала начинает преобладать над его упругим поведением [3]. В науках о Земле время релаксации напряжений имеет значение фундаментальной количественной характеристики реологического поведения вещества Земли.

Переход упругих деформаций в остаточные в механике рассматривается как вязкое течение материала без разрывов сплошности. Однако тот же результат — сбрасывание избыточной энергии при движении системы к

равновесию — может достигаться и в процессе образования разрывов сплошности. Именно такая форма перехода к равновесию, как это будет показано, имеет самое широкое распространение в породах земной коры. Под структурами самопроизвольного разрушения мы и будем понимать в дальнейшем системы трещин, возникающие в твердых телах в процессе структурной релаксации. Эти структуры являются основным предметом дальнейшего рассмотрения.

2. ПРИРОДА СТРУКТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Непосредственной причиной образования структур самопроизвольного разрушения является релаксация структурных напряжений. Рассмотрим их природу.

Известно свойство твердых тел механически связывать в себе некоторое количество потенциальной энергии упругих деформаций (упругой энергии) и сохранять ее затем в механически связанном, "скрытом", состоянии и после устранения внешних воздействий — механических или немеханических, которые были первоначальной причиной ее появления. Среды с достаточно высоким уровнем "скрытой" энергии можно рассматривать как энергодержащие, энергонасыщенные среды, или, отвлекаясь от причин появления в них скрытой энергии, как среды с собственными источниками энергии. В отношении горных пород это положение было сформулировано в работе [4] как принцип активности горных пород.

Наличие упругой энергии в "силовой" форме выражается наличием в твердом теле структурных напряжений. В практике инженерного и горного дела эти напряжения чаще всего называют остаточными напряжениями. Отсутствие единого теоретического подхода к изучению напряжений такого рода сказалось в том, что их обозначают множеством других названий (см., например, [5]).

Во всех случаях под ними понимают напряжения, которые существуют в заданном объеме при отсутствии нагрузок на его граничных поверхностях.

Непосредственную причину возникновения структурных напряжений видят в несоизмеримых изменениях смежных частиц (или более крупных частей), из которых состоит тело. Сведения о различных механизмах возникновения структурных напряжений, рассматриваемых с такой точки зрения, можно найти, например, в работах [6–8].

С точки зрения представлений статистической физики природа структурных напряжений состоит в следующем. Если структура системы не является фиксированной, т.е. если достаточно прочные связи между частицами системы отсутствуют (жидкость, газ), перестройка структуры происходит вслед за изменением значений рассматриваемого параметра и в любой момент времени она близка к равновесной. Если же структура системы фиксирована, т.е. между ее частицами или частями существуют достаточно прочные структурные связи (твердое тело), изменения структуры не успевают следовать за изменением параметра. Между фиксированной структурой тела и его термодинамическим состоянием возникает несоответствие, вследствие чего в структурных связях и возникают напряжения. Они, таким образом, являются своеобразной мерой нарушения статисти-

ческого равновесия вещества — фундаментальной особенностью реальных твердых тел, находящихся в неравновесном состоянии.

Рассмотрим типичный пример. На больших глубинах, в условиях высоких температур и давлений, вещество в процессе его эволюции испытывает "сборку" и "пересборку" на молекулярном уровне — в результате перекристаллизации, вещественных преобразований и т.д. При этом каждая такая "сборка" вещества в его новом структурном качестве происходит в равновесии с термодинамическими условиями тех глубин, где она осуществляется. Поэтому наново образованные структурные связи надмолекулярного уровня оказываются ненагруженными в том смысле, что структурные напряжения в них отсутствуют. В этом случае материал не ощущает того высокого давления, которому он подвержен. Внешнее давление в этом случае уравнивается на связях молекулярного уровня, что выражается в изменении конфигурации атомов или в изменении энергетической структуры электронов [9]. Если сформулированное таким путем вещество в результате тех или иных причин (вследствие восходящего движения или вследствие эрозионного среза) окажется затем на существенно меньшей глубине, в его структурных связях появятся напряжения, которые и могут стать причиной разрушения этих связей.

Примеры, указывающие на "взрывоопасное", метастабильное состояние разгруженных горных пород известны давно. Так, К.И. Богданович приводит случаи, когда глыбы горной породы, добытые в недрах Земли и извлеченные на ее поверхность, спустя некоторое время взрывались уже в отвалах [10]. Подобное разрушение, но протекающее в более медленном темпе, известно как прогрессирующее разрушение [11]. Известны случаи, когда удаление маломощного слоя осадочных пород, соответствующее разгрузке нижележащих скальных пород на величину около одного—двух бар, вело к образованию в последних систем трещин разгрузки [12]. Пример подобных разрушений на ином масштабном уровне — так называемый тектонокессонный эффект. Он состоит в том, что массивам пород, воздымающимся относительно их более стабильной окрестности, свойственно разрушение, протекающее по схеме объемного взрыва [13].

С физической точки зрения случаи такого рода есть выражение процесса перехода фиксированных структур в состояние равновесия, причем переход к равновесию достигается не в процессе непрерывного вязкого течения, а в процессе лавинообразно развивающегося трещинообразования, в процессе деструкции, дезинтеграции разгруженного вещества.

3. РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ СТРУКТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Структурные связи дискретны, локальны. По этой причине дискретны и локальны возбуждаемые ими элементарные поля структурных напряжений противоположного знака, уравновешенных ("замыкающихся") в пространственной области, соизмеримой с размером данной структурной связи [14]. Для того чтобы снять структурные напряжения, требуется разрушить те структурные связи, которыми они обусловлены. Поскольку в горной породе прочность на растяжение намного меньше прочности на сдвиг или на сжатие, то разрушение связей происходит преимущественно образованием трещин отрыва [15]. Ослабление структурных напряжений может

происходить и в процессе ползучести. Например, с этой целью производят отжиг стальных изделий [7]. Однако горные породы все же имеют тенденцию к образованию трещин отрыва и в условиях, способствующих их повышенному пластическому течению [16]. На релаксационную природу трещин такого рода указывал Г.И. Гуревич. Он рассмотрел модель образования трещин в процессе релаксационного течения материала за счет различного времени релаксации у разных составляющих горной породы [2]. На микроуровне структурные напряжения обычно снимаются в результате разрушения связей между зернами минералов и связующим их цементом [15].

В технике, согласно масштабу структурных связей, различают напряжения первого, второго и третьего рода [6]. Напряжения третьего рода уравниваются на уровне дефектов кристаллических решеток. Они являются главной причиной пониженной прочности реальных материалов [17]. В несколько большем масштабе различные дефектные конфигурации кристаллических решеток и их структурные напряжения играют фундаментальную роль при пластической деформации, при зарождении трещин хрупкого разрушения, при росте усталостных трещин и эффекте Баушингера [18]. Структурные напряжения второго рода, уравнивающиеся на уровне связей между кристаллами, и напряжения первого рода, уравнивающиеся на уровне связей между неоднородностями одного порядка с размерами деталей машин и конструкций, служат причиной раздробления материала трещинами отрыва разного масштаба — от микро- до макротрещин. Структурные напряжения второго и первого рода в горных породах, по всей видимости, являются причиной их измельчения и раздробления, начиная от пылевидной фракции типа "бешеной муки", наблюдаемой при внезапных выбросах газа и пыли в угольных шахтах, до раздробления на макроскопические блоки.

Разрушение модельных материалов при разгрузке за счет действия структурных напряжений рассмотрено в работе [19]. Схема опытов была следующей. Перфорированная круглыми отверстиями матрица из плексигласа подвергалась одноосному сжатию. В этом состоянии деформированные отверстия заливались эпоксидной смолой. После ее затвердения нагрузка на матрицу снималась. При этом застывшая смола препятствовала упругому восстановлению формы отверстий, вследствие чего в смоле и в материале матрицы возникали структурные напряжения. Если предварительное сжатие матрицы было достаточно велико, в модели возникали системы субпараллельных трещин отрыва, нормальных к направлению сжатия и последующей разгрузки.

Первым, кто обратил внимание на то, что трещины разгрузки могут образовываться в условиях относительного растяжения, когда все три главных напряжения являются сжимающими и выполняется условие $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, был П. Бриджмен ("пинч-эффект") [20]. А. Фриденталь [7], по-видимому, первым привлек структурные напряжения к объяснению систем субпараллельных трещин разгрузки в предварительно сжатых, а затем освобожденных от сжимающей нагрузки материалах. Сейчас многие исследователи склоняются к мнению, что именно структурные напряжения являются причиной образования диаклазов (трещин отдельности) — трещин без смещения вдоль их берегов [21]. Эти трещины расчленяют

породы, в особенности вблизи земной поверхности, либо на плитчатые отдельности, либо на отдельности тетрагональной формы. Они являются самым распространенным типом разрывных нарушений горных пород [3]. Иногда трещины такого рода называют первичной трещиноватостью, имея под этим в виду, что трещины других видов образуются уже в результате смещения по этим трещинам. Эти трещины С.С. Шульц (старший) рассматривал как планетарную трещиноватость, охватывающую огромный масштабный диапазон — от микротрещин до систем разломов земной коры протяженностью в сотни километров [22]. По морфологическим признакам к трещинам такого же типа можно отнести так называемую ориентированную трещиноватость — системы трещин, образующиеся вокруг горных выработок и буровых скважин и концентрически повторяющие их сечение. По таким трещинам в горных выработках отслаиваются крупные плитчатые отдельности. В меньшем масштабе по ним происходит расслоение пород на пластинки толщиной от одного до десяти миллиметров. Образующиеся пластинки располагаются параллельно забою независимо от напластования пород, угла их падения, наличия прослоек и т.д. [23]. По-видимому, сходную природу имеет и расчленение кернов на дискообразные отдельности, нормальные к продольной оси керна [24]. К.Е. Норман [25] обнаружил системы открытых микротрещин в образцах горных пород, извлеченных из массива, причем они оказались ориентированными в основном по нормали к наибольшему сжимающему напряжению в массиве, т.е. по нормали к направлению, в котором разгрузка при извлечении образцов была наибольшей. В работе [14] отмечено появление упорядоченной трещиноватости в разгруженных образцах горной породы, на что указывает увеличение размера образца в направлении разгрузки и согласованная с этим явлением анизотропия скоростей ультразвуковых волн.

Особо отметим, что горные породы реагируют на разгрузку образованием трещин и в том случае, если разгрузка осуществляется очень медленно. Это подтверждается поведением пород при их разгрузке, происходящей за счет смыва при выработке долин равнинных рек, таких, например, как Дон. Несмотря на крайне незначительный снос материала, свойственный режиму таких рек, скальные породы их ложа тем не менее реагируют на столь медленную разгрузку образованием трещин разгрузки [12].

Особенности образования трещин в результате действия структурных напряжений в различных режимах их возбуждения исследовались на двухслойных моделях. Детальное описание таких моделей приведено в работах [26, 27]. В общих же чертах схема опытов состоит в следующем. Лист резины (толщиной около 1,5–2 см) заливают расплавом легкоплавкого модельного материала (воск, парафин). Застывая, верхний слой (толщиной 2–3 мм) прочно сцепляется с нижним резиновым слоем, после чего резину растягивают с помощью системы домкратов. Поскольку упругие модули верхнего и нижнего слоев различны, на их контакте возникают структурные напряжения, которые затем и определяют картину разрушения верхнего слоя. При одноосном растяжении нижнего слоя в верхнем образуется система трещин, подобных возникающим при одноосной разгрузке: это субпараллельные трещины, нормальные к направлению растяжения. При двухосном и всестороннем (плоском) растяжении образуются более сложные системы трещин. Особо интересен последний слу-

чай. При всестороннем растяжении в материале верхнего слоя формируются преимущественно ортогональные системы трещин, что и определяет блочную структуру разрушенного материала с преобладанием блоков тетрагональной формы. Такая структура типична и для объемных систем трещин отдельности в породах верхних слоев земной коры. Это указывает на то, что такие системы трещин, имеющие самое широкое распространение в скальных массивах пород, по всей видимости образуются благодаря структурным напряжениям, возникающим в условиях всесторонней разгрузки.

4. МОДЕЛЬ ЗОННОЙ РЕЛАКСАЦИИ

По существующим оценкам время релаксации напряжений в консолидированных породах земной коры τ не превышает 20–30 тыс. лет [28]. Из этого следует, что хотя структурные напряжения возбуждаются в самых различных процессах, таких, как, например, вертикальные дифференцированные смещения блоков земной коры, разгрузка положительных форм рельефа за счет смыва вышележащих слоев пород, пластическое деформирование пород при их тектоническом течении, их термо- и динамометаморфизм и др., приращение структурных напряжений за счет таких процессов происходит слишком медленно. Они успевают релаксировать по мере своего появления и не достигают сколько-нибудь существенной величины.

Однако существующие оценки времени релаксации τ не учитывают размеры релаксирующих систем. Из статистической физики же известно, что время релаксации систем возрастает с увеличением их размеров [29].

Процессы структурной релаксации сложны даже в относительно простых системах, вследствие чего аналитические оценки времени релаксации получены лишь в отношении простейших систем, таких, например, как одноатомный газ [30]. Эмпирическая попытка учесть масштабный эффект при структурной релаксации в горных породах была предпринята в рамках модели зонной релаксации [31, 32]. Ее смысл в следующем.

Если горный массив протяженностью L , находящийся в статистическом равновесии, подвергнуть разгрузке, его равновесие этим будет нарушено. Однако напряженное состояние массива при этом изменится не одновременно во всех частях массива, а вначале лишь вблизи поверхности разгрузки — в зоне разгрузки с начальной мощностью l_0 . Во внутренних частях массива напряженное состояние не изменится. Зона разгрузки выполняет функцию прочностного барьера, предохраняющего от разгрузки внутренние части массива. С течением времени, однако, по мере релаксации напряжений в структурных связях зоны разгрузки ее мощность постепенно возрастает — фронт релаксации начинает постепенно перемещаться внутрь массива. По этой причине переход к новому равновесию достигается массивом не в течение τ , как это обычно принимается, а в течение $T \gg \tau$. Из натуральных и опытных данных получено, что $T \approx k(L/l_0)\tau \gg \tau$, причем коэффициент пропорциональности $k = 10-30$. Из этого выражения следует, что при $\tau = 10^4$ лет значения T в больших массивах пород (у которых $L \gg l_0$) могут достигать и превосходить длительность порядка $10^6 - 10^7$ лет.

Поскольку переход больших массивов пород к новому равновесию определяется временем T , а не τ , возможно сильное нарушение равновесия массивов пород даже при весьма медленном течении процессов, нарушаю-

щих равновесие. Возбуждаемые при этом структурные напряжения достигают максимальных значений в области, находящейся на границе между горной породой, уже раздробленной в процессе структурной релаксации, и породой, находящейся в неизменном, "реликтовом" напряженном состоянии, — в зоне метастабильного состояния. Именно в этой зоне происходит трещинообразование вплоть до возникновения динамических, взрывообразно протекающих явлений. Структуры самопроизвольного разрушения, таким образом, возникают в условиях резкого отклонения от состояния равновесия, что позволяет рассматривать их в соответствии с представлениями неравновесной термодинамики, развиваемыми И. Пригожиным и его школой [33], как диссипативные структуры.

Вообще говоря, наличие больших запасов энергии в системе еще не является достаточным условием для развития каких-либо макроскопически выраженных физико-механических процессов. Их возможность определяется не столько запасами упругой энергии, сколько ее градиентом, и они протекают тем интенсивнее, чем значительнее этот градиент. Из модели зонной релаксации следует, что распределение упругой энергии в массивах пород резко неоднородно, в них можно выделить устойчивые области, где градиенты энергии невелики, и неустойчивые области — зоны метастабильного состояния, где ее градиенты велики.

Выделение неустойчивых областей с большими градиентами упругой энергии имеет принципиальное значение при решении различных инженерно-геологических задач, в прогнозе места горных ударов и в большем масштабе — при выделении объемов геологической среды, в которых возможны землетрясения. Кратко коснемся некоторых возможностей такого подхода.

Роль структурных напряжений в возникновении горных ударов обычно не рассматривается. Между тем внедрение горной выработки в массив породы разгружает его, что выражается в нарушении термодинамического равновесия в окрестности горной выработки, обычно определяемой как зона влияния выработки или как зона опорного давления, и появлении здесь структурных напряжений. Последние, в частности, являются причиной ориентированной трещиноватости. На то, что она образуется именно вследствие разгрузки, а не высокого внешнего давления, указывает образование трещин подобного типа при разгрузке вблизи земной поверхности, где горное давление практически отсутствует. О том же говорит интенсивное растрескивание пород в тонком слое вблизи поверхности выработки, быстро убывающее с глубиной. Появление структурных напряжений в окрестности горной выработки повышает хрупкость горной породы, изменяет ее физико-механические свойства и тем самым изменяет характер разрушения, в том числе и в том случае, если процесс внезапного разрушения был инициирован какой-либо другой причиной.

Неустойчивое состояние пород в окрестности выработки станет еще более неустойчивым, если выработка внедрится в зону метастабильного состояния массива породы, равновесие которого нарушено геологическими факторами. В этом случае произойдет наложение полей "возбужденных" и "тектонических" структурных напряжений, что может вызвать появление горного удара или других динамических явлений, наблюдаемых в горных выработках. Поскольку нарушение равновесия массива может происходить

под действием различных естественных причин (денудация, метаморфизм и т.д.), то выяснение природы этих причин является ключевым в понимании особенностей естественного напряженного состояния горного массива. Так, например, Б. Войгт [34] предположил, что денудация положительных форм рельефа приводит к релаксации вертикальных напряжений, в то время как релаксация в горизонтальном направлении не происходит, что и является причиной значительных горизонтальных напряжений вблизи земной поверхности. Если это так, то на основании данных о мощности денудированного слоя и о времени, когда происходила денудация, можно составить и заключение о вероятной величине и пространственном распределении в массиве возбужденных в этом процессе тектонических напряжений. Применение представлений такого рода к конкретным условиям можно найти в работе [35].

Непрерывно протекающий процесс разгрузки горных систем вследствие их денудации может быть одной из основных причин интенсивной коровой сейсмичности, во всяком случае распределение числа коровых землетрясений с глубиной имеет вид, характерный для распределения упругой энергии вблизи поверхности разгрузки. Непосредственно на дневной поверхности землетрясения отсутствуют, их число затем возрастает, достигая максимума на глубине около 5–10 км, а затем быстро уменьшается. Такова, например, интегральная картина распределения слабых коровых землетрясений в Гармском районе [36]. В этом случае нарушение равновесия, обусловленное разгрузкой горной системы, достигает максимума в диапазоне глубин 5–10 км. Здесь происходит интенсивное дробление пород — процесс, который продолжается, но с постепенно убывающей интенсивностью, вплоть до появления систем трещин отдельности, отпрепарированных денудацией, непосредственно на дневной поверхности. Характерно, что в Гармском районе большинство эпицентров слабых землетрясений приурочено к положительным формам горного рельефа. Долины наиболее крупных рек района практически асейсмичны. Более детальное развитие представлений о сейсмичности как о процессе дробления можно найти в работе [37].

5. СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ СРЕДЫ

Так как системы структурных напряжений определяются системами структурных связей, то возникает потребность в такой модели среды, которая бы отражала свойства ее структуры. Рассмотрим некоторые основания для построения такой модели.

Твердое тело — связная система. Оно существует постольку, поскольку в нем имеются в наличии структурные связи. Раздробить тело — значит разрушить его структурные связи, почему статистики дробления можно рассматривать в их существе как статистики, характеризующие набор структурных связей данного тела. Исследования процесса дробления материала под действием структурных напряжений на двухслойной модели [26] показали, что распределение числа структурных элементов, образующихся при дроблении, в зависимости от их количества подчиняется закону повторяемости — универсальной характеристике дискретных структурных элементов. Таким образом, в качестве структурной модели твердого тела может быть принята совокупность структурных связей различного мас-

штабного уровня, подчиняющаяся закону повторяемости и организованная по принципу структур, вложенных одна в другую. Поскольку элементарные поля структурных напряжений возбуждаются структурными связями, то система полей может соответствовать либо данной структурной модели во всех ее звеньях, либо ее отдельным фрагментам. Так, напряжения первого, второго и третьего рода соответствуют макро-, микро- и субмикроскопическим фрагментам строения твердого тела.

При исследовании влияния структурных напряжений на разрушение материалов в технике основное внимание уделяют напряжениям первого рода, уравнивающимся на связях макроскопического уровня. Говоря же о структурных напряжениях в горных породах, имеют в виду главным образом микроструктурные напряжения, хотя в принципе нет никаких ограничений того, что структурные напряжения могут быть обусловлены связями любого масштабного ранга. Причина этого в следующем.

Используя измерительные системы, база измерения которых меньше размеров структурных связей, нельзя определить, являются по своей природе измеренные напряжения структурными или же они обусловлены внешними силами [6]. Поэтому для выяснения природы измеренных напряжений привлекают дополнительные соображения. В технике это обычно не связано с трудностями, поскольку измерения ведутся в деталях и элементах конструкций, свободных от рабочей нагрузки. При измерении же напряжений в некотором объеме пород — это сложная задача, поскольку объем не изолирован от массива. Поэтому напряжения, отличающиеся от тех, какие мог бы обусловить вес налегающих пород, обычно относят к "тектоническим", т.е. к таким, источники возбуждения которых находятся за пределами массива. Вместе с тем измеренные напряжения могут в действительности представлять собой структурные напряжения, образующиеся благодаря структурным связям макроскопических уровней организации геологической среды. В пользу этого говорит то, что: поля таких напряжений сильно дифференцированы; они наблюдаются не только в областях тектонического растяжения; их величина уменьшается с глубиной и др. В конце концов любые напряжения, возникшие за счет процессов, протекающих в теле Земли, самоуравниваются в ее пределах и уже по определению являются структурными напряжениями. Однако вопрос о ранге связей, в пределах которых они уравниваются, является принципиальным, поскольку от этого зависит характер производимых ими разрушений. Наличие структур самопроизвольного разрушения определенного масштабного уровня и свидетельствует о том, что разрушение пород происходило под действием структурных напряжений, возникавших в объеме, вмещающем эти структуры.

Взгляд на разрушение с точки зрения представлений статистической физики позволяет сделать следующие предположения и выводы.

1. Геологическая среда в ее естественном состоянии подвержена очень продолжительным силовым воздействиям. В этих условиях определяющую роль в характере ее деформирования играют процессы самопроизвольной перестройки ее внутренней структуры.

2. Геологическая среда разрушается не только под действием сил, приложенных извне, но и под действием сил, возникающих непосредственно в ней самой.

3. Реальные среды сочетают в себе качества и сплошности, и дискретности. Дискретность структуры и дискретное строение полей структурных напряжений предопределяют ряд специфических особенностей разрушения среды, которые в рамках классических моделей среды встречают принципиальные трудности в их описании.

4. Реальные среды обладают свойством механически связывать в себе упругую энергию. Они могут содержать в себе значительные запасы упругой энергии уже до ее нагружения внешними силами; другими словами, реальные среды следует рассматривать как энергонасыщенные.

5. Структурные напряжения любого масштабного уровня, в том числе и структурные напряжения, возникающие на уровне крупных геологических объектов, представляют собой систему напряжений противоположного знака, уравновешенную в данном объеме среды. Поэтому напряженное состояние среды, в которой замыкаются системы напряжений, неоднородно в принципе.

6. Обычно в механике разрушения основное внимание уделяется главному, магистральному разрыву, разрушающему изделие или некоторый объем среды; с точки зрения развиваемых здесь представлений можно говорить не о полном, а лишь о частичном разрушении, которое определяется рангом разрушенных связей; такое разрушение достигается образованием систем трещин данного масштабного ранга, причем развитие трещин в таких системах взаимно обусловлено.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Родионов В.Н.* От сейсмологии к геомеханике: О модели геологической среды // Вестн. АН СССР. 1983. № 1. С. 82–88.
2. *Гуревич Г.И.* Деформируемость сред и распространение сейсмических волн // М.: Наука, 1974. С. 530.
3. Земля: Введение в общую геологию / Под ред. Дж. Ферхугена. М.: Мир, 1974. С. 839.
4. *Пономарев В.С.* Упругая энергия горных пород и сейсмичность // Экспериментальная сейсмология. М.: Наука, 1971. С. 75–76.
5. *Macherauch E.* Neuere Untersuchungen zur Ausbildung und Auswirkung von Eigenspannungen in metallischen Werkstoffen // Ztschr. Werkstofftech. 1979. Bd. 10, N 3. S. 93–111.
6. *Витман Ф.Ф.* Остаточные напряжения. Л.; М.; Гостехтеоретиздат, 1933. С. 64.
7. Остаточные напряжения в металлах и металлических конструкциях / Под ред. В.Р. Осгуда. М.: Изд-во иностр. лит., 1957. С. 380.
8. *Биргер И.А.* Остаточные напряжения. М.: ГИИТЛ, 1963. С. 232.
9. *Jaegerman A.* The diamond-anvil high-pressure cell // Sci. Amer. 1984. Vol. 250, N 4. P. 42–50.
10. *Богданович К.И.* Землетрясения в Мессине и Сан-Франциско. СПб., 1909. С. 165.
11. *Шейдеггер А.Е.* Физические аспекты природных катастроф. М.: Недра, 1981. С. 232.
12. *Прочухан Д.П.* Трещины разгрузки в скальных основаниях высоких плотин // Сов. геология. 1964. № 7. С. 76–83.
13. *Горлянов П.М., Давиденко И.В.* Тектонокессонный эффект в массивах горных пород и рудных месторождений – важное явление геодинамики // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247, № 5. С. 1212–1214.
14. *Friedeman M.* Residual elastic strain in rocks // Tectonophysics. 1972. N 15. P. 297–330.
15. *Reik G.* Residuelle Spannungen in quarzreichen Gesteinen Röntgendiffractometrische Messung und Erklärungsmöglichkeiten ihrer Entstehung // Geol. Rdsch. 1976. Bd. 65, N 1. S. 66–83.

16. *Griggs D.* Deformation of rocks under high-confining pressures // *J. Geol.* 1936. Vol. 44. P. 541–577.
17. *Павлова Н.Н.* Трешиноватость и разрушение горных пород. М.: Наука, 1970. С. 96.
18. *Макклиток Ф., Аргон А.* Деформации и разрушение материалов // *Разрушения.* М.: Мир, 1970. С. 442.
19. *Reik G., Vardar M.* Bestegen Zusammenhänge zwischen residuellen Spannungen und tektonischer Reanspruchung // *Rock Mech.* 1974. N 6. P. 101–116.
20. *Бриджмен П.* Исследования больших пластических деформаций и разрыва. М.: Изд-во иностр. лит., 1955. С. 448.
21. *Ярошевский В.* Тектоника разрывов и складок. М.: Недра, 1981. С. 245.
22. *Шульц С.С.* Тектоника земной коры. Л.: Недра, 1979. С. 270.
23. *Ефремов Г.Д.* Причины образования внезапных выбросов породы в выработках глубоких шахт // *Уголь Украины.* 1967. № 2. С. 41–43.
24. *Ефремов Г.Д.* Причины образования дисков в кернах скважин // Там же. 1970. № 11. С. 15–16.
25. *Norman C.E.* Geometric relationships between geologic structure and ground stresses near Atlanta // *US Dep. Inter. Bureau Minés Rep. Invest.* 1970. N 7365.
26. *Кулюкин А.М., Пономарев В.С., Ромашов А.Н.* Некоторые закономерности разрушения в двухслойной модели // *Прогноз землетрясений.* М.; Душанбе: Дониш, 1983. № 4. С. 200–210.
27. *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. 17–18.
28. *Белоусов В.В., Гзовский М.В.* Экспериментальная тектоника. М.: Наука, 1964. 119 с.
29. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Статистическая физика. М.: Гостехиздат, 1951. 480 с.
30. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. М.: Физматгиз, 1963. 847 с.
31. *Пономарев В.С.* Зонная релаксация напряжений при разгрузке массивов горных пород // *Докл. АН СССР.* 1981. Т. 259, № 6. С. 1337–1339.
32. *Пономарев В.С.* Парадокс релаксации напряжений в горных породах // *Природа.* 1985. № 5. С. 53–61.
33. *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. С. 506.
34. *Voight B.* Restspannungen im Gestein // *Proc. Inst. Congr. Intern. Soc. Rock Mech.* 1966. N 3. P. 45–50.
35. *Марков Г.А.* О распространении горизонтальных тектонических напряжений вблизи поверхности в зонах поднятий земной коры // *Инж. геология.* 1980. № 1. С. 20–29.
36. *Тейтельбаум Ю.М., Пономарев В.С.* Вариации активности слабых коровых землетрясений с различной глубиной очагов // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1979. № 12. С. 23–35.
37. *Кулюкин А.М., Пономарев В.С., Ромашов А.Н.* Сейсмичность как процесс дробления // *Прогноз землетрясений.* М.; Душанбе: Дониш, 1984. № 5. С. 211–219.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

УДК 550.343.6

Г.А. Соболев

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ БАРЬЕРОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОБЛЕМЕ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Хорошо известное явление сейсмической брешы (seismic gap) представляет собой, согласно определения К. Моги [1], существование потенциально сейсмически опасного места, расположенного между разрывами от уже произошедших больших землетрясений. С точки зрения механики сейсмическая брешь есть участок повышенной прочности, находящийся между двумя разрывами. При этом с качественной стороны не принципиально, представляет ли этот прочностной барьер ранее разрушенный и уже залеченный участок разлома или разрыв в нем формируется вперые.

Начиная с С.А. Федотова [2], многие исследователи использовали сейсмические брешы для долгосрочного прогноза землетрясений, однако детального изучения того, как ведут себя различные геофизические поля в районе брешы во время подготовки землетрясения, не сделано.

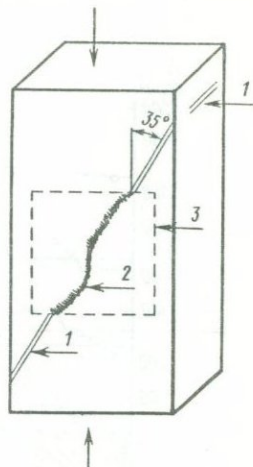
В настоящей работе предпринята попытка исследовать процесс разрушения барьера на моделях из бетона при одновременной регистрации нескольких физических параметров.

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Изучение проведено на моделях двух размеров. Каждая из моделей представляла собой прямоугольную призму (рис. 1), внутрь которой при изготовлении закладывались две пары стеклянных пластин, наклоненных под углом 35° к оси одноосного сжатия. Большие модели имели размеры $2000 \times 1000 \times 500$ мм, и каждая из стеклянных пластин была прямоугольной формы размером $470 \times 330 \times 8$ мм. Модели изготавливались из цемента и гранитного щебня в соотношении 1:3. Гранитный щебень был представлен фракцией 10–20 мм. Малые модели размером $150 \times 75 \times 37,5$ мм изготавливались из цемента и песка в том же соотношении 1:3. Размеры стеклянных пластин $36(46) \times 25 \times 1,2$ мм, размер песчаной фракции – 1–2 мм. На примыкающие друг к другу поверхности стеклянных пластин наносилась высокотемпературная смазка. Это уменьшало коэффициент трения и облегчало взаимное перемещение берегов пластин. Таким образом, пластины служили концентраторами напряжений и деформаций и позволяли получать

Р и с. 1. Схема модели из бетона

1 — проекции на грани модели двух пар стеклянных пластин (концентраторы напряжений), помещенных внутри модели; 2 — магистральный разрыв сдвигового типа; 3 — область размещения различных датчиков для регистрации вариаций физических полей. Стрелки показывают направление одноосного сжатия



внутри моделей магистральные разрывы сдвигового типа при одноосном сжатии. Разрывы происходили вначале внутри моделей и выходили на свободную поверхность в конце экспериментов (см. рис. 1).

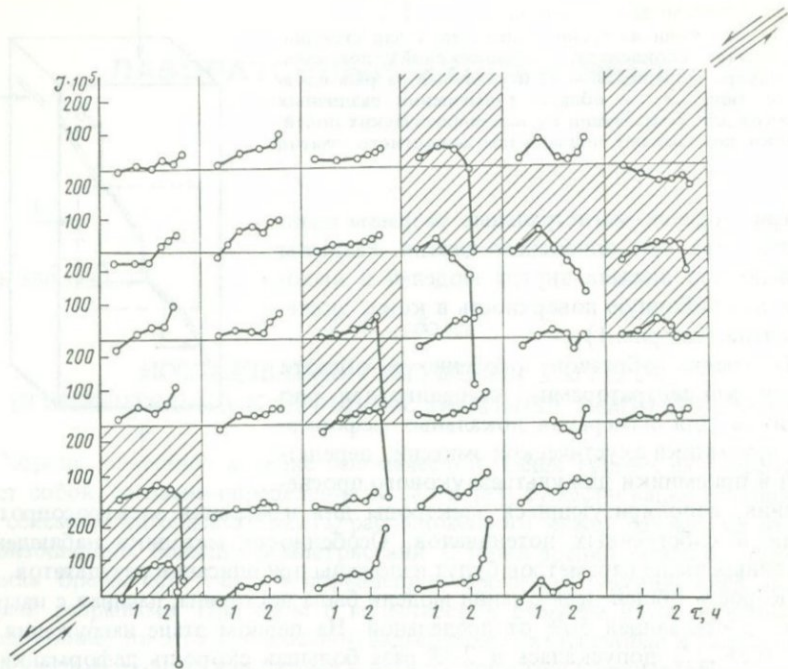
На гранях образцов, особенно в области между концентраторами, устанавливался ряд датчиков для измерения локальных деформаций, приемники акустической эмиссии, передатчики и приемники для ультразвукового просвечивания, неполяризующиеся электроды для измерения электросопротивления и собственных потенциалов. Особенности методики наблюдений названных выше параметров будут изложены при описании результатов.

Скорость общей деформации модели была постоянной, начиная с нагрузки F , достигающей 50% от предельной. На первом этапе нагружения до $F = 0,5F_{\max}$ допускалась в 2–3 раза большая скорость деформации с целью сокращения времени эксперимента. По этой схеме были испытаны 2 большие модели и 36 малых. Малые модели доводились до разрушения в результате одного опыта, а при испытаниях больших проводилось несколько циклов нагружения — частичная разгрузка. В каждом из последующих циклов максимальная нагрузка возрастала, так что одна большая модель была разрушена во время третьего цикла нагружения, а вторая — во время четвертого. Скорость деформации для больших моделей составляла на втором участке деформирования $\dot{\epsilon} = 10^{-8} \text{ с}^{-1}$; малые модели испытывались в широком диапазоне скоростей $\dot{\epsilon} = 10^{-6} - 10^{-8} \text{ с}^{-1}$, хотя в каждом конкретном опыте скорость деформации была постоянной. В статье будут описаны результаты, не зависящие от скорости деформации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА БОЛЬШИХ МОДЕЛЯХ

Показанная на рис. 1 область 3 грани разбивалась на несколько десятков квадратных элементов, на каждый из которых наклеивались по 3 тензодатчика длиной 50 мм, ориентированных в направлении действия внешней нагрузки, перпендикулярно к ней и под углом 45° . Это позволяло следить за изменениями всех компонент тензора плоской деформации для каждого элемента.

На рис. 2. показаны для 36 центральных элементов (108 тензодатчиков) результаты изменения первого инварианта тензора плоской деформации J , представляющего сумму вертикальной ϵ_v и горизонтальной ϵ_h деформаций, $J = \epsilon_v + \epsilon_h$. По оси абсцисс отложено время опыта в последнем IV цикле нагружения модели. Концы графиков для каждого элемента совпадают с мо-

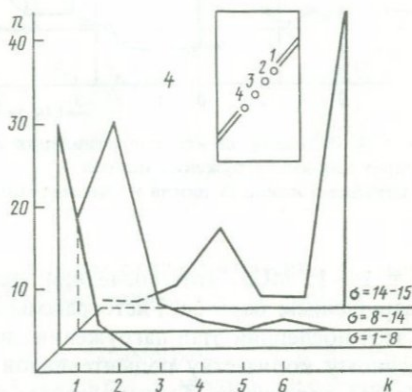
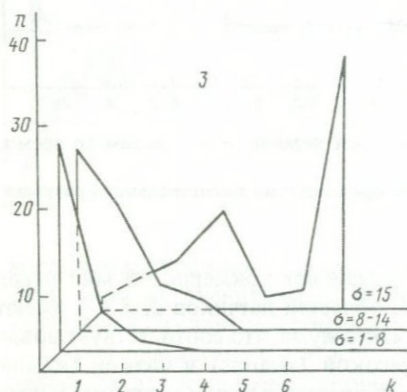
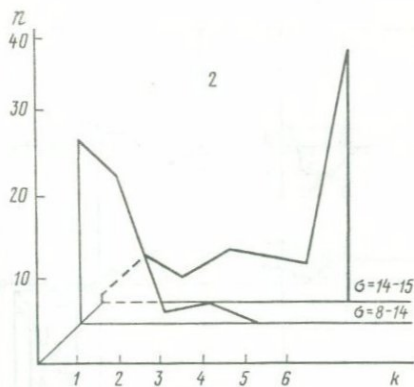
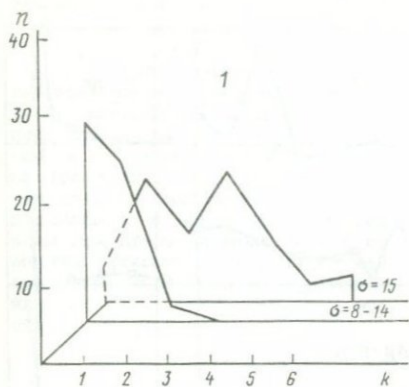


Р и с. 2. Изменение во времени первого инварианта тензора плоской деформации J для различных элементов поверхности барьера перед его разрушением

Двойные линии со стрелками указывают положение проекций концов концентраторов напряжений и направление движения их берегов

ментом прохождения через барьер магистрального разрыва, соединившего концентраторы. Таким образом, каждый график демонстрирует изменение площади соответствующего элемента перед разрушением барьера. Заштрихованы элементы, в которых наблюдались прогностические изменения, выразившиеся в резком переходе от сокращения поверхности элемента к расширению. Видно, что прогностический признак в основном зарегистрирован в последние полчаса перед разрывом. В то же время в ряде элементов, даже находящихся на трассе будущего разрыва, не отмечено предвестника в параметре J . Таким образом проявляется мозаичность пространственного распределения предвестников в поле деформаций. Мозаичность проявления различных предвестников на поверхности Земли перед землетрясениями неоднократно отмечалась, например, И. Нерсесовым [3], М. Широнг [4]. Мы обсудим позднее возможную физическую причину мозаичности проявления предвестников.

Акустическая эмиссия регистрировалась с помощью пьезоэлектрических приемников, размещенных вдоль трассы будущего магистрального разрыва (рис. 3). Логическая схема аппаратуры была построена таким образом, что каждый акустический сигнал от трещины фиксировался только ближайшим к источнику сигнала приемником. Это позволяло разделять число сигналов N в единицу времени для окрестностей каждого датчика. Записывались сигналы частотой выше 20 кГц.

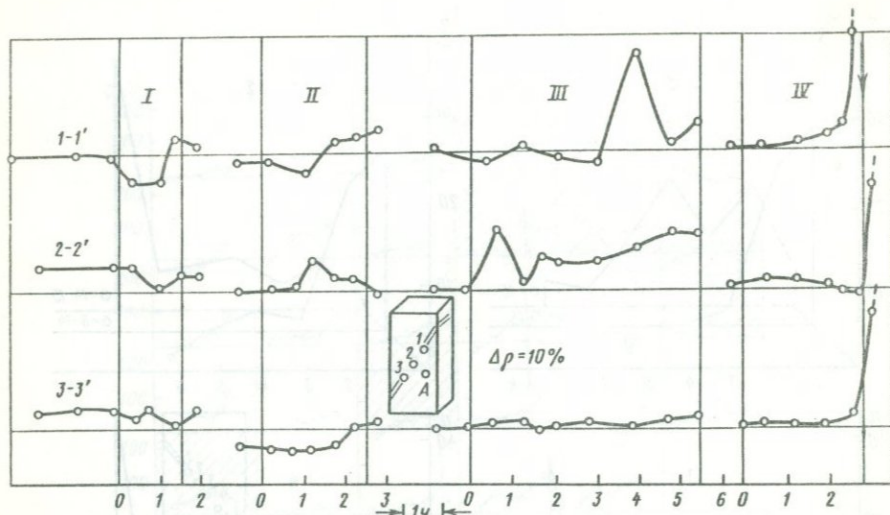


Р и с. 3. Гистограммы распределения числа интервалов n , характеризующихся разным уровнем акустической активности при увеличении нагрузки на модель в IV (последнем) цикле нагружения

1—4 — ультразвуковые датчики. В области датчика 1 предвестник явно не выражен. Схема показывает положение датчиков регистрации акустической эмиссии 1—4

На рис. 3 показаны результаты построения гистограмм n для областей в барьере, относящихся к IV циклу нагружения модели. Для построения гистограмм весь интервал наблюдения разбивался на подынтервалы длительностью по 6 мин каждый. В подынтервале подсчитывалось число акустических сигналов, в соответствии с чем он характеризовался уровнем активности k . При самом низком уровне $k = 1$ число сигналов за 6 мин составило $N \leq 30$. При самом высоком уровне $k = 6$ значение $N \geq 600$. Шкала увеличения уровней активности от 1 до 6 была выбрана логарифмической относительно N .

На рис. 3 по оси ординат отложено количество интервалов соответствующего уровня активности на разных этапах IV цикла нагружения. Возле каждой гистограммы указан диапазон внешнего напряжения σ на модель, охватываемый соответствующей гистограммой. Из рисунка видно, что по мере увеличения нагрузки максимум гистограмм смещается в сторону более высоких уровней активности. Однако во всех случаях гистограммы имеют одномодальный вид, за исключением этапа нагружения при уровне



Р и с. 4. Вариации электросопротивления ρ по трем независимым трассам во время четырех циклов нагружения модели

Стрелка в конце IV цикла указывает момент прохождения магистрального разрыва

$\sigma = 14-15$ МПа. Этот последний этап составляет примерно 45 мин перед разрушением барьера. Гистограммы для областей датчиков 2, 3 и 4 имеют в этот последний этап нагружения два максимума, что соответствует повышенному количеству подынтервалов высокой (swarms) и низкой (seismic silence) активности. Таким образом, перед возникновением магистрального разрыва нарушается статистическая однородность акустической эмиссии.

Так же, как и в случае предвестника в поле деформаций, проявляется неоднородность пространственного распределения акустической эмиссии. Несмотря на то что все датчики 1-4 расположены на трассе будущего магистрального разрыва, в одной из областей, а именно в районе датчика 1, явно выраженного предвестника не зарегистрировано.

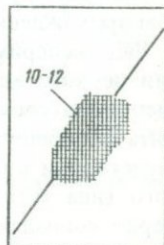
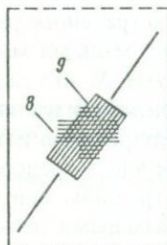
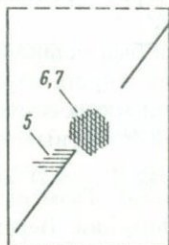
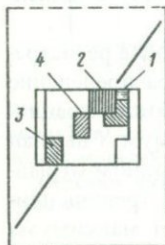
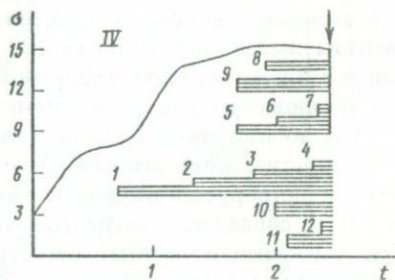
Измерения вариаций электросопротивления $\Delta\rho$ проводились на постоянном токе. На схеме рис. 4 показано размещение питающего *A* и трех приемных электродов 1, 2 и 3. Парные к ним электроды *B* - 1', 2', 3' размещались на противоположной грани модели, так что электрическое просвечивание осуществлялось перпендикулярно граням. В качестве питающих и приемных использовались неполяризующиеся хлорсеребряные электроды. Точность измерения вариаций $\Delta\rho$ была не хуже 3%.

На рисунке также показаны результаты регистрации $\Delta\rho$ в течение четырех циклов нагружения для трех независимых пар приемных электродов 1-1', 2-2', 3-3'. В течение первых циклов I-III наблюдаются нерегулярные и локальные вариации $\Delta\rho$. Синхронные по трем парам электродов изменения, имеющие форму экспоненциально нарастающего $\Delta\rho$, зарегистрированы в последние полчаса IV цикла, т.е. в то же время, когда наблюдались прогностические вариации в поле деформаций (см. рис. 2) и акустической эмиссии (см. рис. 3). Эти изменения можно классифицировать как пред-

Р и с. 5. Время (*вверху*) и место (*внизу*) возникновения различных предвестников на заключительной стадии нагружения большой модели

σ — внешнее напряжение на модель; стрелка указывает момент прохождения магистрального разрыва;

1–4 — поле первого инварианта тензора плоской деформации J ; 5–7 — аномалии отдельных компонент локальных деформаций и угла сдвига для датчиков, расположенных на трассе будущего магистрального разрыва; 8 — времена и амплитуды продольных и поперечных упругих волн при прозвучивании барьера по многим трассам; 9 — акустическая эмиссия; 10 — электросопротивление; 11–12 — электрический потенциал



вестники разрушения барьера. При детальном рассмотрении рис. 4 отмечается, что экспоненциальное нарастание $\Delta\rho$ начинается на разных парах электродов со сдвигом во времени.

Кроме описанных выше наблюдений за параметрами J , N и $\Delta\rho$, проводилась также регистрация скоростей и амплитуд продольных и поперечных упругих волн при прозвучивании модели по многим трассам, непрерывно регистрировались компоненты локальных деформаций разноориентированными датчиками и вычислялся угол сдвига, наблюдались изменения собственного электрического потенциала модели во многих точках. Результаты временного и пространственного распределения аномальных изменений (предвестников) всех названных выше параметров показаны на рис. 5. Большинство из них отчетливо проявлялось на последней стадии эксперимента, когда приложенное к модели напряжение оставалось постоянным или падало (см. верхнюю часть рис. 5). Отметим, что в соответствии с заданным режимом деформирования $\dot{\epsilon} = \text{const}$ общая деформация модели на данном участке эксперимента линейно возрастала со временем, т.е. модель находилась в стадии неустойчивой деформации.

Место возникновения каждого из предвестников показано на диаграммах нижней части рис. 5. Большинство из них возникает в барьере, хотя пространственное распределение весьма неоднородно.

Наблюдая и анализируя в реальном времени весь комплекс указанных параметров, мы имели возможность прогнозировать время разрушения барьера с точностью $\Delta T \leq 0,5$ ч. При условии деформирования модели с постоянной скоростью $\dot{\epsilon} = 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ и полученной экспериментально предельной деформации модели $\epsilon_{\text{max}} = 0,3\%$, это время прогноза ΔT составляет 5% от общего времени нагружения.

Ряд предвестников разрушения барьера более детально исследовался на малых моделях. На рис. 6 показаны изменения числа сигналов акустической эмиссии N в единицу времени для двух экспериментов. Акустические сигналы имели частоту более 100 кГц. Оба эксперимента проведены при одной и той же скорости деформирования $6 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$.

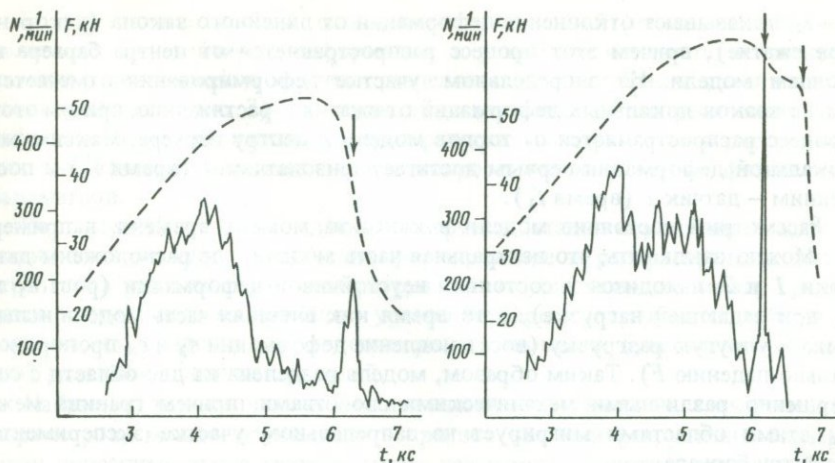
Как видно из рис. 6, максимум N наблюдается в начале нелинейного участка возрастания нагрузки F на модель. Затем наступает период глубокого акустического затишья. За несколько минут до магистрального разрыва регистрируется вторичное резкое возрастание параметра N , максимум которого совпадает с моментом динамического распространения разрыва. При уменьшении частоты регистрации акустической эмиссии отмечено уменьшение промежутка времени между первым максимумом N и моментом прохождения магистрального разрыва.

Ряд экспериментов с малыми моделями был остановлен после регистрации первого максимума N , что дало возможность изучить распределение трещин на срезах моделей визуально и под микроскопом. Можно предложить следующую интерпретацию изменений N . Первый максимум N вызван нарастанием в барьере числа трещин размером 1–3 мм в основном отрывного типа (условно, трещины первого ранга). Размеры этих трещин примерно совпадают с размерами песчаной фракции. Переход от максимума N к акустическому затишью вызван процессом слияния этих трещин и образованием более длинных порядка 1 см, в том числе сдвигового типа (трещины второго ранга). Количество этих трещин в единицу времени меньше, чем на предыдущем этапе, это отражается в уменьшении N в рассматриваемом выше частном диапазоне.

Вторичное увеличение N вызвано лавинообразным объединением трещин второго ранга с образованием магистрального разрыва. При этом разрушаются барьеры меньшего масштаба между трещинами второго ранга и шероховатости (asperities) берегов магистрального разрыва.

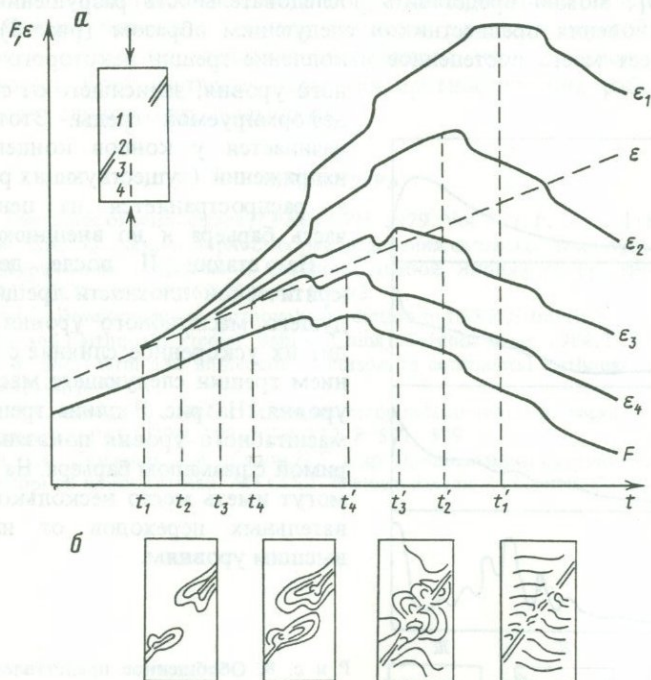
На малых моделях был исследован процесс миграции деформаций. Рис. 7 демонстрирует обобщенный результат этого исследования. На 4 схемах рис. 7, а показано последовательное изменение рельефа грани модели, зарегистрированное с помощью метода лазерной интерферометрии [5]. На допредельном участке нагружения модели (до максимума нагрузки F) наблюдается рост двух областей интенсивных деформаций, начинающийся от концов концентраторов. На максимуме F формируется проходящий через весь барьер магистральный разрыв. Однако при этом остаются неразрушенными барьеры меньшего масштаба и шероховатости берегов разрыва, что обуславливает сложную форму поля деформаций. На запредельном участке нагружения — при падающей нагрузке F — разрыв становится все более гладким по мере разрушения упомянутых выше барьеров и шероховатостей.

На рис. 7, б схематически показаны в функции времени графики вертикальных компонент деформации $\epsilon_1 - \epsilon_4$, регистрируемых наклеенными на поверхность модели тензодатчиками 1–4, а также график общей деформации (укорочения) модели ϵ и нагрузки F . Видно, что на допредельном участке нагружения датчики 1–4 последовательно в моменты времени



Р и с. 6. Изменение числа акустических сигналов N в единицу времени (сплошные линии) в сопоставлении с изменением нагрузки F (пунктирные линии) для двух малых моделей

Стрелки указывают моменты возникновения вышедших на поверхность модели трещин



Р и с. 7. Схемы распределения поля поверхностных деформаций (а) и последовательного изменения рельефа грани модели (б)

1-4 – тензодатчики; F – график нагрузки; ϵ – график общей деформации (укорочения) модели

t_1-t_4 показывают отклонение деформации от линейного закона (ускоренное сжатие), причем этот процесс распространяется от центра барьера к концам модели. На запредельном участке деформирования отмечается смена знаков локальных деформаций от сжатия к растяжению, причем этот процесс распространяется от торцов модели к центру барьера. Максимумы локальной деформации первым достигает тензодатчик 4 (время t'_4) и последним — датчик 1 (время t'_1).

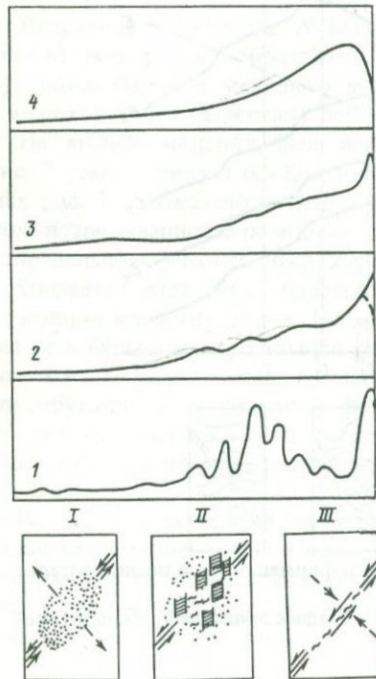
Рассмотрим состояние модели в какой-то момент времени, например t'_2 . Можно заключить, что центральная часть модели, где расположены датчики 1 и 2, находится в состоянии неустойчивой деформации (рост ϵ_1 и ϵ_2 при падающей нагрузке), в то время как внешняя часть модели испытывает упругую разгрузку (восстановление деформации ϵ_3 и ϵ_4 пропорционально падению F). Таким образом, модель разделена на две области с совершенно различными механическими свойствами, причем граница между этими областями мигрирует на запредельном участке эксперимента к центру барьера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая проведенный комплекс наблюдений на больших и малых моделях, а также сделанные ранее исследования на больших блоках горных пород [6], можно представить последовательность разрушения барьера и возникновения предвестников следующим образом (рис. 8). На стадии I имеет место постепенное накопление трещин некоторого масштабного уровня, зависящего от структуры деформируемой среды. Этот процесс

начинается у концов концентраторов напряжений (существующих разрывов) и распространяется на центральную часть барьера и во внешнюю область.

На стадии II после достижения критической плотности трещин предыдущего масштабного уровня происходит их ускоренное слияние с образованием трещин следующего масштабного уровня. На рис. 8 длина трещин этого масштабного уровня показана соизмеримой с размером барьера. На практике могут иметь место несколько последовательных переходов от низших к высшим уровням.



Р и с. 8. Обобщенное представление стадий разрушения барьера (внизу) и развития предвестников (вверху)

1 — акустическая эмиссия; 2 — локальные деформации; 3 — дисперсия (коэффициент вариации) большинства предвестников; 4 — внешняя нагрузка на модель

Возникновение трещины есть процесс постепенной (не мгновенной) локализации неустойчивой деформации, в результате чего материал вокруг каждой развивающейся трещины разделяется на две области с различными свойствами (см. рис. 7). Это приводит к мозаичному распределению поля деформаций (и напряжений) в пространстве, что отражается в распределении акустической эмиссии, электросопротивления и других физических параметров.

На стадии III на фоне падающей нагрузки (стадия неустойчивой деформации всей модели) происходит формирование и распространение магистрального разрыва. При этом разрушаются существующие между трещинами предыдущего масштабного уровня барьеры и шероховатости берегов разрыва, что приводит к появлению резких аномалий (увеличению дисперсии) различных физических полей.

Наблюдая за комплексом механических, акустических, электрических параметров, можно осуществлять прогноз времени разрушения барьера. Если описанные выше модели имеют некоторую аналогию с реальной ситуацией в Земле, например в областях сейсмических брешей, то полученные в данной работе результаты укрепляют физический базис прогноза землетрясений и горных ударов.

Важно подчеркнуть, что при описанном выше подходе широко известное явление неоднородного (мозаичного) распределения предвестников есть неизбежное отражение самого процесса развития неустойчивой деформации, а не только следствие дискретного, неоднородного строения горных пород. Соответственно стратегия прогностических работ должна учитывать это свойство предвестников.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mogi K.* Two kinds of seismic gaps // PAGEOPH. 1979. Vol. 117. P. 1172–1186.
2. *Федотов С.А.* О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии // Тр. Ин-та Физики Земли АН СССР. 1965. № 36 (203). С. 66–93.
3. *Nersesov I.L.* Development of earthquake prediction in USSR // Intern. Symp. Continent. Seismicity and Earthquake Predict. Beijing (China): Seismol. press, 1984. P. 373–383.
4. *Shirong M.* Short-term and immediate precursors to continental earthquakes in China // Ibid. P. 440–461.
5. *Spetzler H.A., Sholz C.H., Lu C.J.* Strain and creep measurements on rocks by holographic interferometry // PAGEOPH. 1974. Vol. 112. P. 571–579.
6. *Соболев Г.А., Семерчан А.А., Салов Б.Г.* и др. Предвестники разрушения большого образца горной породы // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 8. С. 29–43.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ ПОДОБИЯ В ВЫДЕЛЕНИИ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД НА РАЗЛИЧНЫХ МАСШТАБНЫХ УРОВНЯХ

Разработка физических основ прогнозирования землетрясений и горных ударов в последние годы все больше базируется на исследовании физики очага разрушения и очага землетрясения. Постановка экспериментальных и теоретических работ по моделированию очага землетрясения и горного удара предусматривает подобие процессов деформирования и разрушения горных пород на различных масштабных уровнях. В настоящее время можно выделить три основных физических причины, лежащих в основе процесса разрушения на всех масштабных уровнях и связанных с выделением упругой энергии.

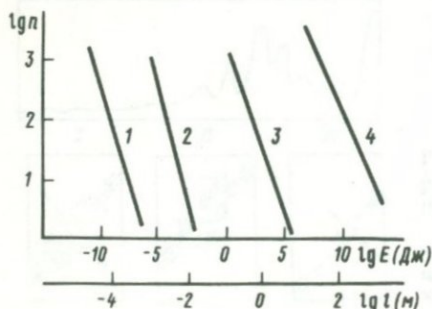
1. Деформирование и разрушение горных пород, как и любых твердых тел, является термоактивационным процессом, развивающимся во времени [1–3].

2. В развитии процесса разрушения определяющую роль играет структурная гетерогенность горных пород, имеющая подобие на всех масштабных уровнях [4, 5].

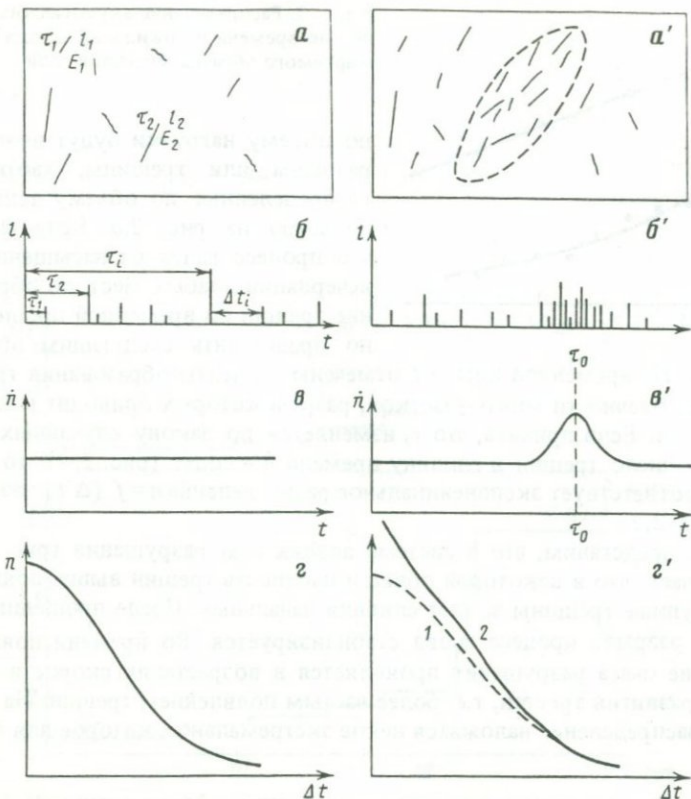
3. Процесс разрушения является стохастическим дискретным процессом зарождения и развития повреждений (трещин, сдвигов и др.) [6, 7].

Действие перечисленных причин определяет как распределение трещин по размерам, кинетику их накопления и развития, так и выделение при этом упругой энергии. Связь между размерами трещин и выделяющейся при их образовании упругой энергии демонстрируется для различных масштабных уровней на рис. 1. Для сейсмических разрывов (сдвигов) связь между размерами разрывов (сдвигов) и выделяющейся при этом энергией принималась на основе эмпирической зависимости [8]. Для лабораторных экспериментов эта связь базируется на специально проводимых модельных экспериментах [9, 10]. Это позволяет предложить количественную связь между размером разрывов ($l, м$) и выделяющейся при этом упругой энергией ($E, Дж$):

$$E = al^3, \quad a \approx 10^3 - 10^4 \text{ Дж/м}^3. \quad (1)$$



Р и с. 1. Графики повторяемости выделения упругой энергии для акустических сигналов при деформировании образца гранита (1), при разрушении целлика (2), для горных ударов в СУБРе (3), для землетрясений в районе Нурека (4)

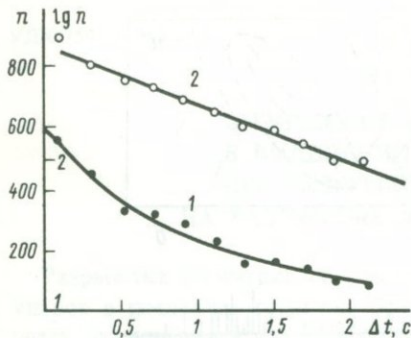


Р и с. 2. Модель некоррелированного накопления трещин ($a-z$) и формирования очага разрушения ($a'-z'$)

a, a', b, b' — схемы появления трещин длины l , энергии E в моменты времени t ; v, v' — зависимости скорости образования трещин \dot{n} от времени t ; z, z' — распределения числа трещин n в зависимости от интервала времени между соседними трещинами Δt

Функциональная связь могла быть предложена априори, поскольку упругая энергия выделяется из объема, в котором происходит перераспределение упругих механических напряжений при появлении в нем разрыва, соизмеримого с его линейными размерами. Коэффициент пропорциональности a связан с конкретными условиями при образовании трещин (полем механических напряжений, свойствами пород и т.д.). С точностью до этого коэффициента можно переходить при необходимости от энергетических параметров к геометрическим при анализе образования трещин. Это оказывается удобным при анализе процесса выделения упругой энергии с позиций физики разрушения, использующей для описания такие понятия, как трещины, прочность, долговечность и т.д.

Представим схематически процесс зарождения трещин в нагруженном объеме, если в нем нет каких-либо особенностей, заранее определяющих локализацию процесса. Структурные элементы имеют нормальное распределение по прочностям и размерам. В этом случае при действии средней

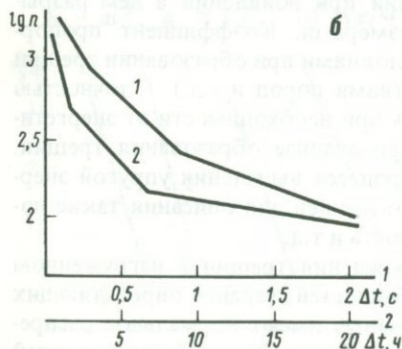
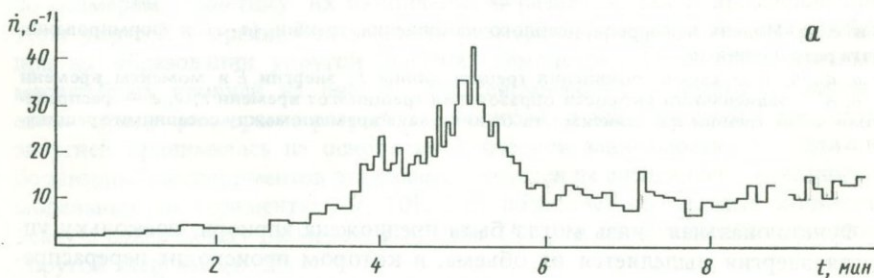


Р и с. 3. Распределение акустических сигналов по времени их ожидания Δt для деформируемого образца каменной соли

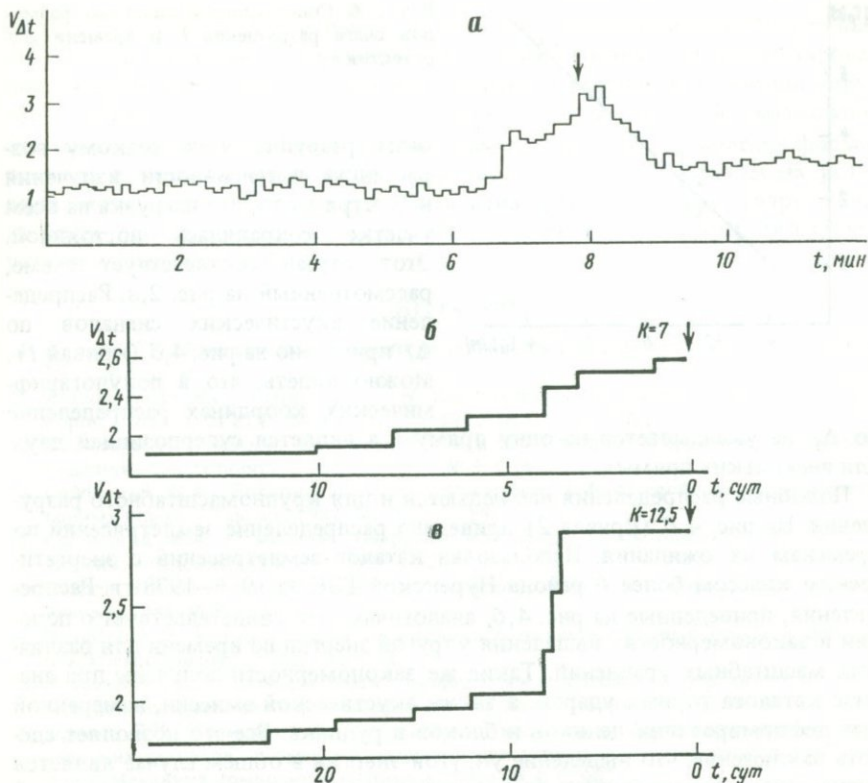
по объему нагрузки будут возникать разрывы или трещины, хаотически распределенные по объему тела, как показано на рис. 2,а. Если считать, что процесс далек от насыщения или исчерпания слабых мест, то образование трещин во временной шкале можно представить следующим образом

(рис. 2,б). На временной шкале t отмечены моменты образования трещин τ_i или долговечности микроучастков, разрыв которых приводит к появлению трещин. Если принять, что τ_i изменяется по закону случайных чисел и среднее число трещин в единицу времени $\dot{n} = \text{const}$ (рис. 2,в), то этому случаю соответствует экспоненциальное распределение $n = f(\Delta t)$, показанное на рис. 2,г.

Теперь представим, что в системе возник очаг разрушения (рис. 2,а'). Это означает, что в некоторой области плотность трещин выше, появились более крупные трещины за счет слияния начальных. После прошедшего через очаг разрыва процесс снова стабилизируется. Во времени появление и развитие очага разрушения проявляется в возрастании скорости накопления и развития трещин, т.е. более частым появлением трещин. На равномерное распределение наложится некое экстремальное, которое для просто-



Р и с. 4. Активность излучения акустической эмиссии при деформировании образца (а) и распределения событий по времени их ожидания Δt (б) для образца (1) и сейсмического района (2)

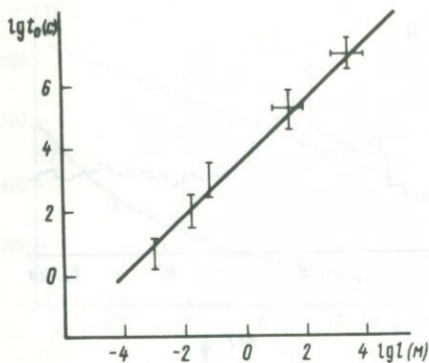


Р и с. 5. Изменение коэффициента вариации времен ожидания событий перед высокоэнергетическим событием для образца (*a*), горного удара (*б*), землетрясения (*в*)

ты будем полагать близким к нормальному (рис. 2, *б'*, *в'*). Распределение по интервалам между временами ожидания трещин примет более сложный вид (рис. 2, *г'*). Пунктирная линия на рис. 2, *г'* соответствует первому случаю без очага.

Рассмотренный случай до предела упрощен, однако качественно сохраняет основные физические причины, сформулированные в начале. Более того, рассмотренные схемы согласуются с экспериментальными результатами. Первому случаю, т.е. чисто стационарному некоррелированному процессу зарождения трещин, наиболее близок случай деформирования с постоянной скоростью образца каменной соли. На рис. 3 приведено распределение числа акустических сигналов по Δt для образца каменной соли, одноосно деформируемого с постоянной скоростью. Можно видеть, что это распределение близко к экспоненциальному, т.е. в полулогарифмических координатах оно описывается прямой (2) в широком диапазоне Δt .

Теперь обратимся к более сложному случаю, когда на стационарный процесс накладывается развитие очага разрушения. Этому случаю в лабораторных условиях соответствует деформирование более хрупких материалов, таких, как гранит, диабаз и т.д. На рис. 4 приведен график изменения скорости акустической эмиссии \dot{n} , на котором выделяется период развития



Р и с. 6. Сопоставление линейных размеров очага разрушения l и времени его развития t_0 .

очага разрушения по резкому возрастанию интенсивности излучения несмотря на то, что нагрузка на всем участке сохранялась постоянной. Этот случай соответствует схеме, рассмотренный на рис. 2, в. Распределение акустических сигналов по Δt приведено на рис. 4, б (кривая 1). Можно видеть, что в полулогарифмических координатах распределение

по Δt не укладывается на одну прямую, а является суперпозицией двух или нескольких прямых.

Подобные распределения наблюдаются и для крупномасштабного разрушения. На рис. 4, б (кривая 2) приведено распределение землетрясений по временам их ожидания. Использован каталог землетрясений с энергетическим классом более 6 района Нурекской ГЭС за 1956–1978 гг. Распределения, приведенные на рис. 4, б, аналогичны, что свидетельствует о подобии в закономерностях выделения упругой энергии во времени для различных масштабных уравнений. Такие же закономерности получены при анализе каталога горных ударов, а также акустической эмиссии, измеренной при деформировании целиков и блоков в руднике. Все это позволяет сделать заключение, что выделение упругой энергии в общем случае является результатом суперпозиции стационарного процесса излучения упругой энергии при некоррелированном стохастическом образовании трещин и нестационарного процесса при развитии очага разрушения. Отсюда открывается возможность выявлять очаг разрушения и исследовать кинетику его развития, анализируя во времени статистические параметры процесса излучения.

Для демонстрации этого на рис. 5 приведены примеры изменения коэффициента вариации времен ожидания событий энерговыделения ($V_{\Delta t}$) перед наиболее энергетическим импульсом при деформации образца (а), перед горным ударом (б), землетрясением (в). Для горного удара и землетрясения время отсчитывается для удобства от момента события. Для образца использовано текущее время. Для всех этих случаев наблюдается возрастание $V_{\Delta t}$ перед крупными энерговыделениями. Можно сделать и количественные оценки. Если время, за которое наблюдается возрастание $V_{\Delta t}$, принять за время нестационарного развития очага разрушения (t_0), то можно сопоставить это характерное время с линейными размерами очага разрушения или с размером образовавшейся при этом трещины (рис. 6). Безусловно, эти результаты можно рассматривать как оценочные. Тем не менее можно считать, что корреляция имеется.

Приведенные экспериментальные результаты свидетельствуют о наличии подобия в развитии процесса разрушения на различных масштабных уровнях. Это подобие обусловлено тем, что как при развитии процесса разрушения на его стационарной стадии, так и при развитии очага разрушения

определяющее воздействие имеют физические причины, перечисленные выше. Отсюда вытекают и некоторые следствия, важные для прогнозирования. Прежде всего, прогнозирование времени и мощности излучения упругой энергии (в том числе горных ударов и землетрясений) возможно, не только с вероятностной точностью. Закономерности по кинетике формирования и развития очага разрушения, полученные в лабораторных условиях, могут быть использованы для анализа развития очагов разрушения на более высоких масштабных уровнях в целях прогнозирования горных ударов и землетрясений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестн. АН СССР. 1983. № 3. С. 46.
2. Томашевская И.С., Хамидуллин Я.Н. Предвестники разрушения образцов горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1972. № 5. С. 12–30.
3. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. и др. К вопросу о прогнозировании разрушения горных пород // Там же. 1977. № 6. С. 8.
4. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. О свойстве дискретности горных пород // Там же. 1982. № 12. С. 3–18.
5. Садовский М.А. О моделях геофизической среды и сейсмического процесса // Прогноз землетрясений. 1983. № 4. С. 268.
6. Петров В.А. Основы кинетической теории разрушения и его прогнозирование // Там же. 1985. № 5. С. 30.
7. Челидзе Т.Л. Методы теории перколяции в механике горных пород и физике очага землетрясения // Там же. С. 8.
8. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9–27.
9. Фролов Д.И., Килькеев Р.Ш., Куксенко В.С. и др. Связь между параметрами акустических сигналов размерами разрывов при разрушении гетерогенных материалов // Механика композит. материалов. 1980. № 4. С. 907.
10. Куксенко В.С., Ляшков А.П., Мирзоев К.М. и др. Связь между размерами образующихся под нагрузкой трещин и длительностью выделения упругой энергии // Докл. АН СССР. 1982. № 4. С. 846.

УДК 622.837/839

В.А. Мансуров

НАПРАВЛЕННОСТЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГОРНЫХ УДАРОВ

Наблюдения за процессами разрушения, как техногенными, так и тектоническими, протекающими в земной коре, ведутся уже достаточно давно, но эти наблюдения далеко не достаточны, чтобы позволить сформулировать на их основе критерии прогноза места, времени и мощности динамических явлений в горных породах. Эта недостаточность знаний обусловлена относительно бедной информацией о напряженном состоянии и реакции на его изменение в земной коре. Более того, в настоящее время не совсем ясно, за какими процессами необходимо следить, какие методы контроля этих процессов должны применяться и какие прогностические признаки должны приниматься во внимание для обеспечения прогноза. В связи с этим особую значимость приобретают лабораторные исследования процесса разрушения горных пород, которые позволяют промоделировать различ-

ные условия развития разрушения (различные структуры, напряженные состояния и т.д.), используя при этом методы контроля за процессом разрушения как на микроскопическом, так и на макроскопическом уровнях.

В последнее время при исследованиях процесса разрушения в непрозрачных твердых телах и горных породах большое применение находит метод акустической эмиссии (АЭ). Землетрясениям и сейсмическим сотрясениям, сопровождающим горные удары, в лабораторных условиях соответствуют акустические сигналы (АС), сопровождающие растрескивание и разрушение образцов горных пород.

В упрощенном варианте метод АЭ давно использовался в горной науке и сейсмологии как в лабораторных, так и в натурных условиях — регистрировалось число АС и в некоторых случаях амплитудные распределения. Однако этих параметров оказалось недостаточно для решения более сложных задач, связанных с прогнозированием. Тем не менее удалось определить некоторые закономерности процесса разрушения, подобие которых сохраняется на разных масштабных уровнях. Так, известная количественная закономерность статистического характера, свойственная сейсмическому режиму, состоит в "законе повторяемости землетрясений". При горных ударах и разрушении образцов горных пород наклоны графиков повторяемости ($\gamma = \text{tg } \alpha$) АС оказываются величинами того же порядка, что и при землетрясениях.

Благодаря работам, связанным с развитием метода АЭ, были существенно расширены его возможности и внесена большая определенность в измеряемые параметры. Это потребовало нового аппаратного решения с использованием анализаторов импульсов, специальных блоков обработки АС и ЭВМ.

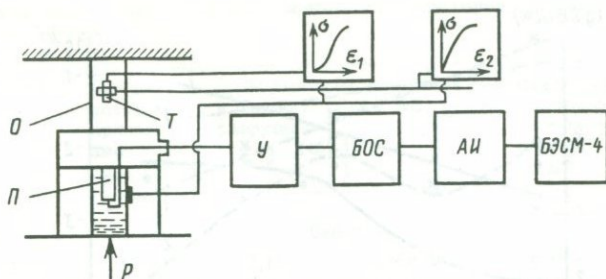
Использование новых возможностей позволило выявить ряд закономерностей процесса разрушения необходимых для прогнозирования динамических явлений (горных ударов, землетрясений). На наш взгляд, проблема их прогноза должна включать в себя решение следующих вопросов.

1. Прогнозирование характера готовящегося разрушения.
2. Прогнозирования стадий пред- и постразрушения горных пород.
3. Прогнозирования возможной энергии разрушения.
4. Прогнозирование места, объема ожидаемого разрушения и времени в долго- и краткосрочном аспектах.

В результате ранее выполненных исследований появилась возможность определять потенциальную удароопасность горных пород [1, 2], оценивать по характеру АЭ, находится ли исследуемый объект в до- или запредельном состоянии [3], а также улавливать изменение характера энерговыделения перед разрушением [4], т.е. выявлять некоторые прогностические признаки готовящегося разрушения.

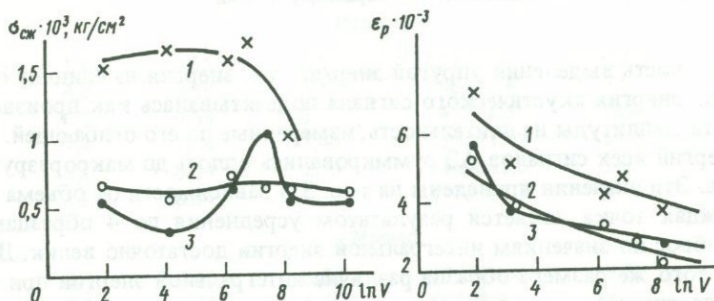
Настоящая работа посвящена вопросу перенесения результатов лабораторных исследований на натурные условия — влиянию объема объекта на процесс разрушения. Основная цель этих исследований — выявить, какие закономерности процесса разрушения инвариантны к размеру (объему) объекта, какие критерии (предвестники) макроразрушения проявляются на всех масштабных уровнях.

Эксперименты проводились на призматических образцах гранита, мрамора и известняка различного объема при соблюдении геометрического



Р и с. 1. Структурная схема измерительного комплекса

О — образец; Т — тензорезисторы; П — пьезокерамический датчик; P — нагружающая сила; У — усилитель; БОС — блок обработки сигналов; АИ — анализатор АИ-4096 ЭМВ-100; $\sigma - \epsilon_1$, $\sigma - \epsilon_2$ — двухкоординатные графопостроители



Р и с. 2. Зависимость прочности $\sigma_{сж}$ и разрушающей деформации ϵ_p от объема образцов V

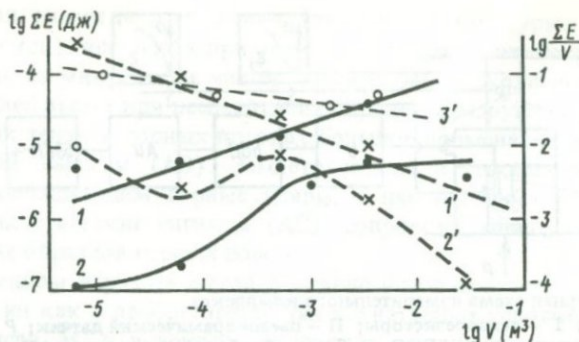
1 — гранит; 2 — мрамор; 3 — известняк

подобия их линейных размеров — высоты h и ребра a основания с отношением $h/a = 2$. Наименьший объем равнялся $7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, наибольший — $0,3 \text{ м}^3$. Это позволило исследовать образцы в диапазоне 3–4 порядков по их объему. Нагружение их производилось на прессе ПР-500, и лишь наиболее крупные образцы объемом $0,3 \text{ м}^3$ нагружались на прессе ПР-1000. Скорость деформации от опыта к опыту оставалась постоянной и равной $1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$.

В процессе нагружения регистрировались компоненты деформаций, прилагаемое усилие и сигналы АЭ с использованием системы регистрации и ЭВМ (рис. 1). Последние позволили определить амплитуду, длительность и время появления каждого акустического сигнала, что в дальнейшем позволило рассчитать их энергию, мощность излучения и статистические параметры процесса разрушения для выявления желаемых критериев. Экспериментальные данные по разрушению образцов исследуемых пород представлены в таблице и на рис. 2,3.

Из графиков на рис. 2 следует, что увеличение объема образцов приводит вначале к некоторому увеличению прочности, а затем — к снижению. При этом величина разрушающей деформации, замеренная в направлении приложения силы, имеет постоянную тенденцию для всех пород.

При исследовании АЭ прежде всего представляло интерес выяснить, как меняются выделяемая упругая энергия в зависимости от объема образ-



Р и с. 3. Зависимость интегральной энергии ΣE , ее плотности выделения $\Sigma E/V$ от объема деформируемого образца V

1, 1' — гранит; 2, 2' — известняк; 3' — мрамор розовый

ца и плотность выделения упругой энергии, т.е. энергия на единицу объема образца. Энергия акустического сигнала подсчитывалась как произведение квадрата амплитуды на длительность, измеренные по его огибающей. Значения энергий всех сигналов АЭ суммировались вплоть до макроразрушения образца. Эти значения приведены на рис. 3 в зависимости от объема образца. Каждая точка является результатом усреднения по 4 образцам, так как разброс по значениям интегральной энергии достаточно велик. Для одного и того же размера образца различие интегральной энергии при разрушении достигло 4.

Из графиков видно, что для всех исследуемых материалов энергия сигналов АЭ возрастает с увеличением объема образца, причем для гранита эта зависимость может быть представлена прямой линией. Для известняка увеличение энергии с объемом немонотонно, что, по-видимому, связано с влиянием структуры образцов, которая отразилась и на их прочности.

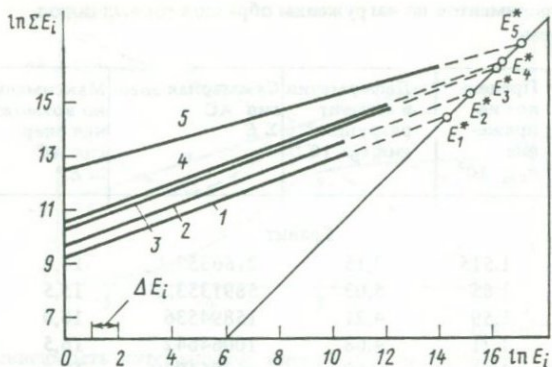
Графики плотности выделения упругой энергии представлены на этом же рисунке. Для гранита плотность выделения упругой энергии падает с увеличением объема образца. Отметим, что затухание акустических сигналов несущественно сказывается на общей зависимости. Интегральная энергия в основном определяется акустическими сигналами с большими амплитудами и низкими частотами, которые для данных размеров образца практически не затухают. Поэтому основной причиной уменьшения плотности упругой энергии с ростом размера образца можно считать локализацию разрушения. Для известняка по этому параметру еще более проявляется роль структуры на локализацию разрушения. Следует отметить, что в целом плотность выделения упругой энергии для него на 1–1,5 порядка ниже, чем для гранита. Это обусловлено различием этих материалов по упругим и прочностным характеристикам. Если для однородного по строению материала сделать образцы кубическими, то можно более приблизиться к объемному разрушению. В этом случае локализация разрушения уменьшается. На рис. 3 приведена плотность выделения упругой энергии для розового мрамора, образцы которого были вырезаны в виде куба. Можно видеть, что плотность излучения упругой энергии уменьшается слабо с увеличением объема образцов.

Результаты экспериментов по нагружению образцов горных пород различного объема.

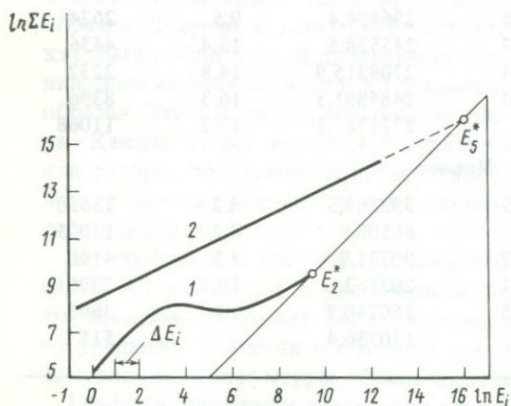
№ пп	$\ln V$	Предельное напряжение $\sigma_{см} \cdot 10^3$	Деформация в момент разрушения $\epsilon_p \cdot 10^3$	Суммарная энергия АС ΣE	Максимально возможная энергия АС $\ln E^*$	Число АС N
Гранит						
1	1,9	1,515	7,15	2166357,3	14,4	26088
2	4,2	1,65	5,03	5891353,2	15,5	47394
3	6,2	1,59	4,21	15894536	16,0	31240
4	6,9	1,71	4,68	10064642	16,5	23705
5	8,1	1,01	3,69	363061970	17,2	72569
6	10,4	—	—	10051372	—	4144
Известняк						
1	1,9	0,55	5,6	159517	9,2	6571
2	4,2	0,36	3,76	296494,4	9,5	2624
3	6,2	0,64	3,37	245538,5	13,4	4436
4	7,4	1,04	3,44	2709315,9	14,8	2232
5	8,2	0,54	2,73	2484891,5	16,3	8396
6	10,4	0,54	—	2771787,3	17,3	11068
Мрамор						
1	1,9	0,69	5,25	393769,5	8,2	15650
2	4,1	0,58	5,5	66508,9	8,2	12075
3	6,1	0,75	3,17	90731,7	8,5	4100
4	7,3	0,69	2,61	203162	10,2	2396
5	8,2	0,62	2,15	250740,7	10,7	3693
6	10,4	0,55	—	170756,4	—	511

Анализ распределений акустических сигналов по их энергиям позволяет оценить максимальные энергии, которые могут выделиться в данном объеме в одиночном импульсе. Для этого удобно сделать построение в координатах энергия одиночных акустических сигналов (горизонтальная ось) — суммарная энергия (вертикальная ось) (рис. 4, 5). Ввиду большого изменения этих параметров использованы двойные логарифмические координаты.

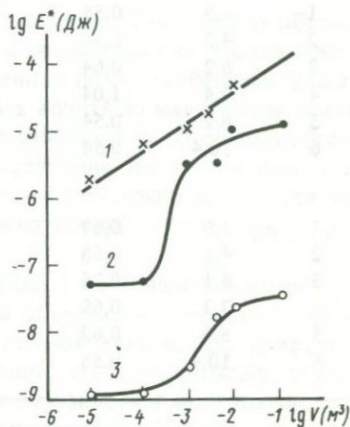
Для гранита результаты укладываются на прямые (рис. 4); тонкой линией показана биссектриса, значения на которой свидетельствует о равенстве суммарной энергии — энергии одиночного сигнала. Экстраполяция экспериментальной зависимости до пересечения с биссектрисой дает значение максимальной энергии, которая способна выделиться в данном объеме в единичном импульсе. Можно отметить, что зависимости для разных объемов качественно аналогичны, их наклоны близки. При увеличении объема немонотонное изменение суммарной энергии проявляется для известняка (рис. 5). Это, как уже отмечалось, связано с влиянием структурной гетерогенности на развитие процесса разрушения и на энерговыделение. Соответственно увеличиваются значения максимально возмож-



Р и с. 4. Суммарная энергия сигналов АЭ ΣE_i для образцов разного объема V (гранит)
 1 - $V = 7 \text{ см}^3$; 2 - $6,7 \cdot 10$; 3 - $4,9 \cdot 10^2$; 4 - $1 \cdot 10^3$; 5 - $V = 3 \cdot 10^3 \text{ см}^3$



Р и с. 5. Суммарная энергия сигналов АЭ ΣE_i для образцов разного объема V (известняк)
 1 - $V = 6,7 \cdot 10 \text{ см}^3$; 2 - $V = 3 \cdot 10^3 \text{ см}^3$



Р и с. 6. Максимально возможные энергии E^* при разрушении образцов разного объема V

1 - гранит; 2 - известняк; 3 - мрамор

ных энергий E^* . Их зависимости от объема для разных пород приведены на рис. 6. Здесь выявлены следующие эффекты. Для одних и тех же объемов максимально возможные энергии E^* в одном импульсе различаются для приведенных пород более чем на порядок. С увеличением объема для каждой из пород они возрастают, причем для гранита это возрастание имеет прямолинейную зависимость.

Рассмотрим полученные экспериментальные результаты с позиций современных представлений о разрушении горных пород и попытаемся выявить, какую пользу они могут принести в вопросах прогнозирования горных ударов и землетрясений.

Согласно представлениям, развиваемым в ЛФТИ АН СССР им. Иоффе и в Институте физики Земли АН СССР им. О.Ю. Шмидта, разрушение образца имеет две основные стадии [5, 6]. Первая из них связана с накоплением трещин в объеме нагруженного образца до определенных концентраций, вторая — с формированием и развитием очага разрушения. Если первая стадия может быть в принципе отнесена к объему равномерно нагруженного образца, то на второй стадии проявляются эффекты локализации. Для того чтобы проследить локализацию разрушения, необходимо использовать локацию акустических сигналов. Без нее можно сделать лишь качественные заключения по этому вопросу, исходя из сопоставления деформационных кривых и интегрального энерговыделения. Следовательно, если считать, что очаг разрушения появляется после достижения предельной концентрации трещин во всем объеме нагруженного образца, то он не должен существенно сказываться на объемных характеристиках, таких, как прочность, разрушающие деформации и интегральное энерговыделение. Тем не менее все они существенным образом изменяются с увеличением объема. Это позволяет считать, что локализация разрушения наступает на начальных стадиях деформирования образца. По-видимому, очаг разрушения формируется, когда весь объем образца еще не накопил предельных концентраций трещин. Это ни в коей мере не отрицает схемы формирования очага разрушения через достижение предельных концентраций трещин, образование ансамблей из них и укрупнение в них трещин. Вся эта цепочка событий происходит локализованно, в тех областях образца, которые оказываются менее прочными или перегруженными. Естественно, что при увеличении объема образца увеличивается вероятность появления таких ослабленных областей (могут увеличиваться их объемы). Все это облегчает как локализацию разрушения, так и возникновение и развитие очага разрушения, что на более ранних стадиях прерывает процесс объемного накопления трещин. В тех случаях, когда в образце имеются неоднородности, соизмеримые с размером образца, эта локализация может быть особенно ощутимой.

Действительно, крупные дефекты создают повышенные поля напряжений, и процесс зарождения трещин, их слияние и укрупнение могут начинаться в этих областях раньше и привести к макроразрушению, когда степень объемной разрушенности незначительна. Если имеются характерные размеры дефектов, значительная локализация может наблюдаться, когда размеры образца будут близки к размерам дефектов. Увеличение же размеров образца приводит к тому, что эти характерные дефекты могут оказаться уже не опасными для всего образца. Локализованное разрушение около них не приведет к макроразрушению и позволит развиваться процессу разрушения в других областях, т.е. повысится степень объемного разрушения. Это и проявляется для известняка аномальным изменением как механических характеристик, так и энерговыделения.

Итак, на локализацию разрушения закономерным образом влияет объем образца, повышая вероятность появления ослабленных мест, и ансамблей или кластеров для формирования и развития очага разрушения. Существенным образом на локализацию разрушения влияют дефекты, размеры которых соизмеримы с размерами образца. Из полученных результатов следует, что увеличение объема увеличивает вероятность повышения высокоэнергетических событий. Это наглядно прослеживается на рис. 4. Более того, уровень энергий эмитируемых импульсов и максимально возможная энергия в импульсе непрерывно нарастают, что особенно важно для прогнозирования потенциальной удароопасности горных массивов. К примеру, если гранит при увеличении объема образца не имел бы каких-либо структурных особенностей (включений, прослоек и т.д.), то можно было бы прогнозировать для условий рудника горные удары $10^5 - 10^6$ Дж в объемах порядка 10^6 м^3 (это обычные блоки со средним линейным размером в 100 м); такие удары зарегистрированы в рудниках. Но это не верхняя граница. В условиях действия повышенного давления наклон зависимости на рис. 4,5 может быть круче [7].

Для целей прогноза важно знать, какую роль оказывают структурно-текстурные особенности горного массива на максимально возможную энергию в одиночном импульсе. Можно предположить, что в массиве горных пород, имеющем прослойки, включения и т.п., не может выделиться столько значительной энергии в одном событии (импульсе), как если бы он был тех же размеров, но монолитный, однородный. Причем для прогнозирования не обязательно знать строение массива, что во многих случаях затруднительно. Достаточно знать реакцию массива на нагрузку, что для условий рудника в конкретных участках массива реально получить. Так, на рис. 5 приведены две зависимости для известняка: первая — для объема $V = 67 \text{ см}^3$, когда дефекты (поры) соизмеримы с размером образца, а вторая — для объема $V = 3 \cdot 10^3 \text{ см}^3$, когда размеры образца существенно больше дефектов и последние уже не столь существенно сказываются. Можно отметить, что в первом случае явно наблюдается дефицит высокоэнергетических событий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ изменения механических характеристик и акустической эмиссии при увеличении объема разрушаемых образцов позволяет выделить некоторые характерные признаки локализации разрушения: уменьшение величин разрушающих деформаций и снижение плотности выделения упругой энергии. При этом вероятность появления крупноэнергетических событий возрастает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мансуров В.А., Манжиков Б.Ц. Вопросы прогноза динамических форм проявления горного давления // Напряженное состояние и удароопасность горных пород на рудных месторождениях Средней Азии. Фрунзе: Илим, 1983. С. 106–116.
2. Гайворонский Г.Б., Манжиков Б.Ц., Тилегенов К.Т., Мансуров В.А. Влияние жесткости нагружающего устройства на параметры АЭ при деформировании горных пород // Тез. докл. II Всесоюз. шк.-семинара "Физические основы прогнозирования разрушения горных пород". Фрунзе: Илим, 1985. С. 59.

3. Мансуров В.А. Хрупкое разрушение горных пород. Фрунзе: Илим, 1984. 124 с.
4. Манжигов Б.Ц., Мансуров В.А., Куксенко В.С. Энергетические параметры акустической эмиссии и прогноз разрушения горных пород // Тез. докл. XIX Генер. ассамблеи ЕСК. М., 1984. С. 82-83.
5. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел // Физические процессы в очагах землетрясений. М.: Наука, 1980. С. 78-86.
6. Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Лабораторные и теоретические исследования процессов подготовки землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1974. № 10. С. 107-112.
7. Мансуров В.А., Медведев В.Н. Особенности деформирования спектра акустической эмиссии горных пород при испытании в условиях всестороннего давления // Тез. докл. II Всесоюз. шк.-семинара "Физические основы прогнозирования разрушения горных пород". Фрунзе: Илим, 1985. С. 66.



ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

УДК 550.348+550.346.6+550.433

В.И. Кнауф, Ф.Н. Юдахин, Б.И. Ильясов

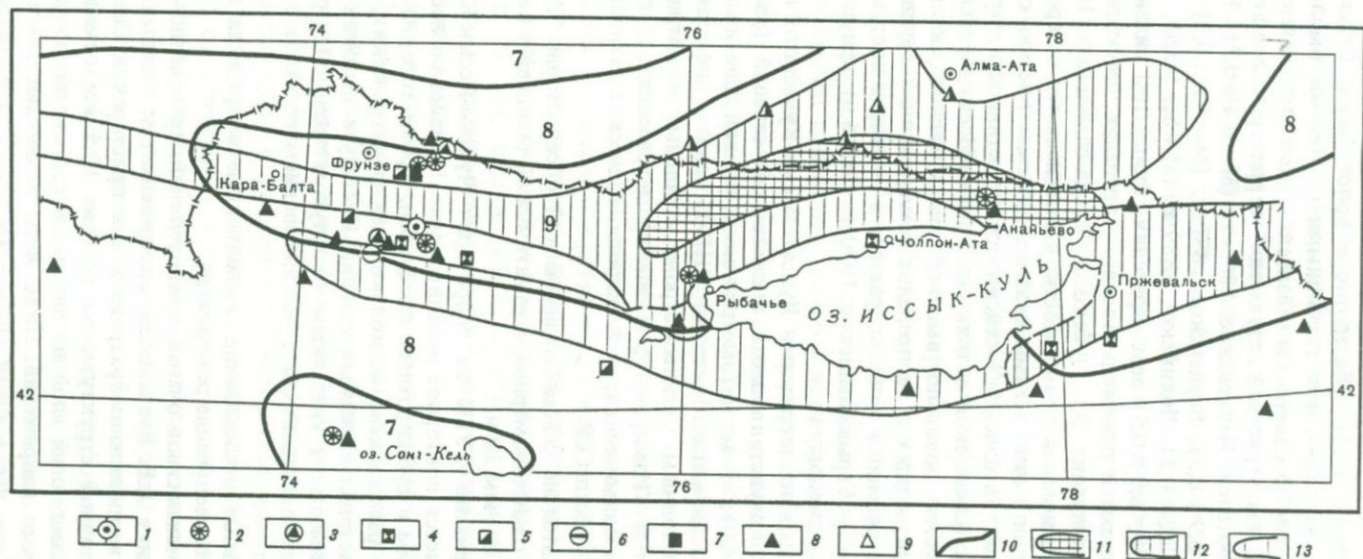
ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНАХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТЯНЬ-ШАНЯ И ВЫЯВЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В настоящее время стало очевидным, что для достижения прогресса в области прогнозирования землетрясений необходимо изучать физические процессы, происходящие в их очаговых зонах. В связи с этим все большее внимание уделяется постановке методов исследования, позволяющих получить представление о физико-механических процессах в земных недрах на тех глубинах, где возникают очаги землетрясений.

С этой целью в Институте сейсмологии АН КиргССР изучаются механизмы очагов, характер излучениями сейсмической энергии, проводятся сейсмическое просвечивание с использованием фиксированных источников упругих волн и измерения изменений электросопротивлений горных пород. Исследуются также методы для изучения явлений, сопровождающих физические процессы в очагах, таких, как вариации магнитного поля, газовых и химических элементов в подземных водах, изменения их уровня и т.д.

Эти работы проводятся в основном в пределах Чуйско-Иссык-Кульской прогностического полигона (рис. 1). В палеозойской структуре на территории полигона выделяются Муюнкумская и Иссык-Кульская глыбы Муюнкумо-Наратского срединного массива, облекаемые с севера и юга каледонскими складчатыми структурами Северного Тянь-Шаня, прорванными крупнейшими гранитоидными интрузиями. Основные глубинные разломы, ограничивающие глыбы массива и отделяющие их от складчатых образований, имеют северо-восточные, северо-западные и субширотные простирания.

По режиму новейших движений территория полигонов входит в Северо-Тянь-Шаньскую эпиплатформенную мегасинклинальную область. Здесь выделяются Чуйская и Иссык-Кульская мегасинклинали и ограничивающие их Киргизский, Кендыктасский, Кунгейский и Терскейский мегантиклинали. Доновейший цоколь Чуйской и Иссык-Кульской впадин прогнут до $-4,5$ км, в то время как в горном обрамлении он поднимается до $+5$ км, т.е. общая амплитуда новейших движений достигает, по данным О.К. Чедия, почти 10 км.



Р и с. 1. Схема расположения наблюдательной сети на Чуйско-Иссык-Кульском прогностическом полигоне. Наблюдательные станции: 1 – сейсмогеофизическая обсерватория "Ала-Арча"; 2 – магнитометрические; 3 – сейсмические скважины; 4 – гидрогеохимические; 5 – гидродинамические; 6 – электрометрические; 7 – газогеохимические; 8 – сейсмические; 9 – сейсмические других организаций; 10 – линии балльности; 11–13 – зоны ВОЗ с магнитудой $M \geq 8,1$ (11), $M = 7,1-8,0$ (12), $M = 6,1-7,0$ (13)

В пределах полигона выделяются Северо-Тянь-Шаньская и Южно-Иссык-Кульская сейсмогенные зоны субширотного простирания. Сейсмичность первой из них связана с древними глубинными разломами, омоложенными в новейшее время. К Северо-Тянь-Шаньской зоне приурочены очаги наиболее сильных землетрясений изучаемой территории с магнитудой до 8,3. К ним относятся Меркенское 1865 г. ($M = 6,4 \pm 0,7$), Беловодское 1885 г. ($M = 6,9 \pm 0,5$), Верненское 1887 г. ($M = 7,3 \pm 0,5$), Кемиинское 1911 г. ($M = 8,2 \pm 0,5$), Чиликское 1889 г. ($M = 8,3 \pm 0,5$), Кемино-Чуйское 1938 г. ($M = 6,9 \pm 0,5$) землетрясения. Эпицентры сильных землетрясений располагаются преимущественно в пределах Чуйского и Кунгейского участков полигона. Для Чуйского участка отмечена 8–10-летняя цикличность в сейсмической деятельности, выражающаяся в чередовании периодов активизации и относительного затишья. Землетрясения с $M \geq 4,4$ возникают во время "всплесков" сейсмической активности, проявляющихся в периоды сейсмической активизации. Южно-Иссык-Кульская зона также характеризуется довольно высокой сейсмической активностью. Очаги многих происшедших в ее пределах землетрясений группируются в узлы. Сила землетрясений в зоне возрастает с запада на восток. Наиболее сильное из них — Сарыкамышское 1970 г. ($M = 6,6$) приурочено к восточному сейсмоактивному узлу.

В настоящее время на территории Чуйско-Иссык-Кульского полигона действуют 17 высокочувствительных сейсмических станций (увеличение от 25 000 до 60 000): 7 магнитометрических станций, две из которых оснащены протонными магнитометрами МПП-1, одна — цифровым трехкомпонентным протонным магнитометром, остальные — магнитовариационными станциями "Измиран-4"; 2 электрометрические; 5 гидрогеохимических; 1 газохимическая; 3 гидродинамические станции Института сейсмологии АН КиргССР.

В П-образной штольне сейсмогеофизической обсерватории "Ала-Арча" начаты измерения с наклономерной автоматической станцией и кварцевым деформометром с плечом 30 м.

Силами предприятия ГУГК на территории Чуйско-Иссык-Кульского полигона выполняется повторное нивелирование 1 класса по нескольким субмеридиональным и субширотным профилям. Кроме того, на Чуйском участке полигона расположено несколько электрометрических, магнитометрических и светодальномерных станций Института высоких температур АН СССР. Совместно с указанным институтом проводятся режимные электрометрические исследования с использованием сигналов от мощного МГД-генератора.

Экспериментальные исследования, выполненные в пределах полигона, позволили получить следующие результаты.

При изучении механизмов очагов землетрясений, проведенном Т.Я. Беленович по методике А.В. Введенской, определены оси главных напряжений сжатия. На вертикальном разрезе вдоль простирания Северо-Тянь-Шаньской сейсмогенной структуры на глубине 12,5 км отмечена зона, разделяющая сейсмогенный слой на две части с существенно различным строением и полями напряжений. Ниже зоны возникают очаги сильных ($M = 5,1 - 7,5$), выше нее — очаги слабых ($M \leq 2,2$) землетрясений. Оси

главных напряжений сжатия выше зоны ориентированы в горизонтальном, а ниже ее — в вертикальном направлении.

До глубины 12–15 км тип подвижек в очагах землетрясений сдвиговый, глубже — взбросовый. На детальном скоростном разрезе земной коры отмеченной зоне соответствует волновод. Его мощность составляет 2,5 км для района Чуйской впадины и ее горного обрамления и 2–7 км для других районов Тянь-Шаня. На обобщенном геоэлектрическом разрезе верхней части земной коры Иссык-Кульского срединного массива (Северный Тянь-Шань), по данным магнитотеллурического зондирования, на тех же глубинах 10–15 км отмечается горизонт низкого электрического сопротивления (10–30 Ом·м). Следовательно, зона растяжения характеризуется с одной стороны понижением скоростей прохождения продольных и поперечных сейсмических волн (волновод), с другой — понижением электрического сопротивления. В связи с этим можно предположить, что подобный эффект обусловлен наличием слоя разрушенных пород, обладающих повышенной пористостью, насыщенного минерализованными, проводящими электрический ток флюидами.

Наличие на глубине 10–15 км зоны повышенной трещиноватости в земной коре может найти следующее геологическое объяснение. Характерно, что гипоцентры подавляющей массы землетрясений Киргизии находятся также на глубинах до 10–15 км. Они располагаются в верхней части земной коры, сложенной дислоцированными геосинклинальными толщами, подстилающими их метаморфитами догеосинклинального основания и рвушими их гранитными интрузиями. В реальных геологических разрезах суммарная мощность слоя осадочных и вулканогенных геосинклинальных пород в рассматриваемом регионе достигает 10–12 км; некоторое утолщение вулканогенно-осадочного слоя, особенно существенное в пределах развития покровно-чешуйчатых структур Южно-Тянь-Шаньской складчатой системы, может быть обусловлено деформациями его при их смятии в складки и шарьировании. Однако на глубинах, превышающих 15 км, дислоцированные породы испытывают гранитизацию, переходят в гранито-гнейсы и приобретают относительно высокую степень гомогенизации.

Из сказанного видно, что строение и свойства той реальной среды, в которой возникают очаги землетрясений и в которой распространяются сейсмические колебания, т.е. сейсмоактивного слоя, определяются структурно-вещественными характеристиками пород домезозойского возраста. На глубинах между 10 и 15 км находится важная геологическая граница, выше которой располагается дискретная, резко дифференцированная по вещественному составу и физическим свойствам геологическая среда со слоисто-блоковой структурой, а ниже — относительно гомогенный жесткий гранито-гнейсовый субстрат (догеосинклинальное основание).

Можно ожидать (и это имеет место в природе), что чем выше степень дискретности геологической среды сейсмоактивного слоя, тем меньше напряжения требуются для ее хрупкой деформации и, следовательно, для возникновения очагов землетрясений. Этим можно объяснить присутствие очагов только слабых землетрясений в верхней части разреза земной коры Чуйско-Иссык-Кульского полигона.

К числу характеристик примеров высокодискретных по геологическому строению площадей, где происходят частые, но слабые или средней силы землетрясения, следует отнести высокогорные районы Туркестано-Алайский и Фергано-Кокшаальский. Особо следует отметить быструю релаксацию напряжений в районах развития чешуйчато-покровных структур там, где они (покровы, чешуи) разделены прослоями тектонизированных пластичных серпентинитов или серпентинитового меланжа. В таких условиях возникают крип и слабые землетрясения (примеры — Центральная часть Ферганского хребта, Атбашинский, Джангджирский хребты, восток Кокшаала и др.).

Сильные, но редкие землетрясения на Тянь-Шане возникают при подвижках крупных монолитных блоков горных пород, сложенных преимущественно жесткими гранитизированными и метаморфизированными толщами (Иссык-Кульский, Актюз-Боординский, Чаткальский и др. блоки). Установлено, что в ряде мест Южного Тянь-Шаня дискретный слоистоблоковый сейсмогенерирующий слой залегает не на гранито-гнейсах, а на меланократовом основании, т.е. непосредственно на образованиях геофизического "базальтового" слоя, состоящего из основных ультраосновных, как правило, серпентинизированных, пород. В таких районах обычны покровно-складчатые структуры, а сейсмический режим их отвечает упомянутому выше для районов соответствующего строения.

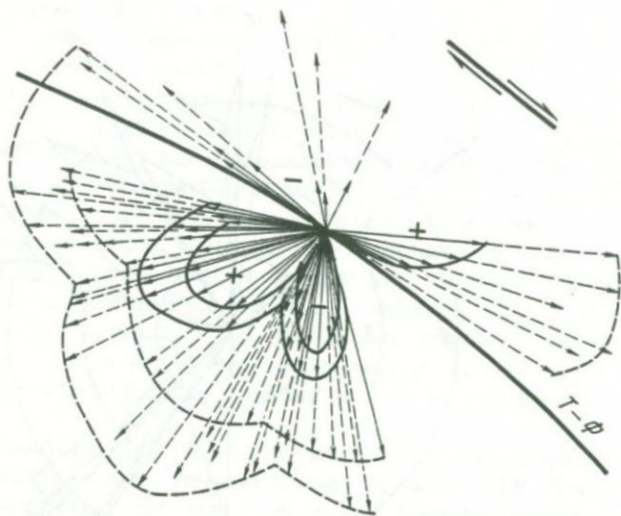
Отмеченные различия в структурно-вещественных показателях среды находят отражение в механизме очагов землетрясений и характере изучения ими сейсмической энергии.

З.А. Кальметьевой было предпринято исследование азимутальных распределений динамических и кинематических параметров сейсмических волн от слабых землетрясений.

На сейсмограммах определялись знаки, амплитуды и период первого вступления продольных волн, амплитуды и период максимальной фазы в волнах P и S , время запаздывания фазы P_{\max} относительно первого вступления. На основании сделанных замеров для каждого землетрясения определялся характер распределения знаков первых смещений продольной волны, строились диаграммы направленности излучения волн P и S , азимутальные годографы фазы P_{\max} , вычислялись значения A_s/A_p и T_s/T_p . Это позволило З.А. Кальметьевой сделать выводы о типе и характере первой и основной подвижек в очаге, об унаследованности характера движений за время жизни очага, провести количественные оценки направления распространения разрыва и его протяженности.

Исследования слабых коровых землетрясений восточной части Ферганской впадины и ее горного обрамления показали, что существует по меньшей мере два типа очагов с существенно различным характером излучения продольных и поперечных волн. К первому из них относятся сколы (рис. 2), ко второму — очаги с квазиоднородным излучением продольных и поперечных волн (рис. 3).

Характеристики излучения очагов сколовых землетрясений находятся в хорошем соответствии с результатами теоретических и модельных исследований дислокационных источников. Направленность излучения в момент первой и основной подвижек, характер записей, особенности азимутального распределения параметра τ , а также численные значения A_s/A_p

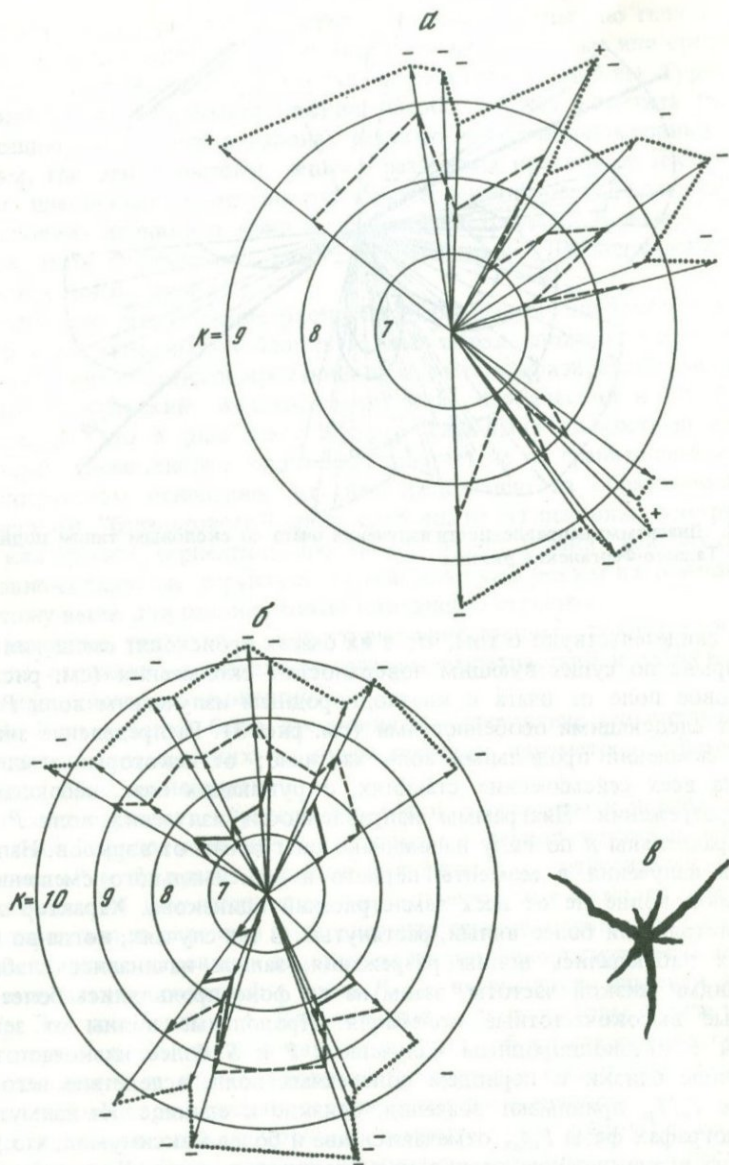


Р и с. 2. Диаграмма направленности излучения очага со сколовым типом подвижки
Т-Ф — Талассо-Ферганский разлом

и T_s/T_p свидетельствуют о том, что в их очагах происходят смещения бортов разрыва по существующим поверхностям скольжения (см. рис. 2).

Волновое поле от очага с квазиоднородным излучением волн P и S обладает следующими особенностями (см. рис. 3). Распределение знаков первых смещений продольных волн хаотично; от некоторых землетрясений на всех сейсмических станциях, окружающих очаг, наблюдаются волны разрежения. Диаграммы направленности излучения волн P и S квазипараллельны и по виду напоминают диаграммы от взрывов. Направленность излучения в моменты первого и максимального смещений в продольной волне не от всех землетрясений одинакова. Характер записей землетрясений более вялый, растянутый. В тех случаях, когда во всех азимутах наблюдались волны разрежения, записи начинались слабыми колебаниями низкой частоты, затем на их фоне проявлялись более интенсивные высокочастотные колебания. Продольные волны от землетрясений с квазиоднородным излучением P и S более низкочастотны; их периоды близки к периодам поперечных волн, вследствие чего отношения T_s/T_p принимают значения, близкие к единице. На азимутальных годографах фазы P_{\max} отмечаются два и более максимумов, что указывает на возникновение нескольких разрывов в очаге. Численные значения A_s/A_p для них соответствуют теоретическим, вычисленным для расширяющихся дислокаций. Это свидетельствует о том, что сложные разрывы в очагах могут возникнуть в неразрушенной среде. Наблюдаемые от некоторых землетрясений во всех азимутах отрицательные знаки первых вступлений позволяют допустить, что сложные разрывы в очагах этих землетрясений образуются вслед за фазовым переходом, связанным с уменьшением объема вещества.

С геологической точки зрения очаги сколовой природы возникают при сжатии, реже растяжении в гранито-гнейсовых и слоисто-блоковых



Р и с. 3. Диаграммы излучения очагов взрывоподобного типа

a — землетрясение 1.05.66 г., $K \neq 9,2$; $H = 6$ км; *б* — землетрясение 1.04.66 г., $K = 10,0$; $H = 6$ км; *в* — предполагаемая форма очага

структурах. Очаги с квазиоднородным излучением могут проявляться в средах меланократового состава. Здесь возможны изменения объемов и фазового состояния основных и ультраосновных пород при их серпентинизации (расширение) и десерпентинизации (сжатие).

Результаты полевых и экспериментальных исследований, проведен-

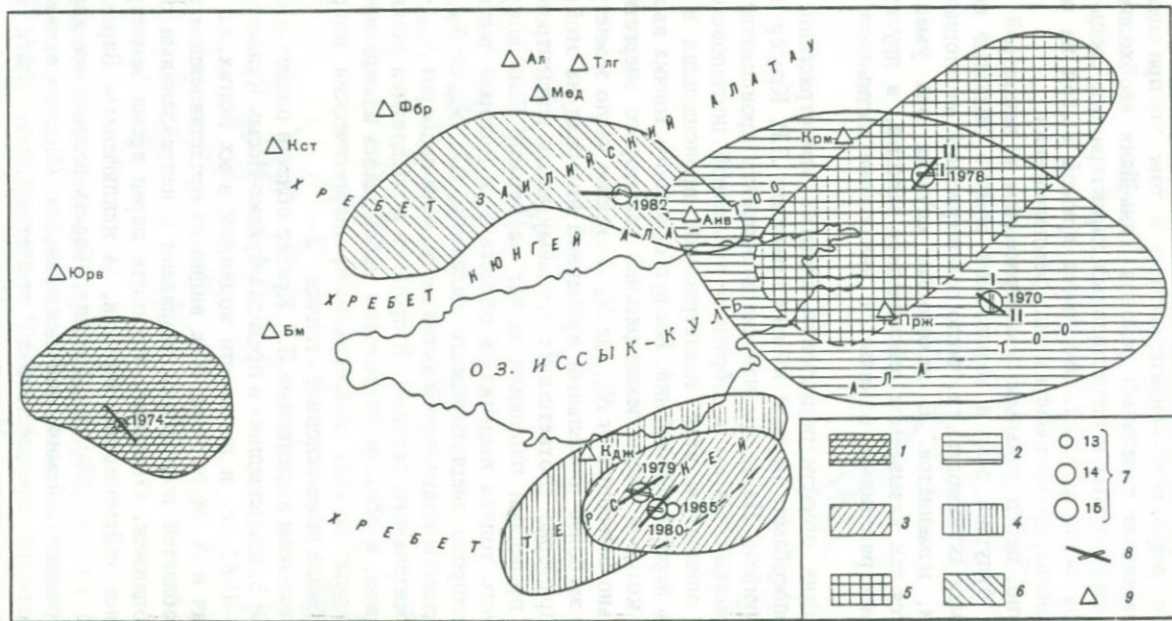
ных В.И. Кнауфом и А.В. Миколайчуком совместно со специалистами Института геологии и геофизики СО АН СССР, показывают, что указанные процессы протекают в условиях, отвечающих глубинам 12–30 км.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что при оценке сейсмического потенциала отдельных районов Тянь-Шаня необходим обязательный учет структурных и вещественных характеристик среды возникновения очагов землетрясений. Это имеет прямой выход на сейсмическое районирование, прогноз места и силы землетрясений.

Как известно, перед сильным землетрясением в некоторой области, окаймляющей будущей очаг и называемой обычно областью подготовки, сейсмическая активность, т.е. число землетрясений на площади в единицу времени, изменяется. В некоторых случаях она уменьшается, т.е. наблюдается так называемое сейсмическое затишье, в других перед сильными землетрясениями отмечается увеличение активности слабых толчков.

Для Тянь-Шаня области подготовки сильных землетрясений выделялись двумя способами. Первый из них применен Л.Р. Кригер и заключался в следующем. На карту наносился эпицентр происшедшего сильного землетрясения. Затем в обратной временной последовательности изображались эпицентры всех землетрясений, происшедших в данном районе за весь период наблюдений. Вокруг основного толчка выделялась область S , в которой число землетрясений некоторого энергетического диапазона сильно отличалось от N_0 , где N_0 — среднее число землетрясений, происшедших за более длительный временной интервал на этой же площадке. Оно примерно соответствует среднему числу эпицентров, расположенных за пределами площадки за тот же период. Если вокруг эпицентра основного толчка выделялась область S , в которой число землетрясений некоторого энергетического диапазона $\Delta K N_{ок} \gg N_0$, то она называлась областью повышенной активности, если наоборот $N_{ок} \ll N_0$ — областью относительного затишья. В процессе исследований установлено, что, как правило, в области подготовки наблюдалось изменение сейсмической активности за счет землетрясений, энергетический класс которых на 4–5 порядка ниже основного толчка.

На рис. 4 показаны выделенные Л.Р. Кригер области подготовки землетрясений с $M \geq 5$, происшедших в пределах Чуйско-Иссык-Кульского полигона за 1965–1982 гг., и плоскости подвижек в их очагах, по данным Т.Я. Беленович и А. Муралиева. Как видно на представленном рисунке, простирания областей подготовки совпадают с направлениями одной из плоскостей подвижек. Отмечено, что почти перед всеми землетрясениями наблюдались сейсмические затишья, за исключением Барскаунских землетрясений 1965 и 1980 гг. Для них область подготовки характеризуется активизацией сейсмической деятельности. Следует отметить, что проявление затишья предшествовало землетрясениям, очаги которых располагаются в пределах Муянкумо-Наратского срединного массива, сложенного монолитными геологическими образованиями, обладающими повышенной прочностью. Очаги Барскаунских землетрясений, напротив, приурочены к границе массива со складчатыми сооружениями Северного Тянь-Шаня, к дискретной сильно дислоцированной геологической среде.



Р и с. 4. Области подготовки сильных землетрясений в пределах Чуйско-Иссык-Кульского полигона

1 – Кочкорского; 2 – Сарыкамьшского; 3 – Барскаунского I; 4 – Барскаунского II; 5 – Жаланаш-Тюпского; 6 – Чолпон-Атинского; 7 – энергетический класс землетрясений; 8 – направление плоскостей подвижек в очаге; 9 – сейсмостанции

Области подготовки сильных землетрясений выделяются и другим путем. На примере Чуйско-Иссык-Кульского полигона З.А. Меджитовой было отмечено, что в окрестностях будущего очага возникает область проявления очагов слабых землетрясений с заниженными отношениями скоростей продольных и поперечных волн. Временной ход графика отношений V_p/V_s в этих областях носит бухтообразный характер. Очаг сильного землетрясения, как правило, возникал на краю области подготовки.

Полученные материалы позволили оценить зависимость размеров области подготовки S и длительности подготовки T от энергии основного толчка. Время подготовки оценивалось, с одной стороны, по продолжительности сейсмического затишья, с другой — по продолжительности "бухты" на графиках временного хода отношения V_p/V_s .

На рис. 5 приведены графики зависимости размеров области подготовки S и времени подготовки T от энергии основного толчка. Как видно, определения, полученные двумя методами, хорошо согласуются между собой.

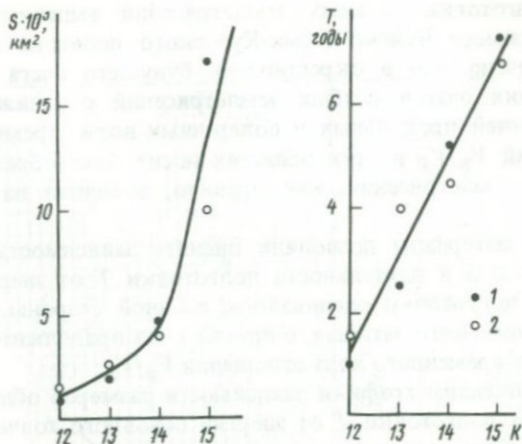
Одним из способов оценки напряженно-деформированного состояния среды является сейсмическое просвечивание, т.е. регистрация постоянно действующими сейсмическими станциями временного изменения параметров упругих волн, возбуждаемых фиксированными источниками колебаний. На территории Чуйско-Иссык-Кульского полигона в качестве таких источников были использованы промышленные взрывы, постоянно производящиеся на Аглатасском и Актюзском карьерах (З.А. Меджитова). Диапазон эпицентральных расстояний составлял 13–190 км, глубинность исследований — первые сотни метров — 30–40 км. Энергия взрывов K изменялась от 6 до 9. За период наблюдений обработано 252 аглатасских и 180 актюзских взрывов. Анализ полученных результатов показал, что более чувствительным к изменениям, происходящим в среде, является отношение A_s/A_p амплитуд поперечных и продольных волн, регистрируемых на станциях. Его изменения начинаются раньше, чем изменения времен пробега упругих волн. Вариации отношения A_s/A_p достигают десятков и даже сотен процентов, в то время как изменения времен пробега не превосходят 3–8% и лишь в отдельных случаях увеличиваются до 12% (рис. 6).

В ряде случаев возникновение очага сильного землетрясения предвзялось увеличением отношения амплитуд A_s/A_p . В отличие от этого изменения времен пробега продольных волн t_p могут быть как положительными, так и отрицательными.

Разнонаправленность изменений параметров t_p и A_s/A_p на станциях, окружающих очаг будущего землетрясения, является характерным признаком его подготовки. Отмечено также, что перед землетрясениями наблюдались сильные флуктуации параметров $t_p, t_s, A_s/A_p$.

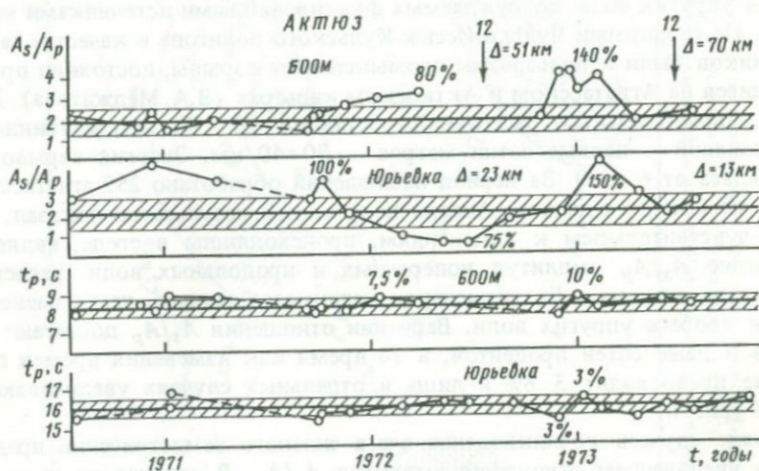
По наблюдениям V_p/V_s от землетрясений З.А. Меджитовой был оценен критический уровень отношения числа пониженных величин этого параметра к общему числу этих величин, при достижении которого происходили землетрясения 12-го и более высоких классов.

Доля очагов с низкими значениями V_p/V_s в общем числе землетрясений за интервал времени подготовки была названа уровнем отрицатель-



Р и с. 5. Графики зависимости размера площади S и времен подготовки T землетрясений от их энергетического класса $K = \lg E$ (Дж)

1 — по результатам анализа отношений V_p/V_s ; 2 — по данным изучения сейсмического режима



Р и с. 6. Изменения амплитуд и времен пробега упругих волн от взрывов на сейсмических станциях Боом и Юрьевка перед Шамсинским 1972 г. и Иссык-Атинским 1973 г. землетрясениями

Жирной линией показаны теоретические значения t_p и среднестатистическое значение A_S/A_R для каждой станции. Заштрихован интервал среднеквадратичных ошибок определения параметров

ных аномалий $A_{отр}$; доля очагов с завышенными значениями V_p/V_s — уровнем положительных аномалий $A_{пол}$; сумма тех и других — суммарным уровнем аномалий A_{Σ} .

Было отмечено, что изменения уровня аномалий относительно средних значений связаны с подготовкой сильных ($K \geq 12$) землетрясений. При этом рост уровня отрицательных аномалий $A_{отр}$ отмечен перед местны-

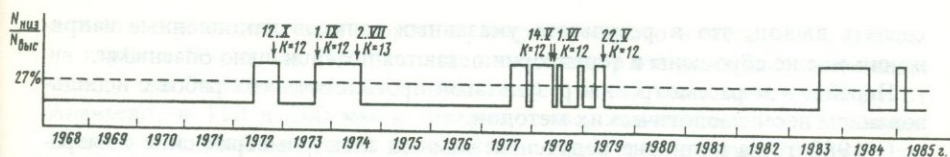


Рис. 7. Результаты ретроспективного прогноза землетрясений при использовании критического уровня аномалий V_p/V_s на Чуйско-Иссык-Кульском прогностическом полигоне

По оси ординат отложены отношения (в %) числа землетрясений $N_{\text{низ}}$ с низкими V_p/V_s к общему числу землетрясений $N_{\text{выс}}$. Пунктиром показан критический уровень, при превышении которого происходили землетрясения с $K = 12$ и 13

ми землетрясениями в пределах полигона, а рост уровня положительных аномалий $A_{\text{пол}}$ обусловлен подготовкой удаленных землетрясений. Перед теми и другими землетрясениями отмечается возрастание уровня суммарных аномалий A_{Σ} .

Для местных землетрясений с $K = 12$ критическими уровнями являются: $A_{\Sigma} = 38\%$; $A_{\text{отр}} = 27\%$; $m = N_{\text{выс}}/N_{\text{низ}} = 0,75$; для удаленных землетрясений этой же энергии $A_{\Sigma} \geq 38\%$; $m > 0,75$, где $N_{\text{выс}}$ и $N_{\text{низ}}$ — соответственно число очагов с высокими и низкими значениями V_p/V_s .

Найденные закономерности были положены в основу алгоритма "Прогноз землетрясений по уровням V_p/V_s ", составленного С. Искендеровым на языке ФОРТРАН. Алгоритм был использован при обработке каталога землетрясений за 1968–1980 гг. на Чуйском участке Чуйско-Иссык-Кульского прогностического полигона. Результаты обработки представлены на рис. 7. Видно, что при ретроспективном анализе все 5 землетрясений, происшедших в пределах полигона с $K \geq 12$, предсказаны, пропусков цели нет. Тревога объявлялась за 11–15 мес. для землетрясений с $K = 12$ и за 18 мес. для землетрясений с $K = 13$.

Оказались предсказанными 4 из 5 удаленных землетрясений — Жаланаш-Тюпское 1978 г. ($K = 15$), Каджисайское 1979 г. ($K = 13$), Каджисайское 1980 г. ($K = 14$) и Чолпон-Атинское 1982 г. ($K = 14$). Тревога объявлялась соответственно за 36, 10, 12 и 27 мес. Была объявлена ложная тревога по удаленным землетрясениям в 1971 г.

Таким образом, результаты первого опыта ретроспективного прогноза землетрясений по уровню аномалий V_p/V_s с использованием ЭВМ являются обнадеживающими.

Следует отметить, что начиная с сентября 1983 г. и в течение 1983, 1984, первой половины 1985 г., судя по уровню аномалий V_p/V_s , на полигоне предсказано местное землетрясение с $K = 13$ –14. Вероятные области возникновения очага — запад-юго-западная часть Чуйской впадины и ее восточная часть — западное Прииссыккулье.

Указанные области по заниженным значениям V_p/V_s выделялись с 1981 г. В пределах первой из них 14 февраля 1982 г. произошло 3-балльное землетрясение в районе с. Воронцовка, а позднее 23 августа 1985 г. — 4–5-балльное землетрясение в осевой части Киргизского хребта. В пределах второй области 2 июля 1982 г. возникло 5-балльное землетрясение к северо-востоку от г. Рыбачье.

Исходя из длительности существования описываемых областей можно

сделать вывод, что в результате указанных толчков накопленные напряжения еще не сброшены и территории остаются потенциально опасными.

Перейдем к рассмотрению результатов прогностических работ с использованием сейсмологических методов.

С 1980 г. на полигоне ведутся режимные электрометрические измерения методом дипольных электрических зондирований. Участок работ располагается в 30 км южнее г. Фрунзе, на северных склонах Киргизского хребта, в районе сейсмогеофизической обсерватории "Ала-Арча". В его строении принимают участие терригенно-эффузивные образования и гранитоидные интрузии палеозоя, обладающие электрическими сопротивлениями 300–900 Ом · м. Пород, играющих роль электрического экрана, на участке не обнаружено. Питающий диполь АВ имеет длину 1000 м и общее сопротивление цепи 6–10 Ом · м.

В качестве источника тока до 1984 г. использовалась генераторная установка станции ВП-62, с 1984 г. — установка ВАКРМ 500/300 для прямого преобразования переменного тока напряжением 380 В в постоянный. Установка позволяла достичь силы постоянного тока 40–60 А при напряжении 400 В. Питающий диполь АВ был ориентирован субширотно, приемные диполи длиной 300–1000 м располагались от питающего на расстояниях 3,5 (Ак-Булак) и 8 км (Альп-лагерь) и ориентировались в направлениях С–Ю, В–З, С-З–С-В.

При опросе одного приемного диполя производилось 20–40 измерений, количество циклов измерений варьировалось от 1 до 4. Среднеотносительная ошибка наблюдений на диполе Ак-Булак составляет 1–2%, на диполе Альп-лагерь — 2–4%.

В результате 5-летних режимных наблюдений В.П. Романовым и А.И. Бектемировым установлено, что электросопротивления горных пород изменялись в пределах от 4 до 8%. Среднесуточные графики вариаций ρ_k носят пилообразный характер, пиковые значения повторяются через 5–15 дн. Сколько-нибудь значительных аномалий ρ_k не отмечалось. Вариации электросопротивлений укладываются в основном в полосу $\rho_{\text{ср}} \pm 3\beta$, где $\rho_{\text{ср}}$ — фоновые значения сопротивлений; β — погрешность наблюдений. Следует указать, что за период наблюдений сейсмический режим на участке измерений и в его окрестностях также был спокойным, местных землетрясений с $K = 12$ зарегистрировано не было.

На значительной части территории полигона для изучения особенностей вариаций геомагнитного поля в прогнозных целях производятся непрерывные измерения элементов земного магнитного поля магнитовариационными станциями типа "ИЗМИРАН-4" в пунктах Новостройка, Таш-Мойнок, Арал, Боом, Ананьево, а также дискретные измерения модуля геомагнитного поля протонными прецизионными магнитометрами МПП-1 в пунктах Новостройка, Ала-Арча и компонентным протонным магнитометром КИМ в пункте Таш-Мойнок. Для выявления сейсмомагнитных аномалий используется методика разностного поля по ночным часам.

Э.Ш. Шакировым, Л.Е. Ким и В.П. Погребным изучена изменчивость разностных значений горизонтальных (северной и восточной) компонент геомагнитного поля перед серией сильных землетрясений Киргизии, происшедших в 1983 г. Так, 31 декабря 1982 г. в 22 ч 47 мин по московскому времени на северном побережье оз. Иссык-Куль, в 85 км к северу от г. Чол-

пон-Ата, произошло землетрясение энергетического класса 13,6 с очагом на глубине 10–15 км. Пространственно эпицентр оказался расположенным между магнитовариационными пунктами – в 60 км к северо-западу от Ананьево, в 110 и 200 км к северо-востоку соответственно от станции Боом и Таш-Мойнок. Было изучено поведение геомагнитного поля за период с 1 сентября 1982 г. по январь 1984 г. Рассчитывались разности полей по трем составляющим для следующих пар станций: Таш-Мойнок–Боом, Ананьево–Боом, Ананьево–Таш-Мойнок, Боом–Таш-Мойнок.

Анализировались аномальные повороты горизонтальной проекции разностного вектора полной напряженности геомагнитного поля. Он строился по правилу параллелограмма относительно базисного значения (за базисное значение принято положение вектора в начале сентября 1982 г., которое изображалось в виде биссектрисы прямого угла), причем по оси координат откладывались приращения разностных значений северной, а по оси абсцисс – приращения разностных значений восточной составляющей геомагнитного поля. В этом случае аномальное увеличение восточной составляющей при нормальной северной повернет вектор по часовой стрелке (восточный поворот), а аномальное увеличение северной при нормальной восточной составляющей вызовет поворот вектора против часовой стрелки (западный поворот). Величина аномальных разностных значений по северной и восточной составляющим изменялась от 4 до 16 нТл при максимальной среднеквадратичной погрешности определения 3,0 нТл.

По результатам проведенного анализа длинного ряда вариационных наблюдений установлено, что задолго до сильного землетрясения изучаемый вектор испытывает вращение против часовой стрелки, которое за 1–3 мес. до землетрясения сменяется вращением по часовой стрелке. За период исследования сентябрь 1982 г.–январь 1984 г. было зарегистрировано четыре такие аномалии. Три аномалии проявились перед близкими землетрясениями 12–14-го класса (Чолпон-Атинским с $K = 13,6$ на расстояниях 200 км от станции Таш-Мойнок, 110 км от станции Боом и 60 км от станции Ананьево; Каджисайским с $K = 12,4$ на расстояниях 250 км от станции Таш-Мойнок, 140 км от станции Боом и 70 км от станции Ананьево и землетрясением с $K = 12,2$ на расстояниях 370 км от станции Таш-Мойнок, 270 км от станции Боом и 120 км от станции Ананьево). Одна аномалия была зарегистрирована перед сильным землетрясением 14-го класса, происшедшим 5 мая 1983 г.

Гидрогеохимические исследования в Киргизии проводятся на базе месторождений термальных вод глубокой циркуляции, развитых в зонах активных разломов. На станциях проводились постоянные наблюдения за изменением следующих параметров: CO_2 , Rn , He , CH_4 , N_2 , Cl^- , F^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , pH, Eh, T° и удельной электропроводности γ с частотой замеров от непрерывной до одного раза в сутки.

В результате режимных наблюдений за вариациями газохимического состава термальных вод, проведенных А.У. Абдуллаевым, В.В. Нургазиевой, С.К. Керимовым на полигоне получена долговременная характеристика фоновых значений исследуемых параметров. Установлено отсутствие влияния сезонных и климатических факторов на гидрогеохимический режим термальных вод. Зафиксирован устойчивый характер временного хода компонентов в период сейсмического затишья.

Вместе с тем на станциях в ряде случаев удалось зафиксировать гидрогеохимические аномалии перед слабыми местными ($K = 9-12$) и удаленными сильными ($K \geq 13$) землетрясениями, которые произошли на территории Киргизии и прилегающих районов за последние 10 лет.

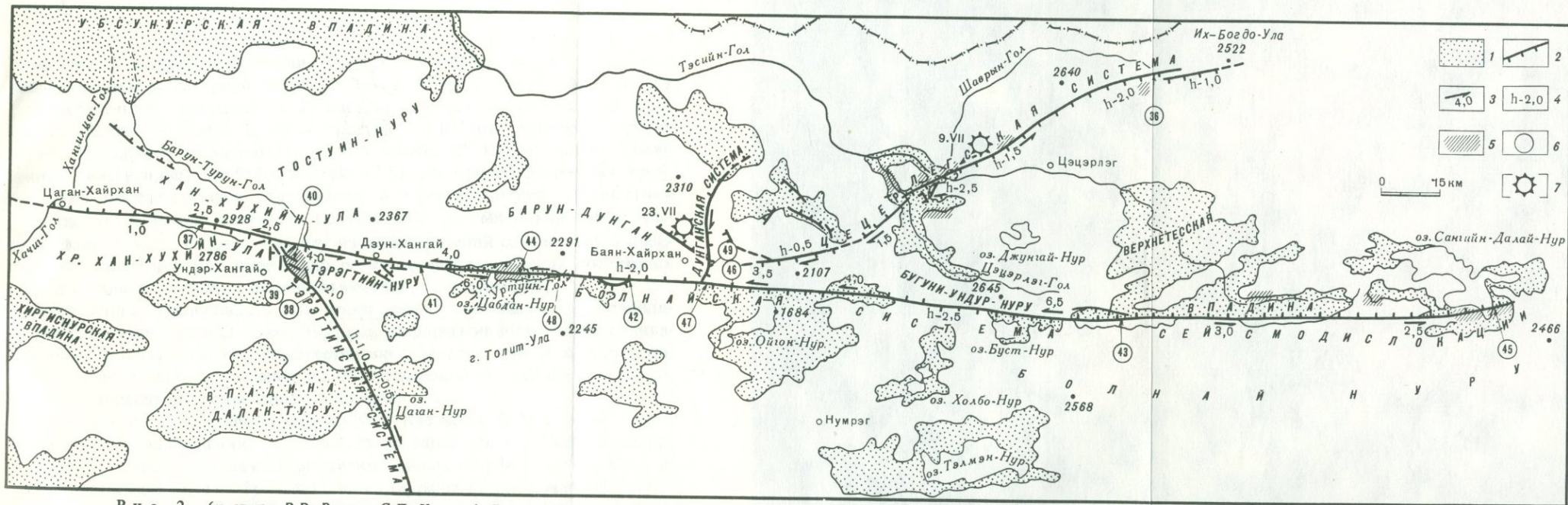
Эти аномалии проявились в основном в вариациях содержания CO_2 , Rn , He , Cl^- , F^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} и концентрации водородных ионов (pH) за 1–12 дн. до сейсмического толчка на расстояниях от 50 до 350 км от эпицентра. Геохимические предвестниковые аномалии сильных землетрясений обычно выражаются в виде короткопериодных импульсных всплесков содержаний компонентов на фоне нормального их хода с быстрым затуханием эффектов после событий.

Проявление геохимических предвестников аномалий по латерали и вертикали носит весьма сложный характер. Отмечаются случаи, когда на одинаковых расстояниях от эпицентра в одних скважинах наблюдаются изменения параметров термоминеральных вод, в других в то же самое время эти параметры находятся в пределах фоновых значений. Гидрогеохимические аномалии могут проявляться на расстояниях до 300–400 км от эпицентра и совсем не выражаться на более близких расстояниях. Например, на расстоянии 190 км от очага землетрясения 23 августа 1985 г. с магнитудой 7,5 содержание в воде химических элементов не изменилось, а незначительно уменьшились температура и дебит воды в скважине гидрогеохимической станции "Джалал-Абад". Зачастую наблюдается разная реакция на землетрясение нескольких скважин на одном и том же месторождении термоминеральных вод. В некоторых из них гидрогеохимические параметры изменяются в противофазе, т.е. на одной из скважин отмечается увеличение содержания какого-либо химического элемента в воде, а на другой — уменьшение. Отмечены факты, когда повышенные содержания радона фиксируются за 1–2 дн. до землетрясения на эпицентральных расстояниях до 100 км, а на больших расстояниях они проявляются либо в момент, либо после события.

Все это свидетельствует о том, что природа гидрогеохимических предвестников далеко еще не ясна. Но уже очевидно, что при решении этой проблемы необходимо учитывать строение и вещественный состав геологической среды на участках термоминеральных месторождений, а также положение последних в тектонической структуре Тянь-Шаня.

Исследования режима подземных вод, направленные на поиск гидрогеодинамических предвестников землетрясений были начаты в Институте сейсмологии в 1978 г. и включали следующие основные этапы: анализ существующих режимных наблюдений за изменением гидрогеодинамических показателей, проводимых другими организациями; выбор наблюдательных точек и организация самостоятельных наблюдений на них; анализ результатов наблюдений с целью изучения режимобразующих факторов и выделения аномальных изменений гидрогеодинамических показателей, связанных с сейсмичностью.

Анализ данных наблюдений за режимом термоминеральных вод на эксплуатируемых месторождениях, выполненный Э.Э. Оролбаевым, показал, что в ряде случаев могут быть достаточно четко выделены гидрогеодинамические эффекты, проявляющиеся до землетрясения и в результате толчка.



Р и с. 2. (к статье В.В. Ружич, С.Д. Хилько) Схема сейсмодислокаций хангайских (Цэцэрлэгского 9.VII и Болнисского 23.VII) землетрясений 1905 г.

1 — неотектонические впадины; 2 — главные системы сейсмодислокаций (штрихи

направлены в сторону опущенных крыльев); 3 — направление сдвига; 4 — его максимальная амплитуда смещения, м; 5 — участки рассеянных сейсмогенных трещин; 6 — номера детально изученных участков; 7 — эпицентры землетрясений

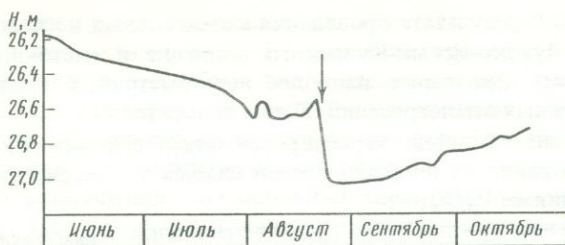


Рис. 8. Изменение уровня подземных вод в июне—октябре 1985 г. по скв. 1096 (Фрунзе) перед землетрясениями 23.08.85 г. с $K = 11,4$; $\Delta = 50$ км и с $K = 17$; $\Delta = 320$ км (указаны стрелкой)

На рис. 8 показано изменение уровня грунтовых вод по скв. 1096, расположенной в северной части г. Фрунзе. Стрелка показывает время 2 землетрясений, происшедших 23 августа 1985 г. Одно из них — местное интенсивностью 4 балла с эпицентром в 50 км от скважины, другое произошло спустя примерно 3 ч на расстоянии 320 км от пункта наблюдения с интенсивностью 9 баллов ($M = 7,5$). На кривой изменения уровня четко прослеживается предвестник в виде минимума, начавшегося в конце июля—начале августа и осложненного двумя локальными максимумами. Трудно сказать, какому из землетрясений соответствует предвестник. После толчков произошло резкое изменение уровня подземных вод, что, видимо, связано с влиянием местного землетрясения.

Проведенные исследования поведения уровня подземных вод позволяют сделать вывод о достаточно высокой информативности гидрогеодинамических показателей как предвестников землетрясений и целесообразности продолжения их изучения по более широкой сети с помощью высокоточной аппаратуры непрерывного действия.

С июня 1981 г. Ю.Г. Шварцманом, Ю.А. Каевым и Е. Мозолевой ведутся режимные наблюдения за содержанием радона и газообразной ртути в грунтовом воздухе в двух герметизированных шурфах глубиной 1,7 м, расположенных южнее г. Фрунзе. Один из шурфов пройден непосредственно в зоне Иссык-Атинского сейсмогенерирующего разлома, одного из составляющих Северо-Тянь-Шаньской сейсмогенной зоны. Второй шурф — южнее, вне разлома. Положение разлома на местности уточнено по данным приповерхностной съемки по радону и ртути.

В обстановке сейсмического затишья на Фрунзенском прогностическом полигоне в 1981—1984 гг. удалось сопоставить аномалии радона только с сейсмическими событиями 14.02.82 г. (эпицентральное расстояние $\Delta = 10$ км; $K = 9$) и 6.05.82 г. ($\Delta = 130$ км, $K = 11$), причем максимум аномалий опережал время землетрясений на 10—20 дн. Однако перед местными слабым и удаленным сильным землетрясениями 23 августа 1985 г. содержания радона и ртути в шурфах не изменились.

Изучение вариаций содержания ртути с 1981 по 1984 г. показало, что изменение температуры воздуха в шурфах и атмосфере, атмосферного давления, уровня осадков, а также производство мощных промышленных взрывов в карьере на расстоянии около 40 км не оказывают существенного влияния на изменчивость концентраций ртути в шурфах.

Заключение. В результате проведения комплексных исследований в очаговых зонах Чуйско-Иссык-Кульского полигона к настоящему времени можно наметить некоторые наиболее информативные предвестниковые параметры сильных землетрясений. К ним относятся:

- 1) проявление областей, характеризующихся сейсмическим затишьем;
- 2) группирование на площади очагов слабых землетрясений с заниженными отношениями V_p/V_s ;
- 3) превышение критического уровня отношения $N_{\text{низ}}/N_{\text{выс}}$, где $N_{\text{низ}}$ — число очагов с заниженными величинами V_p/V_s , $N_{\text{выс}}$ — общее число очагов землетрясений на площади полигона;
- 4) изменение амплитуд продольных и поперечных волн и времен пробега при сейсмическом просвечивании с фиксированным положением источников упругих волн и пунктов их регистрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чедия О.К., Трофимов А.К. Новейшая тектоника // Опыт комплексного сейсмического районирования на примере Чуйской впадины. Фрунзе: Илим, 1978, С. 26–46.
2. Беленович Т.Я. О векторе максимального смещения горных масс и его связи с сейсмичностью и новейшими движениями земной коры // Геофизическая характеристика и сейсмичность Киргизского Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1984, С. 14–23.
3. Кальметьева З.А. О классификации слабых землетрясений по характеру излучения // Методы и результаты исследования сейсмоактивных зон Киргизии. Фрунзе: Илим, 1982, С. 77–85.
4. Кнауф В.И., Миколайчук А.В., Нурманбетов К. и др. Домезозойские структуры и региональные сейсмогенерирующие зоны Тянь-Шаня // Геологическая среда возникновения землетрясений в Киргизии. Фрунзе: Илим, 1985, С. 11–44.
5. Кригер Л.Р. О влиянии изменения скорости миграции слабых землетрясений на возникновение сильных // Геофизическая характеристика и сейсмичность Киргизского Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1984, С. 116–128.
6. Меджитова З.А. Пространственно-временное распределение отношения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн на территории Чуйской впадины и ее горного обрамления // Строение земной коры и сейсмичность Северного Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1978, С. 82–99.

УДК 550.343.6

С.И. Зубков, В.А. Алимова

О ВРЕМЕНАХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗМЕРАХ ОБЛАСТЕЙ ПРОЯВЛЕНИЯ ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Времена возникновения предвестников землетрясений и радиусы областей их проявления являются одними из важнейших характеристик процесса подготовки землетрясения. Настоящая статья представляет собой продолжение цикла работ [1–7] по изучению связи этих характеристик с энергией землетрясения для различных геофизических полей. Авторами были проанализированы все известные мировые литературные данные по изучению уровней подземных вод перед землетрясениями, представленные в Каталоге гидрогеодинамических предвестников [8], а также

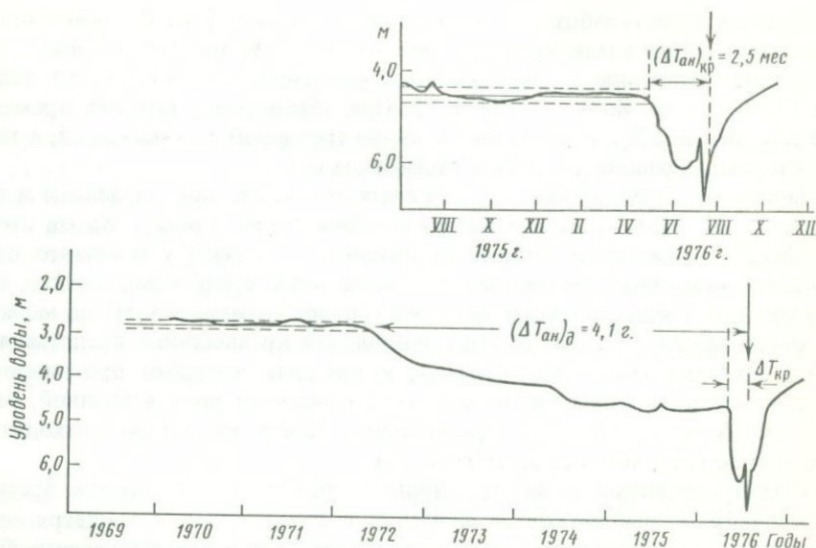
данные последних работ, не вошедших в каталог [9–14]. Всего было определено и проанализировано 267 значений времен проявления предвестников по уровню подземных вод в различных сейсмоактивных районах СССР, Китая, Японии, США и др. При определении значений времени предвестников $\Delta T_{\text{ан}}$ учитывалось влияние трендовой составляющей, а также сезонных вариаций на уровень подземных вод.

Напомним определения этих основных характеристик, введенные в работах [4–6]. Под временем возникновения предвестника ("время предвестника") понимается временной интервал от начала устойчивого превышения величиной геофизического поля двух среднеквадратичных отклонений от среднефонового значения ("порог" предвестника) до момента землетрясения. Радиус R зоны проявления предвестника представляет собой максимальный радиус круга, в пределах которого проявляются предвестниковые вариации данного геофизического поля величиной, равной или большей "порога" предвестника. Центр этого круга находится в эпицентре готовящегося землетрясения.

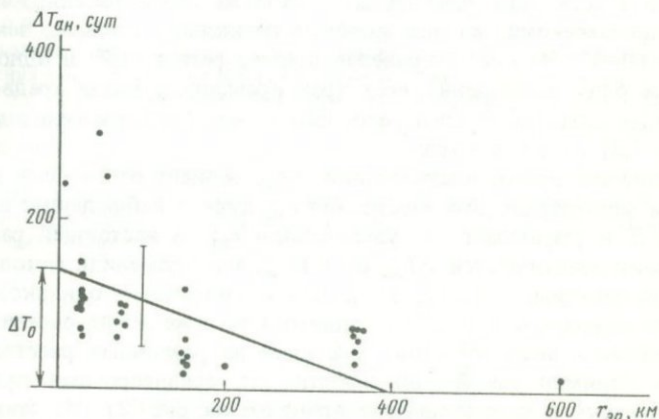
Анализ оцененных нами по мировым литературным данным времен проявления предвестниковых аномалий показал, что для землетрясений различных энергетических классов имеют место три временных типа бухтообразных предвестников по уровню подземных вод: долгосрочные предвестники (длительностью от одного года до нескольких лет для разрушительных землетрясений с $K \geq 14$), среднесрочные предвестники (длительностью в несколько месяцев для таких же землетрясений) и краткосрочные предвестники, возникающие за несколько суток до землетрясений с $K = 10-17$. На рис. 1 приведен пример регистрации в одном долговременном ряду наблюдений всех трех временных типов предвестников уровня подземных вод перед разрушительным Таншаньским землетрясением ($M = 7,8$) 1976 г. в Китае.

Известно, что время предвестника $\Delta T_{\text{ан}}$ зависит от энергии землетрясения E и эпицентрального расстояния $r_{\text{эп}}$ пункта наблюдения: возрастает с ростом E и уменьшается с увеличением $r_{\text{эп}}$. В настоящей работе для исследования зависимостей $\Delta T_{\text{ан}}$ от E и $r_{\text{эп}}$ мы применили методику [6]: определили зависимости $\Delta T_{\text{ан}}$ от $r_{\text{эп}}$ для землетрясений одинаковых энергетических классов K или же для одного и того же землетрясения при наличии большого числа пунктов измерений на различных расстояниях от эпицентра (пример такой зависимости для среднесрочных предвестников Таншаньского землетрясения приведен на рис. 2). Из этих зависимостей были определены значения эпицентральных времен ΔT_0 [6] предвестников для различных K , т.е. времен возникновения этих предвестников в эпицентрах землетрясений. Полученные значения эпицентральных времен использовались для построения зависимости времени от энергетического класса землетрясения.

В связи с тем, что эпицентральные времена ΔT_0 удалось оценить лишь для двух энергетических классов ($K = 15$ и $16,5$), для других при построении зависимости $\Delta T_0 = f(K)$ мы использовали значения времен, относящиеся к эпицентральным расстояниям в пределах протяженности очага землетрясения. Этот прием замены эпицентральных времен ΔT_0 предвестников их очаговыми значениями представляется достаточно корректным ввиду того, что, как будет показано ниже, радиус зоны проявления



Р и с. 1. Пример регистрации в одном долговременном ряду наблюдений долгосрочного, среднесрочного и краткосрочного предвестников уровня подземных вод перед разрушительным Таншаньским землетрясением ($M=7,8$) 1976 г.



Р и с. 2. Зависимость времени проявления предвестника от эпицентрального расстояния для среднесрочного предвестника уровня подземных вод Таншаньского землетрясения

ΔT_0 — время проявления предвестника в эпицентре землетрясения (эпицентральное время)

предвестников по уровню подземных вод намного превосходит протяженность очага.

На рис. 3 представлен график зависимости эпицентральных и очаговых времен долго- и среднесрочных предвестников. Здесь же приведена зависимость для краткосрочных предвестников. Из использованных 146 значений $\Delta T_{ан}$ краткосрочных предвестников только для 54 известны эпи-

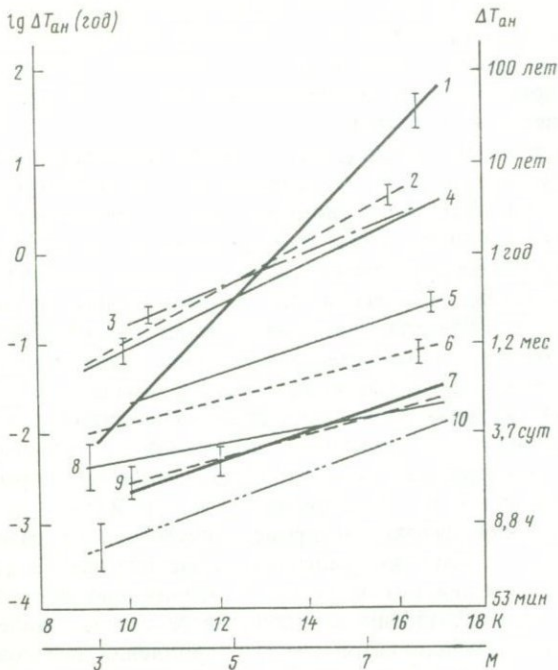


Рис. 3. Зависимость времен проявления предвестников от энергии землетрясения

Долгосрочные предвестники: 1 — деформации, 2 — радон, 3 — электросопротивление, 4 — уровень воды; среднесрочные предвестники: 5 — уровень воды, 6 — земные токи; краткосрочные предвестники: 7 — деформации, 8 — уровень воды, 9 — радон, 10 — форшоки

центральные расстояния. Это обстоятельство, а также большой разброс значений $\Delta T_{ан}$ не позволили построить зависимость $\Delta T_{ан}$ от E с учетом эпицентральных расстояний. Уравнения регрессии и коэффициенты корреляции для долго-, средне- и краткосрочных предвестников соответственно имеют вид:

$$\lg \Delta T_0 = 0,23K - 3,31 \pm 0,15; \rho = 0,94 \pm 0,02; n = 63, \quad (1)$$

$$\lg \Delta T_0 = 0,16K - 3,24 \pm 0,10; \rho = 0,88 \pm 0,03; n = 8, \quad (2)$$

$$\lg \Delta T_0 = 0,09K - 3,18 \pm 0,10; \rho = 0,42 \pm 0,04; n = 146, \quad (3)$$

где n — число выделенных значений $\Delta T_{ан}$; $\Delta T_{ан}$ — в годах. В случае различных эпицентральных расстояний коэффициенты корреляции для долго- и среднесрочных предвестников существенно ниже: $\rho = 0,56 \pm 0,02$ и $\rho = 0,49 \pm 0,03$ соответственно. Рост коэффициента корреляции при переходе к эпицентральному и очаговому временам $\Delta T_{ан}$ можно объяснить следующим образом. Эпицентральное время ΔT_0 предвестника, являясь максимальным временным интервалом проявления данного предвестника, по-видимому, близко к величине временного интервала, необходимого для формирования в сей зоне проявления этого предвестника. Таким образом оно является, как и энергия землетрясения, интегральной характеристикой процесса подготовки данного сейсмического события. В основе вы-

сокой корреляции E с ΔT_0 лежит следующая физическая причина: энергия землетрясения определяется в основном размерами очага, которые, в свою очередь, достаточно однозначно определяют как размеры области проявления предвестников землетрясений [4], так и время проявления данного предвестника в эпицентре.

Сравнение зависимости $\Delta T_{\text{ан}}$ от E с аналогичными зависимостями для других предвестников [2, 5, 6] показывает, что долгосрочные предвестники по уровню подземных вод возникают приблизительно за те же сроки до землетрясений, что и предвестники по электросопротивлению и содержанию радона в подземных водах, а среднесрочные предвестники — за те же временные интервалы, что и предвестники по земным токам. Видно также, что для разрушительных землетрясений ($K \geq 14$) радоновые, электрические и гидрогеодинамические предвестники возникают значительно позже, чем предвестники по деформациям и движениям земной коры [7]: времена проявления деформационных предвестников составляют несколько лет—несколько десятилетий, а времена проявления радоновых, электрических и гидрогеодинамических предвестников — один год—несколько лет. По-видимому, за такой срок до разрушительных землетрясений начинается процесс интенсивного развития нарушений сплошности в очаге готовящегося землетрясения. Этот процесс трещинообразования приводит к резкому увеличению поступления радона в подземные воды и падению их уровня в результате усиления миграции подземных вод в трещиноватой среде и заполнения ими возникших нарушений сплошности. Как следствие обводнения горных масс значительно падает их электросопротивление.

За несколько месяцев до разрушительных землетрясений на фоне долговременной вариации уровня подземных вод возникает дополнительная бухтообразная вариация — среднесрочный предвестник. Как показали результаты наблюдений для Ганшаньского ($K = 16,5$), Хайченского ($K = 16$) и некоторых других землетрясений, бухтообразные предвестниковые вариации длительностью в несколько месяцев существуют и для других геофизических характеристик — деформаций, электросопротивления, содержания радона в подземных водах, напряженности поля земных токов, ускорения силы тяжести и др., однако ввиду очень малого числа значений среднесрочных $\Delta T_{\text{ан}}$ по этим предвестникам для землетрясений с $K < 16$ пока что удалось получить зависимость среднесрочных времен $\Delta T_{\text{ан}}$ от энергии землетрясения лишь для земных токов [6].

Появление среднесрочных предвестников, по-видимому, означает начало нового этапа трещинообразования в очаге с существенно (на порядок) большей скоростью, так как амплитуды долго- и среднесрочных предвестников близки между собой по величине, а времена проявления среднесрочных предвестников на порядок меньше долгосрочных. Возрастание скорости трещинообразования за несколько месяцев до разрушительных землетрясений можно интерпретировать как результат значительно усилившегося взаимодействия трещин, достигших к этому времени критических размеров, для начала их более интенсивного роста и слияния в трещины существенно больших размеров.

За несколько суток до землетрясения появляются краткосрочные вариации различных геофизических полей (см. рис. 1) с амплитудами,

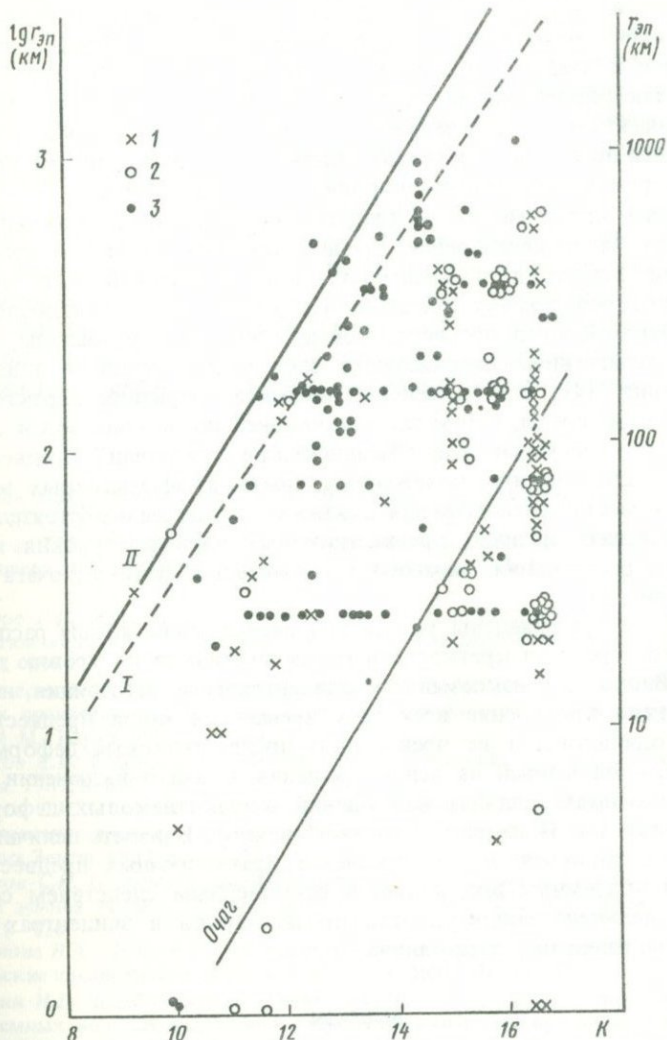


Рис. 4. Ареал распространения предвестников землетрясения по уровню подземных вод

1 — долгосрочные; 2 — среднесрочные; 3 — краткосрочные; радиус проявления деформационных предвестников: I — по модели включения [4]; II — по данным наблюдений [15]

сопоставимыми с амплитудами долго- и среднесрочных предвестниковых эффектов. Появление краткосрочных предвестников с большими амплитудами (в том числе сильных форшоков, больших деформаций земной коры, значительных изменений уровней подземных вод и концентрации в них радона) и совпадение их по временам возникновения до землетрясений (см. рис. 3) можно объяснить переходом процесса подготовки землетрясения в свою последнюю стадию — стадию лавинного

роста числа и размеров предваряющих разрывов перед образованием магистрального разрыва, вызывающего землетрясение. Процесс трещинообразования в стадии проявления краткосрочных предвестников идет со скоростью, примерно на порядок превышающей скорость трещинообразования в стадии среднесрочных предвестников, так как амплитуды их близки по величине, а времена проявления краткосрочных предвестников на порядок меньше времен проявления среднесрочных.

Описанный выше механизм трехстадийного трещинообразования, ответственный за возникновение предвестниковых аномалий геофизических полей, относится, по-видимому, лишь к очаговой зоне землетрясения, в которой процесс трещинообразования выражен наиболее сильно. Вне очаговой зоны предвестниковые эффекты обусловлены, вероятнее всего, изменением напряженного состояния в процессе подготовки землетрясения [4]. Это изменение вызывает вариации характеристик газожидкостной среды, в том числе и уровней подземных вод в скважинах, которые действуют как "механические усилители" предвестниковых деформаций (ввиду пониженных значений эффективных модулей упругости в местах расположения скважин). Последним обстоятельством можно объяснить наличие предвестниковых вариаций уровня подземных вод на расстояниях, намного превышающих размеры очага землетрясения (рис. 4).

На рисунке представлены результаты исследований ареала распространения долго-, средне и краткосрочных предвестников по уровню подземных вод. Видно, что максимальные эпицентральные расстояния, на которых возможно проявление всех трех временных типов предвестников, примерно одинаковы и не превосходят предвестниковый деформационный радиус, полученный на основе решения задачи о включении [4], а также в результате анализа наблюдений предвестниковых деформаций [15] (прямые I и II на рис. 4 соответственно). Близость величин предвестниковых радиусов долго-, средне- и краткосрочных предвестников по уровню подземных вод является естественным следствием сопоставимых по величине амплитуд этих предвестников в эпицентрах землетрясений и на различных расстояниях от них.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что предвестники, основанные на изучении уровня подземных вод, можно разделить на три типа: долго-, средне- и краткосрочные. Долгосрочные предвестники для разрушительных землетрясений с $K \geq 14$ возникают в эпицентральных зонах за время год—несколько лет до сейсмических событий; среднесрочные — за несколько месяцев; краткосрочные — за несколько суток.

2. Времена проявления $\Delta T_{\text{ан}}$ предвестников по уровню подземных вод всех трех временных типов возрастают с энергией землетрясения (в диапазоне $K = 9-17$) и уменьшаются с ростом эпицентрального расстояния. Времена проявления долго- и среднесрочных предвестников в эпицентрах ΔT_0 находятся в тесной корреляционной связи с энергией землетрясений. Времена проявления краткосрочных предвестников с энергией землетрясений и эпицентральным расстоянием связаны слабо.

3. Существование трех последовательных временных типов предвестников, совпадающих с временами возникновения электрических и радоновых предвестников, означает, по-видимому, существование трех стадий прогрессирующего трещинообразования в зоне очага готовящегося землетрясения, различающихся между собой по длительности и скорости проявления на один порядок.

4. Радиус зоны проявления предвестников по уровню подземных вод возрастает с энергией землетрясения; в первом приближении его можно считать одинаковым для всех трех временных типов предвестников.

5. Предвестники по уровню подземных вод проявляются внутри пространственно-временной области существования деформационных предвестников, что подтверждает обусловленность предвестниковых вариаций уровней подземных вод предвестниковыми деформациями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мячкин В.И., Зубков С.И. Сводный график предвестников землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1973. № 6. С. 28–32.
2. Зубков С.И., Мигунов Н.И. О времени возникновения электромагнитных предвестников землетрясений // Геомагнетизм и аэронавигация. 1975. Т. 15, № 6. С. 1070–1074.
3. Зубков С.И., Кушнир Г.С., Долбилкина Н.А. О предвестниках землетрясений по упругим волнам // Сейсмическое просвечивание очаговых зон. М.: Наука, 1976. С. 171–194.
4. Добровольский И.П., Зубков С.И., Мячкин В.И. Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясений // Моделирование предвестников землетрясений. М.: Наука, 1980. С. 7–44.
5. Зубков С.И. Радоновые предвестники землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1981. № 6. С. 74–105.
6. Зубков С.И. О зависимости времени возникновения и радиуса зоны проявления электротеллурического предвестника от энергии землетрясения // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1983. № 4. С. 101–106.
7. Зубков С.И. О временах возникновения предвестников землетрясений по движениям земной коры // Прогноз землетрясений. М.; Душанбе: Дониш, 1984. № 5. С. 118–126.
8. Алимова В.А., Зубков С.И. Каталог предвестников землетрясений: Гидрогеодинамические предвестники. М., 1983. 140 с. (Тр. ИФЗ АН СССР).
9. Киссин И.Г., Барабанов В.Л., Гриневский А.О. и др. Опыт исследования режима подземных вод для выделения гидрогеодинамических предвестников землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1983. № 6. С. 74–86.
10. Киссин И.Г. Об аномальных вариациях обводненности нефтедобывающих скважин перед землетрясениями // Докл. АН СССР. 1983. Т. 270, № 3. С. 574–577.
11. Милькис М.Р. Гидрогеологические и гидрометеорологические предвестники Ашхабадского катастрофического землетрясения // Там же. Т. 273, № 5. С. 1091–1094.
12. The Tangshan earthquake of 1976. Beijing (China): Seismol. press, 1982. 459 p.
13. Wang Chengmin, Zhang Hongpo. The short-term variation of the ground water level before earthquakes // Acta seismol. sin. 1982. Vol. 4. P. 362–372.
14. Jin Bo-zhong, Huang-Zheng-gi. The characteristics of ground water level anomalies in Beijing-Tianjin-Tangshan region during Tangshan earthquake // Acta geophys. sin. Suppl. 1982. Vol. 25. P. 594–604.
15. Сидорин А.Я. Зависимость величины аномальных деформаций земной коры от расстояния до эпицентра готовящегося землетрясения // Докл. АН СССР. 1980. Т. 250, № 3. С. 599–602.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ И ИХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

Газодинамические явления в Карагандинском угольном бассейне происходят в форме внезапных выбросов угля и газа, внезапных разломов почвы. Выдавливание пласта при проведении подготовительных выработок производится, как правило, комбайновым способом. Обеспечение безопасности работ на выбросоопасных пластах в значительной мере обусловлено действенностью контроля состояния массива.

В Карагандинском политехническом институте, Институте сейсмологии АН КазССР, ПО "Карагандауголь" разработан сейсмоакустический экспресс-метод контроля выбросоопасности в подготовительных забоях, проходимых комбайновым способом, заключающийся в анализе акустического последействия пласта после возбуждения вследствие работы комбайна [1].

Установлено необходимое время воздействия проходческого комбайна на забой угольного пласта (1 мин) и продолжительность паузы регистрации акустического последействия после отключения комбайна, на которую приходится максимум активности пласта (5 мин). Во время прослушивания акустической реакции пласта все механизмы в забое, кроме вентилятора местного проветривания, выключаются, что исключает запись и последующий анализ посторонних шумов и повышает качество контроля.

Измерения акустического последействия производятся с помощью серийной аппаратуры ЗУА-4, подземный блок которой устанавливается в шпуре длиной 1,5 м, диаметром 90 мм, пробуренном в боку выработки на расстоянии не более 10 м от забоя. Информация с подземного блока выдается на поверхность по телефонному кабелю и записывается на магнитофон. Для последующего анализа магнитограммы сейсмоимпульсов воспроизводятся с помощью шлейфового осциллографа, а полученные сейсмограммы оцифровываются на специальном устройстве и вводятся в ЭВМ.

Прогностические параметры акустического последействия угольного пласта, соответствующие его безопасному состоянию, устанавливаются на 10 начальных циклах проходки в заведомо безопасных условиях. Предупреждение о формировании в забое выработки выбросоопасной ситуации выдается при появлении каких-либо аномалий акустического последействия пласта.

С целью изучения механизма разрушения массива горных пород в окрестности забоя подготовительной выработки и установления критерия контроля газодинамических явлений проводилась локализация очагов акустической эмиссии (АЭ) с определением пространственных координат источников АЭ, времени их образования и скорости упругой волны [2]. Одновременное наблюдение за АЭ пласта осуществлялось с помощью 5 датчиков. Координаты источника АЭ вычислялись путем решения системы уравнений на ЭВМ ЕС-1022.

Эксперименты показали, что впереди движущегося забоя распространяется зона трещинообразования. Внезапные выбросы, как правило, приуро-

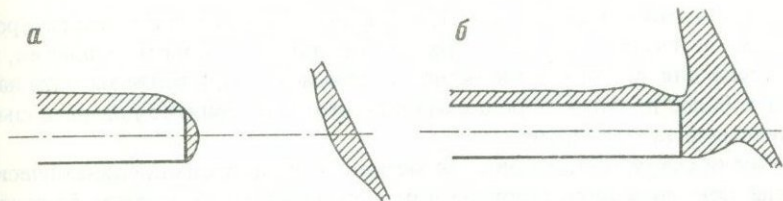


Рис. 1. Зоны деформаций растяжения (заштрихованы) у выработки (а) и геологического нарушения (б)

ченны к участкам пласта с различными геологическими нарушениями (сбросы, взбросы, изменение мощности и т.п.). Результаты локализации АЭ показали также, что при сближении выработки с геологическим нарушением (и формировании выбросоопасной ситуации) вблизи нарушения образуется новая группа источников АЭ, т.е. происходит их удаление от забоя.

С целью объяснения полученных экспериментальных данных решена пространственная задача теории упругости для забоя подготовительной выработки в однородном массиве с геологическим нарушением в виде разрыва сплошности типа сброс-взброс при наличии трения в плоскости нарушения [3].

Расчеты показали, что в окрестности забоя выработки возникают деформации растяжения: в кровле — параллельные забою, впереди забоя — вдоль оси выработки (рис. 1, а). Горные породы сопротивляются растяжению значительно хуже, чем сжатию, поэтому в пределах этих зон массив может растрескиваться с образованием впереди забоя трещин, параллельных забою. У геологического нарушения также возникает зона деформаций растяжения. При приближении забоя к геологическому нарушению на расстоянии 4–5 характерных размеров поперечного сечения выработки происходит слияние этих зон и большой объем пород скачкообразно переходит из сжатого состояния в растянутое (рис. 1, б). Дальнейшее сближение выработки с нарушением приводит к значительному увеличению плотности энергии формоизменения в области растяжения, что может вызвать бурное разрушение пород и инициирование динамического явления.

По аналогии с жестким и мягким нагружением образцов горных пород на процессах деформирование массива после слияния зон растяжения можно считать мягким, при проходке вдали от нарушения — жестким, контролируемым. Переход массива в условия мягкого нагружения в результате обрушения зависающей консоли пород кровли, когда целики и породы разрушаются с приобретением кинетической энергии, рассматривается в [4].

Газодинамические явления могут происходить и при аномальном первоначальном напряженном состоянии массива. Особенности разрушения массива при негидростатическом напряженном состоянии рассмотрены на примере решения плоской задачи теории ползучести и разрушения горных пород при больших деформациях, алгоритм которой описан в [5].

Расчеты показали, что при небольшом различии в прочности угля и вмещающих пород разрушение целика угля при гидростатическом напря-

женном состоянии начинается у стенок выработки и со временем распространяется в глубь массива. При повышенном боковом давлении, что характерно для тектонически активных районов, разрушение массива начинается в более прочных породах кровли, что благоприятно для развязывания динамического явления.

Таким образом обосновывается механизм инициирования динамических явлений при аномалиях строения и первоначального напряженного состояния массива и возможность контроля явления (трещинообразования) методами сейсмоакустической эмиссии.

Промышленные испытания сейсмоакустического экспресс-метода контроля динамических явлений проводилась на шахтах им. В.И. Ленина, им. 50-летия Октябрьской революции, "Стахановская" и "Саранская" ПО "Карагандауголь" при проходке подготовительных выработок по мощным выбросоопасным пластам. Залегание пластов пологое. Глубина разработки — 400—450 м. Строение пластов сложное, общая мощность 5,3—6,0 м. Кровля и почва сложены аргиллитом.

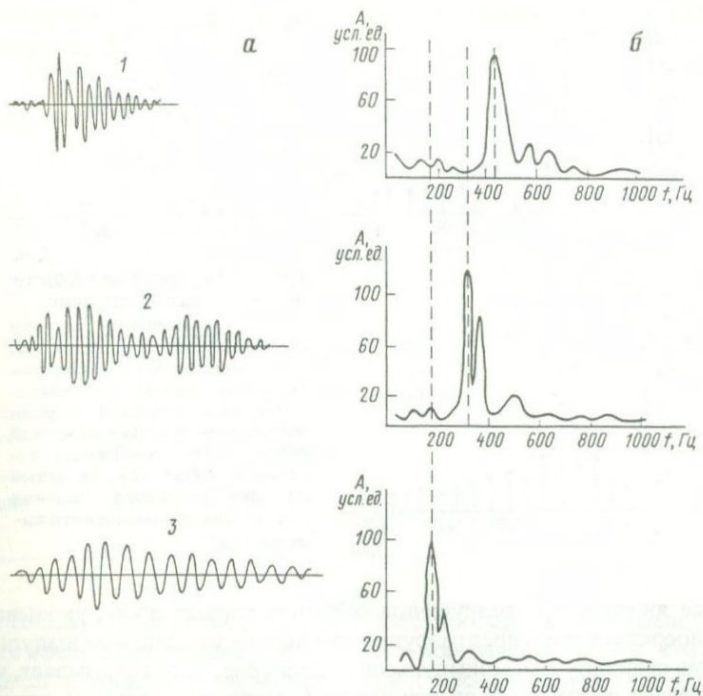
Сейсмоакустический контроль выбросоопасности осуществлялся через каждый метр продвижения забоя подготовительной выработки. В качестве оперативного критерия выбросоопасности использовалось количество импульсов акустического последствия угольного пласта, подсчитываемое на слух в пятиминутном интервале паузы в работе механизмов.

Во время испытаний несколько раз прогнозировались газодинамические явления с заблаговременным выводом рабочих из забоя.

Так, 16 сентября 1982 г. во время контроля в бремсберге были зарегистрированы 11 сейсмоимпульсов при критерии опасности 4. По распоряжению оператора на поверхности работы в забое были запрещены, а рабочие из забоя выведены. Через 8—10 мин в забое произошло газодинамическое явление типа внезапного разлома почвы, сопровождавшееся усиленным газовыделением.

Особенностью акустического последствия пласта в безопасных условиях является равномерность распределения сейсмоимпульсов в течение паузы контроля. В опасном состоянии забоя сейсмоимпульсы следуют сериями по несколько штук один за другим.

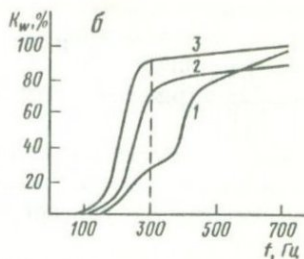
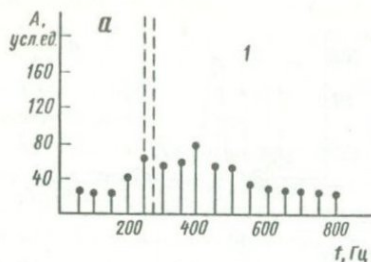
На шахте апробирована технология проходки выработок с контролем выбросоопасного состояния. После выдачи сигналов "опасно" работы останавливаются на 30—40 мин для разрядки напряженного состояния пласта и формирования безопасных условий. После этого снова проводится сейсмоконтроль. Сейсмоакустический экспресс-метод контроля состояния массива является теперь одним из элементов безопасной технологии проведения горных выработок по выбросоопасным пластам. Наглядным подтверждением тому служит пример проходки конвейерного штрека № 28 по верхнему слою особовыбросоопасного пласта на шахте им. В.И. Ленина. 9 марта 1985 г. количество сейсмоимпульсов в забое значительно превысило ранее установленный безопасный уровень, проходка осуществлялась с выдержкой во времени, газодинамические явления не возникали. По нижнему слою пласта на расстоянии 5 м от верхней выработки в зоне разгрузки (и поэтому без сейсмоконтроля) находился конвейерный штрек № 28. 24 апреля 1985 г. на расстоянии менее 10 м от установленной на верхнем слое опасной зоны произошел внезапный выброс угля и газа.



Р и с. 2. Характерные формы импульсов (а) и их спектры (б) в безопасном (1) и опасном (2, 3) состояниях забоя

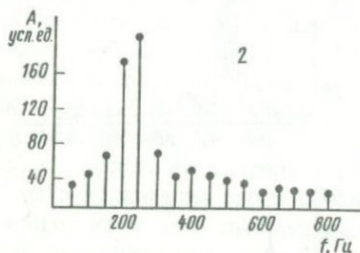
Таким образом, благодаря сейсмоконтролю удалось обнаружить опасную зону на верхнем слое пласта и безопасно пройти ее с выдержкой забоя во времени.

С целью апробации дополнительных критериев сейсмоконтроля проводился анализ сейсмоимпульсов, характерных для безопасной и опасной ситуаций, на значительном удалении и вблизи от геологического нарушения. Обработка экспериментальных результатов проводилась ретроспективно по данным фактических газодинамических явлений. На шахте им. В.И. Ленина был зафиксирован процесс подготовки внезапного разлома по пласту. Сейсмоимпульсы зарегистрированы за двое суток, за сутки и в день события. На шахте "Саранская" произошел внезапный разлом почвы при проходке штрека. В дальнейшем этими забоями были вскрыты геологические нарушения с небольшой амплитудой. Аналогичные факты были получены и в других выработках шахт им. В.И. Ленина, "Стахановская". Сейсмоимпульсы, зарегистрированные в безопасном и опасном по выбросам пластах, отличаются по форме и частотному составу (рис. 2). В безопасном состоянии пласт реагирует на воздействие на забой одиночными импульсами. При повышении степени опасности изменяется форма акустических сигналов: увеличивается период, появляются серии импульсов, следующих один за другим, двойные, тройные импульсы. В опасном состоянии увеличивается количество импульсов с большей длительностью. На ана-



Р и с. 3. Предвестники формирования опасной ситуации

а — изменение частоты спектрального максимума: 1 — неопасное, 2 — опасное состояние забоя; *б* — увеличение относительной энергии импульсов в низкочастотной полосе: при неопасном состоянии забоя (1), за сутки до динамического явления (2), в день динамического явления (3)



логичные явления при разрушении образцов горных пород указывалось в [6]: непосредственно перед разрушением возникали двойные импульсы АЭ.

Анализ спектров сейсмоимпульсов пласта (рис. 3, *а*) показывает, что при расположении забоя вдали от нарушения (безопасные условия) спектр имеет 3 близких по величине максимума на частотах 250, 400 и 500 Гц, а вблизи от нарушения — один ярко выраженный максимум на частоте 250 Гц. Аналогичные данные по частоте спектрального максимума для пласта на шахте "Стахановская": 373 Гц в безопасной ситуации и 303 Гц в опасной.

Таким образом, при сближении выработки с геологическим нарушением и формировании опасного состояния частота спектрального максимума f_{\max} смещается в низкочастотную область.

При формировании выбросоопасной ситуации изменяется и распределение энергии импульсов в различных частотных интервалах. У сейсмоимпульсов, зарегистрированных в менее опасной ситуации, основная часть энергии сосредоточена в частотном интервале 300–600 Гц. По мере ухудшения ситуации происходит постепенное смещение основной части энергии регистрируемых импульсов в низкочастотную область (100–300 Гц). Отношения суммарной энергии импульса в диапазоне частот до 300 Гц к его полной энергии характеризуются следующими значениями [7]: 34,6 ± 7,2% за двое суток, 77,2 ± 3,2% за сутки и 84,4 ± 1,2% в день проявления внезапного разлома почвы (рис. 3, *б*).

Анализ осциллограмм показывает, что в начальной части сейсмоакустических импульсов иногда можно выделить два типа волн, различающихся кинематическими и динамическими характеристиками. Колебания, регистрируемые в первых вступлениях, имеют меньшую амплитуду и большую видимую частоту по сравнению с последующими. Колебания, регистрируемые во вторых вступлениях, характеризуются максимальной амплитудой и меньшей частотой. Указанные особенности этих колебаний позволяют отнести их к прямым продольным (*P*) и поперечным (*S*) волнам [8].

Таблица 1. Результаты статистической обработки характеристик сейсмоимпульсов

Показатель	Шахта			
	"Саранская"		им. В.И. Ленина	
	опасно	безопасно	опасно	безопасно
$\Delta t, \text{мс}$	$2,67 \pm 0,26$	$1,88 \pm 0,5$	$2,7 \pm 0,3$	$1,9 \pm 0,5$
f_P/f_S	$2,12 \pm 0,33$	$1,33 \pm 0,17$	$2,26 \pm 0,1$	$1,24 \pm 0,1$

Таблица 2. Значения коэффициента вариации, %

Состояние забоя	Параметр			
	Δt	f_P/f_S	f_{max}	k
Безопасно	36,0	18,0	29,5	54,0
Опасно	11,6	13,0	8,9	11,2

При сближении выработки с геологическим нарушением увеличивается разность времен вступлений продольной и поперечной волн Δt . Результаты замеров Δt и отношения частот продольной и поперечной волн (f_P/f_S) приведены в табл. 1.

При приближении к нарушению параметры Δt и f_P/f_S возрастают. В сейсмологии известны факты увеличения отношения f_P/f_S от 1,10 до 1,84 с увеличением эпицентрального расстояния [9].

Рассмотренные признаки опасного состояния пласта (уменьшение частоты спектрального максимума, удаление источников АЭ от забоя) можно объяснить увеличением поглощения высокочастотной составляющей спектра с удалением источников сейсмоимпульсов от забоя, а также образованием более крупных трещин и возбуждением упругих волн большей длины, а следовательно, меньшей частоты.

Если фиксированные значения волновых пакетов сейсмоимпульсов принять за случайные величины, то по величине коэффициентов корреляции между ними можно судить о степени структурного подобия сейсмоимпульсов [10]. В более опасной ситуации возрастает максимальное значение коэффициента корреляции, следовательно, с повышением опасности ситуации степень структурного подобия сейсмоимпульсов увеличивается.

С увеличением степени опасности по газодинамическим явлениям уменьшается коэффициент вариации (отношение среднеквадратичной ошибки к среднему значению величины в предположении, что ошибки измерений распределены по нормальному закону) некоторых сейсмоакустических признаков (табл. 2).

Повышение степени структурного подобия сейсмоимпульсов и уменьшение коэффициента вариации Δt , f_P/f_S , f_{max} , k , по-видимому, характеризуют локализацию процесса разрушения при формировании выбросоопасного состояния забоя.

Проведенные исследования дают основания рассматривать следующие предвестники газодинамических явлений.

1. Превышение предельного количества импульсов.
2. Большая амплитуда отдельных импульсов.
3. Увеличение частоты следования импульсов, появление групп импульсов.
4. Смещение в область низких частот частоты спектрального максимума.
5. Увеличение количества переходов через ноль в низкочастотной области.
6. Удаление очагов АЭ от забоя.
7. Увеличение разности времен вступления продольных и поперечных волн.
8. Увеличение отношения видимых частот продольных и поперечных волн.
9. Увеличение относительной энергии импульсов в низкочастотной полосе (до 300 Гц).
10. Увеличение степени структурного подобия сейсмоимпульсов.
11. Уменьшение коэффициента вариации разности моментов вступления продольных и поперечных волн, отношения их частот, частоты спектрального максимума, относительной энергии импульсов в полосе до 300 Гц.

Особенностью экспресс-метода контроля является определение ситуации в каждом конкретном забое по тенденции изменения предвестников. В настоящее время разрабатывается автоматизированная система контроля состояния массива на базе ЭВМ с использованием установленных критериев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садинов А.С., Ержанов Ж.С., Векслер Ю.А. и др. Сейсмоакустический контроль выбросоопасности при проведении подготовительных выработок // Геофизические способы контроля напряжений и деформаций. Новосибирск: Ин-т горного дела, 1985. С. 25–30.
2. Ержанов Ж.С., Векслер Ю.А., Шакиров А.Т. и др. Локализация очагов акустической эмиссии в подготовительных выработках // Горная геофизика: Тез. докл. Тбилиси, 1981. С. 15–16.
3. Векслер Ю.А., Жданкин Н.А., Колоколов С.Б. О механизме инициирования внезапного выброса вблизи геологического нарушения // ФТИРПИ. 1983. № 2. С. 3–8.
4. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.
5. Векслер Ю.А., Тутанов С.К. Расчет больших деформаций ползучести и разрушения горных пород вокруг выработок // Прикл. механика. 1983. Т. 19, № 8. С. 108–110.
6. Куксенко В.С. Физические причины подобия в выделении упругой энергии при разрушении горных пород // Наст. сб.
7. Яковлева Н.Э., Шульгин Е.И., Саттаров С.С. Энергетический критерий выбросоопасности подготовительных забоев на шахтах // Оптимизация технологических схем разработки полезных ископаемых. Караганда: КарПТИ, 1984. С. 78–81.
8. Векслер Ю.А., Шакиров А.Т. Особенности акустической эмиссии угольного пласта при сближении горной выработки с геологическим нарушением // X Всесоюз. акуст. конф. Секция EIV. М., 1983. С. 35–38.
9. Методы детального изучения сейсмичности. М., 1960. (Тр.ИФЗ АН СССР; № 9 (179)).
10. Векслер Ю.А., Шульгин Е.И., Яковлева Н.Э. Структурное подобие волновых пакетов сейсмоакустических импульсов // Анализ и оптимизация технологических схем проведения горных выработок и выемки полезных ископаемых. Караганда: КарПТИ, 1981. С. 50–55.

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПОЗИЦИЙ

Анализ моделей очагов землетрясений с позиций физики и механики разрушения уже проводился неоднократно [1, 2]. В данной работе предпринята попытка провести сопоставление наиболее известных и разработанных моделей очагов землетрясений с сейсмогеологическими, геолого-геофизическими, тектонофизическими и новыми лабораторными экспериментами по разрушению горных пород. В основу представлений авторов взяты материалы полевых исследований в районах эпицентральных областей сильных землетрясений Монголо-Байкальской сейсмической зоны.

Обратимся к рассмотрению наиболее известной в нашей стране модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ), разработанной в Институте физики Земли АН СССР [3]. В качестве ее главного исходного положения взято сравнительно недавно установленное и фундаментально обоснованное понятие временной зависимости прочности твердых тел. Процесс разрушения рассматривается как стадия накопления повреждений до некоторого порогового значения, после достижения которого происходит разделение тела на части [4, 5]. Используя эти представления, а также материалы многочисленных лабораторных экспериментов, авторы модели предложили рассматривать подготовку очага и сам момент землетрясения как накопление в локализованном объеме земной коры под тектонической нагрузкой элементарных разрывов до определенной пороговой плотности. После ее достижения начинается их объединение в более крупные, процесс разрушения переходит на следующую иерархическую ступень и так далее. Лавинное нарастание первичных трещин в фазе кластеризации, т.е. их объединения в магистральные разрывы, сопровождается высвобождением накопленной упругой энергии. Таким образом находит физическое объяснение природа акустической эмиссии в лабораторном эксперименте и сейсмической эмиссии при подготовке очага землетрясения.

В геологической обстановке явление кластеризации при формировании крупных разломов и сейсмодислокаций достаточно очевидно и известно специалистам по структурной геологии. Следовательно, модель ЛНТ в целом согласуется с геологическими данными и соответствует реальному механизму деструкции горных пород. Это находит отражение в виде определенных предвестников сильного землетрясения, проявлявшихся в геофизических полях и в вариациях режима сейсмической активности. Одно из несомненных и важных достоинств модели — воспроизводимость в широком диапазоне масштабных уровней фундаментального механизма накопления и слияния трещин в магистральные зоны, что сопровождается динамическими явлениями. Существенным вкладом в разработку физической основы модели ЛНТ является обоснование и формулировка В.С. Куксенко, В.А. Петровым и др. [5] концентрационного критерия разрушения (ККР), выявленного при лабораторных испытаниях образцов

горных пород и других материалов. Кроме этого, Г.А. Соболевым на основании количественного анализа режимных вариаций совокупности очагов землетрясений Камчатки была подтверждена принципиальная возможность применения ККР в прогнозных целях для крупных объемов земной коры и верхней мантии [6]. В этой связи понятие ККР было использовано также и нами на примере Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) для анализа деструкций земной коры при рифтогенезе [7].

С геологической карты БРЗ миллионного масштаба, составленной по материалам кондиционных среднемасштабных геологических карт, была собрана и обработана информация о количестве разрывных нарушений разного ранга, которая описывается в целом для БРЗ уравнением вида

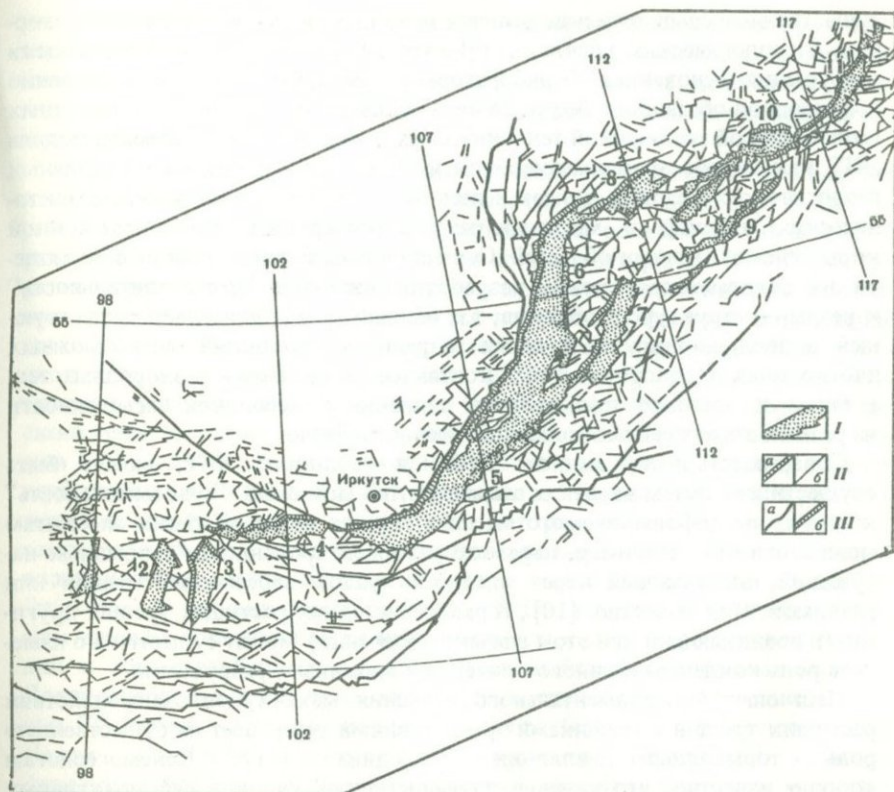
$$N = 175 \exp(-0,05L),$$

где N – количество разрывов; L – длина их, км. Для данного масштаба карты формула справедлива в интервале длин разрывов 8–100 км. Это как раз тот диапазон разрывов, с которым наиболее вероятно связь землетрясений, имеющих магнитуды 5,0–7,5. Статистическая обработка всей совокупности разрывов на карте указанного масштаба позволила выявить ранговую делимость разрывов, которые распределяются преимущественно в виде следующих значений длин: 9, 15, 21, 25, 29, 35, 41, 47, 55, 65, 71, 77, 83, 89, 95, 101. Как видно, смежные ранги различаются примерно на 6 км и можно предположить, что переход от ранга к рангу осуществляется путем последовательного присоединения элементарного разрыва или "подростания" на эту длину разрыва определенного ранга.

Для расчетов нами была взята формула ККР в виде

$$K = 1/(\sqrt{N_*} L_{cp}),$$

где N_* – количество и L_{cp} – средняя длина разрывов в квадратной паплетке площадью $3,6 \cdot 10^3 \text{ км}^2$. В результате было выяснено, что интервал значений ККР для выбранного региона и масштаба карты равен $(0,66–2,04) \cdot 10^{-2}$. При этом 67% учтенных очагов землетрясений с $M = 5,0–7,5$ (в том числе палеосейсмодислокаций) попадает на те районы, где значения ККР не превышают $1,02 \cdot 10^{-2}$. Именно в таких районах БРЗ отмечается повышенная плотность крупных разломов и, следовательно, в них неотектоническая деструкция земной коры достигает порогового уровня развития, когда возникают процессы локального динамического разрушения. Важно отметить, что такие районы повышенной плотности протяженных разрывов и очагов сильных землетрясений располагаются вдоль оси БРЗ, трассируя таким образом область максимальной тектонической нарушенности земной коры при рифтогенезе. На рис. 1 приведена схема, поясняющая современное строение БРЗ, впадины которой в своей совокупности могут рассматриваться как элементы развивающегося транс-континентального магистрального разлома общей протяженностью около 2 000 км. Следуя известным представлениям А. Гриффита [8] о критической длине трещины для напряжений определенного уровня, при достижении которой она начинает расти, можно предполагать, что в земной коре БРЗ при существующем напряженном состоянии земной коры большую активность будут проявлять разломы, имеющие достаточно большую протяженность. Учет таких разломов отражен в формуле концентрационного



Р и с. 1. Схема структурных взаимоотношений рифтовых впадин с активными разрывными нарушениями

I — главные рифтовые впадины: Бусингольская (1), Дархатская (2), Хубсугульская (3), Тункинская (4), Южно-Байкальская (5), Северо-Байкальская (6), Баргузинская (7), Верхнеангарская (8), Ципа-Баунтовская (9), Муйская (10); Чарская (11); *II* — крупные сбросы, выраженные уступами в рельефе (*a*) и прочие активные разломы низших иерархических уровней (*b*); *III* — докембрийские активизированные глубинные разломы (*a*), в том числе осложненные сбросовыми уступами (*b*)

критерия в виде значения средней длины. Это и дает физическое обоснование для применения понятия ККР в сеймотектоническом анализе.

Проведенные расчеты подтверждают возможность использования ККР в сеймотектонике, подчеркивая его фундаментальность и применимость в большом масштабном диапазоне разрушаемых объемов литосферы. Сейсмический процесс при этом по аналогии с акустической эмиссией разрушаемых лабораторных образцов можно рассматривать как сейсмическую эмиссию длительно развивающейся магистральной зоны Байкальского рифта в соответствии с известной кинетической концепцией прочности. Процессы накопления повреждений, их укрупнения и слияния в магистральный разрыв, последовательные переходы с одного иерархического уровня на другой, при соответствующем высвобождении упругой энергии, — все это и в образце, и в крупных блоках земной коры имеет общие черты единой физической природы разрушения. Несомненно, есть при этом и

существенные специфические отличия механизмов разрушения в лабораторных и геологических условиях [9], что не позволяет применять модели разрушения, основанные на лабораторных экспериментах, непосредственно к природной обстановке без учета ряда реальных факторов, обусловленных геологической спецификой тектонических процессов. В этом смысле модель ЛНТ как первое приближение, хотя и очень еще отдаленное от реальных геологических условий, может использоваться при изучении сейсмотектонических явлений в масштабе разрушения крупных геоблоков земной коры сейсмоактивных областей. Существенным недостатком данной модели на современном уровне разработки является "нечувствительность" к реальной структуре геоблоков, т.е. наличию в ней длительно существующей и эволюционирующей сетки разрывных нарушений, всевозможных плотностных неоднородностей и контактов механически разнородных тел, а также к влиянию температуры, давления и флюидной насыщенности на разных этажах сейсмофокальных зон литосферы.

Совершенствование модели ЛНТ, в частности ККР, может быть осуществлено путем введения элементов, повышающих "чувствительность" к структуре деформируемого массива горных пород. К таким элементам можно отнести, например, параметр разориентированности разрывных нарушений, выраженный через плотность узлов пересечений трещин или разломов. Как известно [10], торможение одних растущих трещин другими (и возникающий при этом эффект упрочения) может существенно изменить роль концентрационного критерия в механизме разрушения.

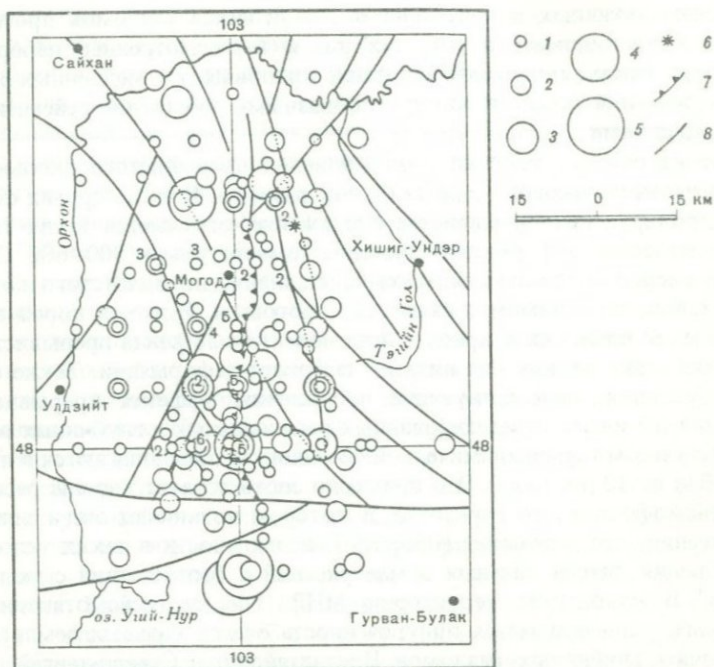
Наш опыт экспериментального изучения механизмов взаимодействия растущих трещин с трещинами-препятствиями указывает на существенную роль тормозящего влияния последних [11]. Сейсмогеологам хорошо известно, что наличие дизъюнктивных узлов в сейсмоактивных областях рассматривается как один из критериев повышенной вероятности возникновения очагов землетрясений. В этой связи представляется необходимой постановка вопроса об экспериментальном исследовании механизмов взаимодействия друг с другом одиночных трещин и их ансамблей. Проведенный анализ экспериментальных, сейсмологических и сейсмотектонических данных убеждает нас в целесообразности разработки такой модели дизъюнктивного узла, которая будет иметь свои специфические особенности и достоинства в отличие от других моделей очагов землетрясений, а также несомненный практический интерес для сейсмологии и теории разрушения.

Обратимся к рассмотрению другой достаточно известной модели — прерывистого скольжения "stick-slip" [12]. В ее основу положены результаты экспериментов на образцах горных пород с заданными трещинами, ориентированными под углом 40° к оси сжатия. Авторами модели были, в частности, установлены РТ-условия проявления скачкообразного скольжения берегов трещин вдоль подготовленной зоны скольжения, заполненной продуктами раздробленных и перетертых пород. В отличие от других моделей, в частности от модели ЛНТ, в ней рассматриваются эффекты прерывистого скольжения с соответствующими спадами напряжений и импульсным высвобождением упругой энергии по уже существующей зоне скольжения. Такая модель описывает близкие к полевым наблюдениям условия возникновения очагов землетрясений, приурочен-

ных к зонам активных и длительно развивающихся разломов протяженностью в сотни километров. Для них, как и в рассмотренных лабораторных экспериментах, характерно сочетание криповых, т.е. медленных равномерных, движений крыльев со скачкообразными собственно сейсмическими перемещениями.

Одним из важных условий возникновения прерывистого скольжения является наличие бокового сжатия стенок разрыва. В числе других факторов, контролирующих прерывистое скольжение, отмечаются также температура и скорость деформации. Значение температуры в 500–600° С, т.е. равное примерно половине температуры плавления пород кислого и основного составов, по-видимому, является пороговым. Разогрев пород выше этого значения приводит к крипу с исчезновением эффекта прерывистости скольжения, так же как и низкие скорости деформации. Такие оптимальные условия, способствующие проявлению эффекта прерывистого скольжения по зонам активизированных региональных и глубинных разломов БРЗ с учетом термодинамической обстановки, предполагаются в интервале глубин от 10 до 20 км. Это примерно соответствует уровню расположения сейсмофокального горизонта, в котором возникают очаги сильных землетрясений, что позволяет говорить о возможности в таких условиях возникновения очагов сильных землетрясений в соответствии с моделью "stick-slip". В отношении территории МНР, где по сеймотектоническим данным устанавливается приуроченность очагов сильных землетрясений к зонам глубинных разломов Предалтайского, Северо-хангайского, Долиноозерского и др., пока можно лишь сделать предположение о сходных РТ-условиях в земной коре на тех же глубинах очагов землетрясений. На рис. 2 (вкл.) можно видеть пример приуроченности эпицентров катастрофических землетрясений к зонам древних активизированных разломов. Очаги двух хангайских катастрофических землетрясений 1905 г. — Цэцэрлэгского (9.VII, $M = 7,6$) и Болнисского (23.VII, $M = 8,2$) — были приурочены к глубинным активно развивающимся разломам, что привело к их вспарыванию в виде системы сейсмодислокаций преимущественно сдвигового типа. Эти сейсмогенные нарушения прослежены на расстоянии более 630 км в виде узких полос, средняя ширина которых не превышает первых десятков метров, тогда как в целом ширина зоны Северо-Хангайского разлома исчисляется многими километрами. Интересная деталь в строении таких сейсмогенных зон — наличие нескольких ответвлений на многие десятки километров и изменение характера смещений по ним. Это указывает на избирательный характер вспарывания по наиболее ослабленным разломам земной коры в районе возникновения очага землетрясений в соответствии с современной ориентировкой главных осей тектонических напряжений. Другой типичный пример подобного рода — Гоби-Алтайское землетрясение 4.XII 1957 г. ($M = 8,1$), при котором в зоне глубинного Долиноозерского разлома возникла система взбросо-сдвиговых дислокаций протяженностью 270 км [13].

На рис. 3 показана плейстосейстовая область Могодского землетрясения (5.I 1967 г., $M = 7,8$). Южная часть возникшей системы сейсмодислокаций имеет северо-западное простирание, взбросо-сдвиговый тип подвижки и приурочена к древнему взбросу того же простирания. Далее к северу сейсмодислокации приобретают субмеридиональное направление и право-



Р и с. 3. Схема эпицентральной области Могодского землетрясения 5.1 1967 г.

1–5 – эпицентры афтершоков с 1964 по 1980 г. энергетических классов $K = 9, 10, 11, 12, 13$ соответственно; 6 – эпицентр землетрясения по инструментальным данным; 7 – зоны сейсмодислокаций 1967 г.; 8 – активизированные разломы

сторонний сдвиговый тип смещений. Здесь сопряженность сейсмодислокаций с зоной древнего активизированного разлома выражена не так ярко из-за слабой обнаженности, но тем не менее в ряде мест (отрог Сархиагийн-Бэл) она хорошо подтверждается геологическими данными. Южный фрагмент зоны сейсмодислокаций оканчивается вблизи субширотного разлома, по-видимому, сыгравшего роль барьера. Возникновение разориентированных сейсмодислокаций в эпицентральной зоне – довольно частое явление, и его следует рассматривать как распространенный механизм деструкции земной коры в соответствии с существующей нарушенностью горных масс и действующим региональным полем напряжений. Судя по расположению эпицентров большого числа афтершоков, при Могодском землетрясении произошло малозаметное подновление ряда других соседних разломов Орхон-Тольской неотектонической зоны. Особенно сложное строение эпицентральных полей афтершоков и их механизмов отмечается в очагах, приуроченных к разломным узлам, что предполагается и для самого Могодского землетрясения. На этом примере мы, кстати, можем заметить, что в модели прерывистого скольжения не рассматриваются подобные случаи вообще. Это еще раз подчеркивает целесообразность разработки модели дизъюнктивных узлов. Из-за большого фрикционного трения в сместителе сейсмогенерирующего разлома, особенно на глуби-

нах 15–20 км, как показывают эксперименты и сейсмогеологические наблюдения, процесс разрушения пород в очаге может охватывать не только внутреннюю, но и внешнюю приконтактную зону, выходя за ее пределы. Это выражается в локальном расширении деформационной зоны и соответственно в расплывчатых контурах эпицентрального поля афтершоков, но вряд ли из-за этого следует ставить под сомнение приуроченность самого очага к зоне уже существующего разлома.

Опыт геологического изучения строения зон разломов, некогда бывших на глубинах порядка 5–15 км, а сейчас обнаженных на поверхности, показывает, что на этих глубинных уровнях в отличие от приповерхностных условий разломы имеют значительно меньшую ширину по сравнению с амплитудой смещения. По существу, это тонкие, но протяженные сместители, залеченные новообразованными минеральными фазами низких давлений и признаками их пластического течения. Отсюда вряд ли можно ожидать, что очаги и эпицентры землетрясений, определяемые с ограниченной точностью (5–25 км), будут трассировать подобные сместители, их искривления и разветвления. Экспериментальные исследования процессов разрушения горных пород также показывают на уменьшение раскрытия трещин сколового типа с ростом гидростатического давления [9]. Важно отметить, что в таких случаях существенно меняется режим акустической эмиссии, становятся менее выраженными акустические предвестники приближения разрушения, что следует учитывать и при расшифровке сейсмического режима зон разломов, описываемых моделью "stick-slip".

Существенным достоинством рассматриваемой модели можно считать то, что механизм прерывистого скольжения с генерацией упругих импульсов объясняет многократное возникновение землетрясений в отдельных фрагментах протяженного разлома. Примеры двух- и даже трехкратных повторений сильных землетрясений в одних и тех же активизированных участках сейсмогенерирующих разломов с интервалами в сотни лет фиксируются геологическими методами в БРЗ, МНР и других районах Земли [13, 14]. Здесь уместно отметить, что и палеосейсмодислокации приобретают в модели "stick-slip" хорошее подтверждение с точки зрения физики разрушения. Имеется в виду высокая вероятность возникновения повторных сильных землетрясений в тех участках тектонически активного разлома, где обнаружены следы прошлых землетрясений в виде палеосейсмодислокаций. Поэтому выявление таких следов несет информацию не только в смысле расширения статистики сейсмических событий прошлого, но и дает основание для обоснованных предположений о вероятности их повторного возникновения на тех же участках сейсмогенерирующих разломов.

Наряду с двумя рассмотренными моделями геологический интерес может представлять еще одна — дилатантно-диффузная (модель ДД) [15, 16]. В ее основу взяты, как это следует из названия, два физических явления — расширение объема горных пород в области готовящегося очага землетрясения и диффузия водных растворов по трещинам. Оба явления находят отражение в поверхностных деформациях на определенной стадии подготовки сейсмического акта, а также в изменении некоторых физических параметров, прежде всего соотношения V_p/V_s , электросопротивления, внутривязкого давления, прочности на сдвиг.

Как видим, авторы модели используют известные в экспериментальной физике явления, пытаясь применить их для объяснения действительно фиксируемых процессов в районах готовящегося землетрясения, хотя примеры здесь малочисленны и могут быть интерпретированы по-другому.

Изменение электросопротивления горных пород, как показали, в частности, исследования [17], обуславливаются не только их водонасыщенностью, но также сложным влиянием термобарических градиентов на разных глубинах. Современная физико-химическая механика [18–20] позволяет оценить важную роль водной фазы в механическом поведении горных масс. Установлено, в частности, что присутствие водных растворов родственного химизма, их диффузия по трещинам и порам снижают в 5–10 раз прочность горных пород, изменяют реологическое поведение горных масс под нагрузкой и характер разрушения. Такие факторы авторами модели не рассматриваются, так же как и флюидный режим земной коры. В различных районах сейсмоактивных зон вариации содержания флюидов, их состава, а также градиентов P и T очень сильно различаются, что может дезориентировать специалистов в отношении выбора и оценки прогностических признаков подготовки землетрясений.

Тем не менее, несмотря на многие неясности, модель ДД имеет неоспоримое достоинство — она нацелена на учет роли водной фазы в породах, способной существенно преобразовать физико-механическое поведение и характер разрушения. Однако в отличие от модели ЛНТ она в ее современном виде весьма эмпирична, не имеет фундаментального обоснования с точки зрения физики, физикохимии и особенно геологии. Ввиду неясности многих исходных положений, в частности роли термодинамических факторов, источников флюидной фазы и исходной нарушенности земной коры, пока трудно судить о том, в каких геологических условиях ее применение может считаться оправданным. Тем не менее как первый опыт оценки роли флюидной фазы в формировании предвестников и в механизме подготовки очага модель ДД существенно продвигает нас вперед на пути к прогнозу.

Поступление в зону разлома флюидной массы из источника, возникшего, например, в апикальной части магматического очага или при диффузии поровых растворов, приведет к изменению ряда физических параметров. При этом, например, могут измениться внутрипоровое давление, сила трения и прочность на сдвиг, что приведет в одних случаях к развитию крипа, а в других — к быстрой подвижке крыльев разлома и интенсивному высвобождению упругой энергии.

Нельзя также игнорировать вероятность проявления контролирующей роли флюидов земной коры на ход подготовки землетрясения и особенно на механизмы афтершоковой последовательности. Спад напряжений на многие десятки и сотни бар в зоне очага землетрясения приводит к нарушению равновесия в системе температура—давление—флюидный режим и включению механизмов его восстановления в виде физико-химических реакций залечивания, т.е. восстановления сплошности среды. Длительность процесса для крупных очагов землетрясений с $K \geq 15$ по предварительным данным может равняться 10^4 – 10^5 лет [20]. Это на один-два порядка выше периода повторяемости сильных землетрясений, что позволяет предположить второстепенную роль процессов залечивания среди

факторов, контролирующих длительность периодов повторяемости. Для сейсмогенных разрывов слабых землетрясений $K \leq 10$ залечивание происходит за более короткие периоды — $1-10^2$ лет. Однако при наиболее быстром гидротермально-метасоматическом залечивании восстановления прочностных свойств разрушенных пород до первоначального уровня не происходит. Диффузия или инфильтрация поровых растворов в полости трещин в очаге может способствовать снижению коэффициента трения и проявлению более длительной афтершоковой последовательности в отличие от "воздушно-сухих" пород. Такое объяснение напрашивается, например, для многих землетрясений Монголо-Байкальской сейсмической зоны, отличающихся режимом афтершоковой последовательности. Таким образом, предстоит еще приложить много усилий к изучению влияния физико-химических превращений в минералах и флюидного режима земных недр на развитие процессов подготовки землетрясений и динамического разрушения в их очагах.

Сформулируем основные выводы, которые можно сделать после анализа рассмотренных моделей очагов землетрясений с геологических позиций. Каждая из рассмотренных выше моделей описывает лишь отдельные стороны процессов макроразрушения в земной коре и потому является частной, т.е. нацеленной на объяснение того или иного физического явления при макроразрушении. Естественно, что "узкая специализация" этих моделей, как, впрочем, и других менее известных, отражает наше современное ограниченное представление об основных механизмах тектонической деструкции земной коры и не позволяет в настоящее время выявить необходимый набор предвестников землетрясений для осуществления с требуемой степенью вероятности прогноза сейсмических катастроф или горных ударов. Главная трудность заключается в том, что в различных сейсмоактивных областях Земли сейсмический режим проявляется как результат одновременного действия совокупности многих тектонических факторов в их различных комбинациях.

Нам представляется, что модели, описывающие сейсмический процесс в сейсмоактивных областях со всей совокупностью землетрясений или в отдельных очагах, должны подразделяться иерархически. Модели высшего иерархического уровня (1-й ранг) предназначаются для описания в общем виде главных закономерностей сеймотектонической деструкции горных масс. Они должны направлять и корректировать исследования по разработке моделей 2-го ранга, а также определять граничные условия их применения в том или ином сейсмоактивном регионе. Для отдельных районов сейсмоактивных зон следует разрабатывать модели 3-го ранга, способные учитывать все детали и специфику местных сеймотектонических условий подготовки землетрясений.

По-видимому, нет смысла стремиться к созданию единой универсальной модели сейсмического процесса, учитывающей огромное количество деталей и пригодной для всех сейсмоактивных регионов. Такая модель будет слишком громоздкой, сложной, и для нее будет трудно подобрать математический аппарат.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Соболев Г.А.* Физические процессы подготовки землетрясений: Эксперимент и теория// Междунар. симпоз. по прогнозированию землетрясений. Париж: ЮНЕСКО, 1979. С. 1–55.
2. Прогноз землетрясений: Основы прогноза землетрясений/ Под ред. М.А. Садовского. М.; Душанбе: Дониш, 1983–1984. № 3. 220 с.
3. *Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А.* и др. Основы физики очага и предвестники землетрясений// Физика очага землетрясения. М.: Наука, 1975. С. 6–29.
4. *Журков С.Н., Нарзуллаев Б.Н.* Временная зависимость прочности твердых тел// ЖТФ. 1953. Т. 23, вып. 10. С. 1677–1689.
5. *Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А.* и др. О прогнозировании разрушения горных пород// Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 6. С. 11–18.
6. *Соболев Г.А., Завьялов А.Д.* О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов// Докл. АН СССР. 1980. Т. 252, № 1. С. 69–71.
7. *Ружич В.В., Мансуров В.А., Бабичев А.А.* О сейсмотектоническом критерии деструкции земной коры Прибайкалья при рифтогенезе// Там же. 1985. Т. 281, № 3. С. 566–569.
8. *Griffith A.A.* The phenomena of rupture and flow in solid // Philos. Trans. Roy. Soc. London A. 1921. Vol. 221, N 587. P. 220.
9. *Бакиев М.Х., Томашевская И.С., Воларович М.П.* и др. Физические свойства горных пород Ташкентского региона при высоких давлениях и температурах. Ташкент: Фан, 1983. 186 с.
10. *Финкель В.М.* Физические основы торможения разрушения. М.: Metallurgia, 1977. 359 с.
11. *Ружич В.В.* Разломные узлы, их распределение и роль в процессах деструкции земной коры Байкальской рифтовой зоны// Эксперимент и моделирование в геологических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1984. С. 88–104.
12. *Yerlee J., Mjachkin V., Summers R., Voevoda O.* Structures developed in fault gouge during stable sliding and stick-slip // Tectonophysics. 1978. Vol. 44. P. 161–171.
13. Гоби-Алтайское землетрясение. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 391 с.
14. Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии. М.: Наука, 1985. 224 с.
15. *Nur A.* Dilatancy, pore fluid and premonitory variations of t_s/t_p travel times // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1972. Vol. 62. P. 1217.
16. *Anderson D.L., Whitcomb J.H.* The dilatancy diffusion model of earthquake prediction// Proc. Conf. Tectonic Problems San-Andreas Fault System. Stanford: Univ. Publ., 1973. Vol. 13. P. 417–426.
17. *Лебедев Т.С.* Изменение электрических свойств некоторых пород в условиях высоких давлений (до 5,6 ГПа) и температур (до 1200°С)// Геофиз. журн. 1985. Т. 7, № 5. С. 25–34.
18. *Ребиндер П.А.* Поверхностные явления в дисперсных системах: Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. 381 с.
19. *Перцев Н.В., Коган Б.С.* Физико-химическая геомеханика// Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем. Киев: Наук. думка, 1981. Вып. 13. С. 53–64.
20. *Ружич В.В.* О длительности процессов залечивания разрывов в очагах коровых землетрясений// Геолого-геофизические методы исследований в сейсмоопасных зонах. Фрунзе: Илим, 1981. С. 78–81.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

I. ВОПРОСЫ ТЕОРИИ СЕЙСМИЧНОСТИ

<i>Садовский М.А.</i> Автомодельность сейсмических процессов	6
<i>Владимиров В.И.</i> Основы физики разрушения твердых тел	12
<i>Петров В.А.</i> Статистическая кинетика энерговыделения в разрушаемой неоднородной иерархической системе	27
<i>Мухамедиев Ш.А., Никитин Л.В., Рыжак Е.И.</i> Модели разрушения горных пород со сложными реологическими свойствами	35
<i>Пономарев В.С.</i> Структуры самопроизвольного разрушения в горных породах	46

II. ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

<i>Соболев Г.А.</i> Исследование разрушения барьеров применительно к проблеме прогноза землетрясений	58
<i>Куксенко В.С.</i> Физические причины подобия в выделении упругой энергии при разрушении горных пород на различных масштабных уровнях	68
<i>Мансуров В.А.</i> Направленность лабораторных работ для прогнозирования горных ударов	73

III. ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

<i>Кнауф В.И., Юдахин Ф.Н., Ильясов Б.И.</i> Изучение физических процессов в зонах возникновения землетрясений Тянь-Шаня и выявление наиболее информативных предвестников землетрясений	82
<i>Зубков С.И., Алимова В.А.</i> О временах возникновения и размерах областей проявления гидродинамических предвестников землетрясений	98
<i>Векслер Ю.А.</i> Инициирование газодинамических явлений и их сейсмоакустический контроль	106
<i>Ружич В.В., Хилько С.Д.</i> Анализ моделей очагов землетрясений с геологических позиций	113

Садовский М.А. Автомодельность сейсмических процессов// Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987.

Автомодельность геодинамических процессов, подтверждаемая существованием иерархической последовательности преимущественных размеров отдельностей, образующих систему горной породы, позволяет установить простые зависимости, связывающие сейсмическую энергию, объем очага и характерные времена сейсмического процесса. В работе показано, что такие зависимости, найденные из опытных данных о землетрясениях, происходивших в произвольных регионах Земли, могут быть использованы для количественного решения некоторых задач сейсмологии.

Сделана попытка определения полной энергии естественных землетрясений путем их сопоставления с взрывными землетрясениями равных сейсмических энергий. Приводимые данные показывают, что сейсмический КПД изменяется от долей процента для слабых до процентов для сильных землетрясений.

Ил. 2, библиогр. 7 назв.

УДК 539.4

Владимиров В.И. Основы физики разрушения твердых тел// Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987.

Дан обзор современного физического подхода к кинетике процесса разрушения: роль заторможенной деформации и ее носителей, дислокаций и дисклинаций, кооперативные эффекты в системах дефектов, пластические неустойчивости, зарождение микротрещин. Изложены основы теории развития очага разрушения как переходной стадии от микроскопической к макроскопической стадии процесса. Обсуждаются особенности процесса разрушения в горных породах, их структура, механизмы пластической неустойчивости, особенности напряженного состояния и механизмов нагружения.

Ил. 10. Библиогр. 5 назв.

УДК 550.343 : 539.4

Петров В.А. Статистическая кинетика энергывыделения в разрушаемой неоднородной иерархической системе// Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987.

Построена модель разрушения сильно неоднородной иерархической многогранговой системы, позволяющая оценить вероятность выделения в ней энергии заданной величины в данном интервале времени на основе регистрации большого числа событий меньшего энергетического класса.

Ил. 3. Библиогр. 12 назв.

УДК 622.835

Мухамедиев Ш.А., Никитин Л.В., Рыжак Е.И. Модели разрушения горных пород со сложными реологическими свойствами// Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987.

На основе феноменологического подхода уточняются понятия схемы, теории и критерия разрушения. Исследуются модели континуального разрушения, хрупкого разрушения упругопластических и вязкоупругих горных пород, локализации деформаций в горных породах.

Ил. 3. Библиогр. 24 назв.

УДК 539.21 + 550.36 + 620.18

Пономарев В.С. Структуры самопроизвольного разрушения в горных породах// Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987.

При изменении термодинамического состояния физического тела изменяется определенным образом и его структура. Несоответствие структуры и состояния выражается в упругой деформации структурных связей твердого тела – в появлении структурных напряжений. Для горных пород *in situ* характерно сильно неравновесное состояние, вследствие чего они должны рассматриваться как метастабильные, энергонасыщенные среды. С течением времени такие среды самопроизвольно стремятся перейти к более устойчивому состоянию. Развитие процессов структурной релаксации ведет к образованию структур самопроизвольного разрушения.

Библиогр. 37 назв.

УДК 550.343.6

С о б о л е в Г.А. Исследование разрушения барьеров применительно к проблеме прогноза землетрясений// Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987.

На простой модели сейсмической брешы изучался комплекс физических параметров с целью прогнозирования стадий образования магистрального разрыва сдвигового типа. Выявлена причина формирования мозаичного распределения предвестников. Оценена точность прогноза магистрального разрыва.

Ил. 8. Библиогр. 6 назв.

УДК 550.45.013.24

К у к с е н к о В.С. Физические причины подобия в выделении упругой энергии при разрушении горных пород на различных масштабных уровнях// Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987.

Процесс выделения упругой энергии при деформировании горных пород проанализирован для различных масштабных уровней. Выделены основные физические причины, определяющие закономерности выделения упругой энергии на всех масштабных уровнях разрушения. Получена количественная связь между геометрическими, энергетическими и временными параметрами очага разрушения.

Ил. 6. Библиогр. 10 назв.

УДК 622.837/839

М а н с у р о в В.А. Направленность лабораторных работ для прогнозирования горных ударов// Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987.

Исследовано изменение прочности и динамических параметров акустической эмиссии для образцов горных пород разного размера. Показано наличие масштабного эффекта, выражающееся в изменении локализации разрушения. Выявленные закономерности используются для разработки методик определения удароопасности горных массивов.

Табл. 1. Ил. 6. Библиогр. 7 назв.

УДК 550.348 + 550.346.6 + 550.433

К н а у ф В.И., Ю д а х и н Ф.Н., И л ь я с о в Б.И. Изучение физических процессов в зонах возникновения землетрясений Тянь-Шаня и выявление наиболее информативных предвестников землетрясений// Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987.

При изучении физических процессов в очагах землетрясений определялись их механизмы, характер излучения сейсмической энергии, проводилось сейсмическое просвечивание и измерение электросопротивлений горных пород в пределах Чуйско-Иссык-Кульского прогностического полигона. Установлено, что наиболее информативными предвестниками могут

считаться появление областей сейсмического затишья, группирование по площади очагов с заниженными отношениями V_p/V_s , вариации амплитуд и времен пробега продольных и поперечных волн при сейсмическом просвечивании.

Ил. 8. Библиогр. 6 назв.

УДК 550.343.6

Зубков С.И., Алимova В.А. О временах возникновения и размерах областей проявления гидрогеодинамических предвестников землетрясений// Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987.

Проведен анализ предвестников по уровню подземных вод в различных сейсмоактивных регионах земного шара. Установлено существование долго-, средне- и краткосрочных предвестников, отображающих три стадии процесса подготовки землетрясения. Эпицентральные времена проявления долго- и среднесрочных предвестников находятся в тесной корреляционной связи с энергией землетрясений. Предвестники по уровню подземных вод проявляются внутри пространственно-временной области существования деформационных предвестников.

Ил. 4. Библиогр. 15 назв.

УДК 622.831.322

Векслер Ю.А. Иницирование газодинамических явлений и их сейсмоакустический контроль// Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987.

Обоснован механизм иницирования динамических явлений в подготовительных выработках шахт на основе решения пространственной задачи теории упругости и плоской задачи теории ползучести и разрушения горных пород. Показана существенная роль аномалий геологического строения и первоначального напряженного состояния массива. Разработан сейсмоакустический экспресс-метод контроля выбороопасности, заключающийся в записи и анализе акустического последействия пласта. Приведены положительные результаты промышленных испытаний метода на шахтах Карагандинского бассейна. На основе проведенных исследований установлен ряд предвестников выбороопасности.

Табл. 2. Ил. 2. Библиогр. 10 назв.

УДК 551.25 : 550.34

Ружич В.В., Хилько С.Д. Анализ моделей очагов землетрясений с геологических позиций// Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987.

Проведено сопоставление известных моделей очагов землетрясений ЛНТ, ДД, "stick-slip" с геологическими условиями очаговых зон Восточной Сибири и МНР, которое свидетельствует об узкой "специализации" моделей, так как они основаны на идеализации какого-то одного реального явления деструкции земной коры. Предлагается иерархически подразделять модели очагов землетрясений на управляющие (высший ранг), региональные и локальные.

Ил. 3. Библиогр. 20 назв.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ
ГОРНЫХ ПОРОД
ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ**

*Утверждено к печати
Межведомственным советом
по сейсмологии
и сейсмостойкому строительству
при Президиуме АН СССР*

Редактор издательства *Ю.А. Юдина*
Художник *М.Р. Ибрагимов*
Художественный редактор *Н.Н. Власик*
Технический редактор *Н.М. Бурова*
Корректор *Е.А. Мишина*

Набор выполнен в издательстве
на наборно-печатающих автоматах

ИБ № 35278

Подписано к печати 07.07.87. Т — 05746
Формат 60 × 90 1/16. Бумага офсетная № 1
Гарнитура Пресс-Роман. Печать офсетная
Усл. печ.л. 8,0 + 0,1 вкл. Усл. кр.-отт. 8,4. Уч.-изд.л. 9,3
Тираж 750 экз. Тип. зак. 1605. Цена 1 р. 80 к.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство "Наука"
117864 ГСП-7, Москва В-485,
Профсоюзная ул., д. 90

Ордена Трудового Красного Знамени
1-я типография издательства "Наука"
199034, Ленинград В-34, 9-я линия, 12

ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"

готовятся к изданию книги:

Исследования по сейсмической опасности. Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 29. 15 л. 2 р. 60 к.

В очередном выпуске освещены различные аспекты общей проблемы оценки сейсмической опасности, в частности, использование геологических методов для выявления сейсмической опасности в разных регионах. Большая часть статей посвящена анализу параметров сейсмических воздействий. Рассматриваются макроскопические эффекты землетрясений.

Для специалистов в области сейсмологии в инженерной сейсмологии, сейсмогеологии, механики грунтов.

Проблемы рационального использования геологической среды. 20 л. 4 р.

В книге рассмотрены инженерно-геологические, гидрогеологические и геокриологические проблемы рационального использования геологической среды районов интенсивного техногенного воздействия. Описаны результаты изучения изменений геологической среды при различных видах техногенных воздействий.

Для инженеров-геологов, геологов, гидрогеологов, геокриологов, геоморфологов.

Заказы просим направлять по одному из перечисленных адресов магазинов "Книга-почтой" "Академкнига":

Магазины "Книга-почтой":

252030 Киев, ул. Пирогова, 4; 197345 Ленинград, Петрозаводская, 7; 117192 Москва, Мичуринский пр-т, 12;

Магазины "Академкнига" с указанием отделов "Книга-почтой":

480091 Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97 /"Книга-почтой"/; 370005 Баку, ул. Коммунистическая, 51 /"Книга-почтой"/; 232600 Вильнюс, ул. Университето, 4; 690088 Владивосток, Океанский пр-т, 140 /"Книга-почтой"/; 320093 Днепрпетровск, пр-т Гагарина, 24 /"Книга-почтой"/; 734001 Душанбе, пр-т Ленина, 95 /"Книга-почтой"/; 375002 Ереван, ул. Тумаяна, 31; 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 289 /"Книга-почтой"/; 420043 Казань, ул. Достоевского, 53 /"Книга-почтой"/; 252030 Киев, ул. Ленина, 42; 252142 Киев, пр-т Вернадского, 79; 252030 Киев, ул. Пирогова, 2; 277012 Кишинев, пр-т Ленина, 148 /"Книга-почтой"/; 343900 Краматорск, Донецкой обл., ул. Марата, 1 /"Книга-почтой"/; 660049 Красноярск, пр-т Мира, 84; 443002 Куйбышев, пр-т Ленина, 2 /"Книга-почтой"/; 191104 Ленинград, Литейный пр-т, 57; 199164 Ленинград, Таможенный пер., 2; 196034 Ленинград, В/О, 9 линия, 16; 220012 Минск, Ленинский пр-т, 72 /"Книга-почтой"/; 103009 Москва, ул. Горького, 19-а; 117312 Москва, ул. Вавилова, 55/7; 630076 Новосибирск, Красный пр-т, 51; 630090 Новосибирск, Морской пр-т, 22 /"Книга-почтой"/; 142284 Протвино, Московской обл., ул. Победы, 8; 142292 Пущино, Московской обл., МР, "В", 1; 620161 Свердловск, ул. Мамина-Сибиряка, 137 /"Книга-почтой"/; 700000 Ташкент, ул. Ю. Фучика, 1; 700029 Ташкент, ул. Ленина, 73; 700070 Ташкент, ул. Ш. Руставели, 43; 700185 Ташкент, ул. Дружбы народов, 6 /"Книга-почтой"/; 634050 Томск, наб. реки Ушайки, 18; 634050 Томск, Академический пр-т, 5; 450059 Уфа, ул. Р. Зорге, 10 /"Книга-почтой"/; 450025 Уфа, ул. Коммунистическая, 49; 720000 Фрунзе, бульвар Дзержинского, 42 /"Книга-почтой"/; 310078 Харьков, ул. Чернышевского, 87 /"Книга-почтой"/

1 р. 80 к.

18837