

4. Реуженко А. Ф., Стажевский С. Б., Шемякин Е. И. О механизме деформирования сыпучего материала при больших сдвигах // ФТПРПИ. 1984. N 3. С. 130—133.
5. Гутерман В. Г. Разломы и структуры, образующиеся при погружении участка хрупкой толщи (результаты моделирования) // Геофиз. журн. 1984. Вып. 6. N 1. С. 24—32.
6. Merger M. M., Freund R. Equal spacing for Strick-slip faults // Geophys. J. Roy. Ast. Soc. 1976. Vol. 4, N 4.
7. Камашинский В. П., Виноградов Г. А., Рухайло Н. В. Исследование линий скольжения в сыпучих средах // Порошковая металлургия. 1973. N 11. С. 15—19.
8. Роско К. Значение деформаций в механике грунтов // Механика. М.: Мир, 1971. Т. 3. С. 91—145.

УДК 550.34

С. И. Шерман, С. А. Борняков, К. Ж. Семинский
**СТАДИИ РАЗВИТИЯ СДВИГОВОЙ ЗОНЫ,
 СТРУКТУРА ОЧАГОВ И СЕЙСМИЧНОСТЬ**
 (по результатам моделирования)

Крупные сдвиговые зоны литосферы характеризуются высокой сейсмической активностью. Сильные землетрясения, контролируемые сдвигами большой протяженности, происходят через одинаковые (иногда неравные) интервалы времени и "хаотически" распределяются в пределах области динамического влияния сдвига. Протяженность временных интервалов приближенно может быть оценена по графику повторяемости землетрясений. Пространственная же миграция очагов практически не поддается эмпирическому анализу.

Существенный вклад в физическое объяснение явления может внести моделирование. Проведенные авторами эксперименты по динамике развития сдвиговых зон позволили выявить специфику развития сдвигов при нагружении с постоянной скоростью. Результаты моделирования дают ключ к объяснению временной периодичности и пространственной миграции очагов в пределах единой сдвиговой зоны. Рассмотрим основные особенности структурообразования в моделях, деформируемых в условиях сдвига.

Экспериментальные работы проводились по методике, опубликованной в предыдущих исследованиях [7, 8]. Согласно существующей теории подбора, моделирование осуществлялось на упругопластичном материале, что позволило в лабораторных условиях воспроизвести процесс формирования крупного дисъюнктива (длиной 300—1000 км) в континентальной литосфере. Сущность экспериментов заключалась в деформировании модели из глинистой пасты, расположенной на двух штампах, один из которых сдвигался относительно другого в горизонтальном направлении. В ходе каждого эксперимента поверхность модели фотографировалась через одинаковые промежутки времени. После каждой съемки структурный рисунок сдвиговой зоны уничтожался путем легкого заглаживания поверхности модели, что позволило фиксировать на фотографиях и рассматривать в дальнейшем только активные разрывные нарушения. Как показали специ-

6. Зак. 1773

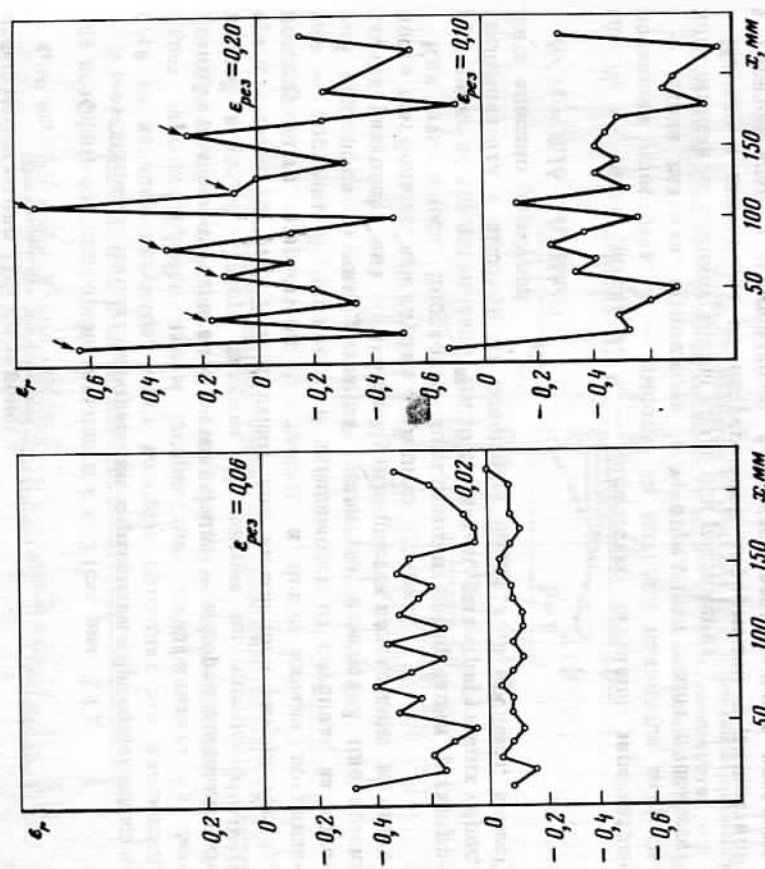


Рис. 8. Распределение деформации вдоль оси растяжения при различных деформациях подложки (стрелками отмечены области развития сбросов)

подвижек на плоскостях сбросов; большее значение подвижки соответствует, видимо, большей длине самой плоскости сброса.

В заключение подчеркнем результаты, объяснение которых должна включать развитая теория деформирования сыпучих сред: 1) запуск развития плоскостей локализации сдвиговой деформации начинается с горизонтальной дискрегизацией деформации вертикального расщепления; 2) постоянство скорости роста плоскостей локализации в исследованных диапазонах изменения скорости деформирования, малая величина этой скорости (3 мм/с) по сравнению со скоростями упругих волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ромашов А. Н., Еременов В. Ф., Кондратьев В. Н. и др. Двухслойная модель с учетом силы тяжести // ФТПРПИ. 1985. N 5. С. 16—22.
2. Николаевский В. Н. Обзор: земная кора, дилатанция и землетрясения // Механика очага землетрясения. М.: Мир, 1982. С. 133—215.
3. Ромашов А. Н., Кондратьев В. Н., Кулюкин А. М., Дыганков С. С. Моделирование структур разрушения в верхних слоях земли // Вестн. МГУ. Сер. География. 1985. N 4. С. 81—88.

80

81

альные исследования, описанная операция не оказывает существенного влияния на характер структурообразования в сдвиговой зоне.

Применение изложенной выше методики позволило изучить динамику структурообразования в упругопластичной модели в условиях деформации простого сдвига. Анализ эволюции структуры на качественном уровне дает возможность выделить в процессе формирования сдвиговой зоны три основные стадии. На первой (пликативной) стадии в пределах сдвиговой зоны наблюдаются только пластические деформации (образуются складки, осевые плоскости которых располагаются под углом 45° к оси модели), т.е. сплошность модели не нарушается. В течение второй (дизъюнктивной) стадии в зоне сдвига закладываются и эволюционируют разрывные нарушения, предшествующие формированию единого магистрального шва — собственно сместителя сдвига. Особенностью третьей стадии (полного разрушения) является развитие опережающих уже существующий магистральный разрыв структур, образующихся в результате трения блоков материала по неровной плоскости сместителя.

В наших исследованиях рассматривалась главным образом дизъюнктивная стадия, как наиболее слабо изученная и занимающая большую часть времени развития крупных сдвиговых зон. Эволюция разрывов на поверхности модели в течение изучаемой стадии структурообразования идет по пути слияния образовавшегося в начале эксперимента множества мелких разрывов в крупные, вплоть до формирования единого магистрального шва на заключительных этапах деформирования (полное разрушение модели).

Для выявления характерных объективно существующих этапов развития сдвиговой зоны в течение дизъюнктивной стадии структурообразования применялась количественная оценка состояния ее внутреннего строения (инфраструктуры) в различные моменты времени. Вариации таких характеристик инфраструктуры сдвиговой зоны, как ее ширина, количество разрывных структур, длина разрыва максимальной протяженности и т.д., подтвердили описанные выше особенности разрывообразования в ходе деформирования: увеличение длин дислокаций во времени, уменьшение ширины зоны влияния и сокращение количества активных разрывов.

Наряду с этим по результатам проведенных экспериментов был выявлен ряд отклонений от описанных общих тенденций временных изменений параметров внутренней структуры. Отклонения носят закономерный характер и для всех количественных параметров проявляются в одни и те же моменты времени. Это позволило выделить в течение дизъюнктивной стадии развития сдвиговой зоны объективно существующие этапы формирования структуры.

Действительно, в течение сравнительно продолжительного отрезка времени (этапа разрывообразования) эволюция структуры происходит постепенно с увеличением длин разрывов (рис. 1), уменьшением их числа и сужением зоны влияния. Затем за сравнительно короткое время (структурная перестройка) инфраструктура претерпевает качественные изменения. В результате разрушения перегородок между крупными разрывами резко увеличивается их длина, сокра-

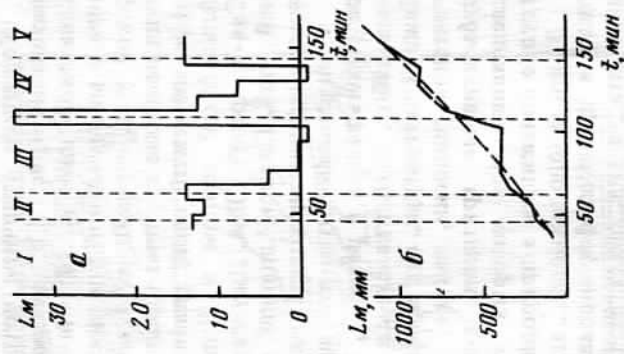


Рис. 1. Принципиальный график изменения в ходе деформирования длины максимального разрыва в сдвиговой зоне (L) и ее производной (\dot{L})
I—V — этапы структурообразования

щается число активных разрывов за счет "отмирания" мелких дислокаций и уменьшается ширина сдвиговой зоны. Далее процесс снова протекает относительно спокойно на следующем этапе разрывообразования, но уже при новом состоянии материала в зоне влияния, которое обусловлено изменением в течение структурной перестройки взаимоотношений между составляющими ее разрывами.

Проведение экспериментов при различных условиях нагружения позволило установить, что количество этапов разрывообразования на дизъюнктивной стадии развития сдвиговой зоны в общем случае возрастает при увеличении толщины разрываемого слоя (масштабный фактор) и уменьшается при увеличении скорости деформирования (реологический фактор), но для рассматриваемых условий нагружения (соответствующих режиму крупного континентального разрывообразования), как правило, не превышает пяти.

Следует отметить, что не все структурные перестройки, разделяющие этапы разрывообразования, проявляются одинаково отчетливо при визуальной оценке состояния инфраструктуры в различные временные моменты ее формирования. Так, из всех перестроек лишь одна (главная) может быть достаточно надежно определена визуально, что важно для применения полученных экспериментальных путем закономерностей в природных ситуациях.

Полученные материалы, касающиеся проявления на поверхности деформируемого объема главной структурной перестройки, послужили основой для разделения промежутка времени, отведенного ранее под дизъюнктивную стадию, на два объективно существующих временных отрезка, которые были названы ранней и поздней дизъюнктивными стадиями. Исследования показали, что для ранних стадий (рис. 2, а) характерно существование системы разноранговых разрывов, располагающихся под острым углом к простиранию сдвиговой зоны, ширина которой незначительно варьирует в продольном направлении. Отдельные разрывные структуры, составляющие зону влияния, не проницают на всю толщину деформируемого слоя и имеют амплитуду сдвига значительно меньшую, чем общее смещение по разломной зоне. Природными аналогами сдвиговых зон, находящихся на ранней дизъюнктивной стадии развития, могут служить северо-восточный фланг Байкальской рифтовой зоны (рис. 2), Дербек-Нельгехинская и Момская сдвиговые зоны в Якутии, китайская система разломов Тянь-Лу и др.

Коренным отличием поздних дизъюнктивных стадий разрывообразования (рис. 2, б) являются ярко выраженная дифференциация сдвиговой зоны на участки с сегментами будущего магистрального шва и минимальной плотности дислокаций и широкие области высокой концентрации разрывов. Амплитуда сдвига в центральных частях наиболее крупных единичных разрывов, полностью рассекающих деформируемый слой, равна общему смещению по разломной зоне. Альпийский разлом в Новой Зеландии (рис. 2), сдвиговая зона Сан-Андреас в США, Джунгарский и Таласо-Ферганский сдвиги в Средней Азии, Сихотэ-Алинский на Дальнем Востоке, согласно приведенному описанию, находятся на поздней дизъюнктивной стадии развития. Следует отметить, что проблема стадийности развития сдвигов разрабатывалась и ранее [1, 2, 4, 5]. Однако выводы из многочисленных работ, опубликованных по данному вопросу в советской и зарубежной литературе, как правило, не могут быть использованы в практической геологии, так как либо в основе выделения стадий лежат субъективные критерии, либо результаты экспериментальных исследований, для которых обычно отсутствует первый недостаток, трудно применимы в природных условиях.

В противоположность этому проведенное исследование позволило в процессе формирования крупных континентальных сдвигов выделить четыре объективно существующие в природных условиях стадии развития, для которых характерны специфические, определяемые визуально особенности внутреннего строения разломной зоны. Кроме того, в рамках второй и третьей стадий в ходе экспериментальных работ при помощи количественной оценки состояния инфраструктуры удалось выявить ряд этапов разрывообразования (или подстадий), также существующих объективно, но не имеющих столь ярких отличий друг от друга, как это характерно для главных стадий. Поиски отличительных особенностей инфраструктуры сдвиговых зон, развивающихся в течение того или иного этапа, могут стать темой дальнейшего, более углубленного исследования.

Переходя к особенностям протекания сейсмического процесса, следует отметить, что разломы, находящиеся на пликативной стадии развития, представляют собой главным образом асейсмичные области, хотя в их пределах вероятны отдельные крупные события с очагами глубокого заложения. В отличие от них сдвигам ранних дизъюнктивных стадий развития соответствует повышенная сейсмическая активность с рассеянным характером распределения землетрясений в пределах всей зоны (см. рис. 2, а—II).

Сдвиговые зоны, находящиеся на поздних дизъюнктивных стадиях развития, характеризуются ярко выраженной дифференциацией

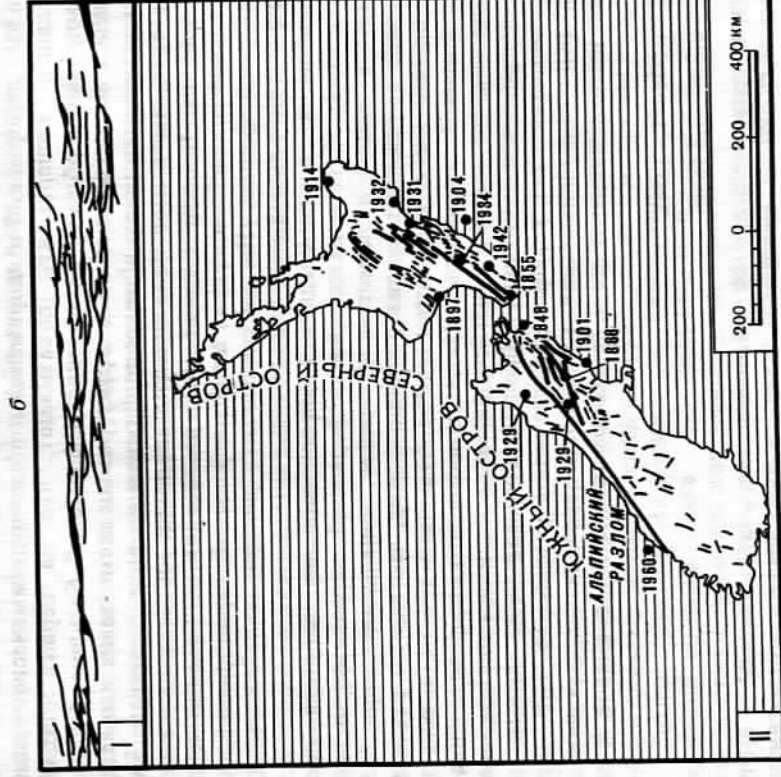
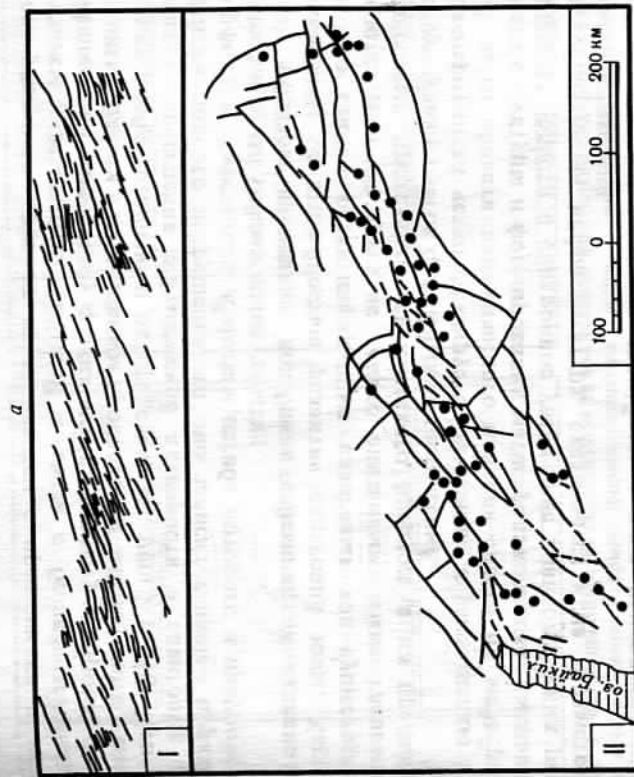


Рис. 2. Структурные схемы разрывов в пределах разломных зон, находящихся на ранней (а) и поздней (б) дизъюнктивных стадиях развития, для сдвигов, сформировавшихся в упруго-пластичной модели (I) или имеющих место в природных условиях (II)

Кружки на схемах — местоположения крупных ($M > 4$) землетрясений (б) и палеосейсмодислокаций (а). Данные по северо-восточному флангу Байкальской разломной зоны взяты из работы [3], по Альпийскому разлому в Новой Зеландии — из [9]

на равноудаленные друг от друга участки с практически полным отсутствием сейсмических событий в связи с беспрепятственным скольжением по единичному в этих местах разрыву и хорошо локализованные области с интенсивным проявлением сейсмичности в связи со структурообразованием в их пределах (см. рис. 2, б—II). Что же касается распределения сейсмической активности в сдвиговых зонах стадий полного разрушения, то оно зависит главным образом от морфологии сместителя, к местам изгиба которого и приурочены наиболее значимые сейсмические события.

Таким образом временные колебания сейсмической активности взаимосвязаны со стадийностью развития сдвиговой зоны. Характерно, что стадии развития крупных сдвиговых зон существенно отличаются друг от друга не только описанными выше главными особенностями протекания сейсмического процесса в их пределах, но и структурами очагов отдельных землетрясений.

В экспериментах четко фиксируется тенденция к уменьшению активной части структуры и формирования магистрального шва. Уменьшение ширины области и синхронное увеличение длин отдельных разрывов, образующих инфраструктуру, сказывается и на параметрах очагов землетрясений.

Очаг землетрясения — это своеобразная зона накопления максимальных деформаций и напряжений в области динамического влияния сдвига. Эксперименты показывают, что на первых стадиях деформирования области накопления деформаций больше. Однако они насыщены низкоранговыми структурными элементами, что ведет к одновременному росту и микроподвижкам по всем трещинам. Короткие трещины имеют относительно широкую область напряжений через своего влияния. Последнее приводит к реализации напряжений через значительное количество мелких очагов небольшой шарообразной или изометричной формы. На местности это рассеянная сейсмичность с событиями небольшой магнитуды.

На заключительных стадиях сдвигообразования ситуация противоположна: области накопления деформаций, неравномерно концентрируясь вдоль и вкрест простирания зоны сдвига, приобретают резко выраженную эллипсоидную форму, что ведет к реализации незначительного количества очагов большого объема и, естественно, большой магнитуды. На местности это сосредоточенная сейсмичность, тяготеющая к магистральному шву или к местам вспарывания перемычек между региональными и генеральными разломами. Для сопоставления результатов вспомним разработку Н.В. Шеллина [6], устанавливающие зависимость протяженности очага в горизонтальном направлении l_x и его вертикальных размеров l_z от магнитуды M :

$$\lg l_x = 0,5M - 1,8 \text{ (км)},$$

$$\lg l_z = 0,3M - 0,8 \text{ (км)}.$$

Исходя из уравнений, при $M = 5$ отношение $l_x/l_z = 1$, при $M = 8$ отношение $l_x/l_z = 4$. Нетрудно заметить, что увеличение магнитуды

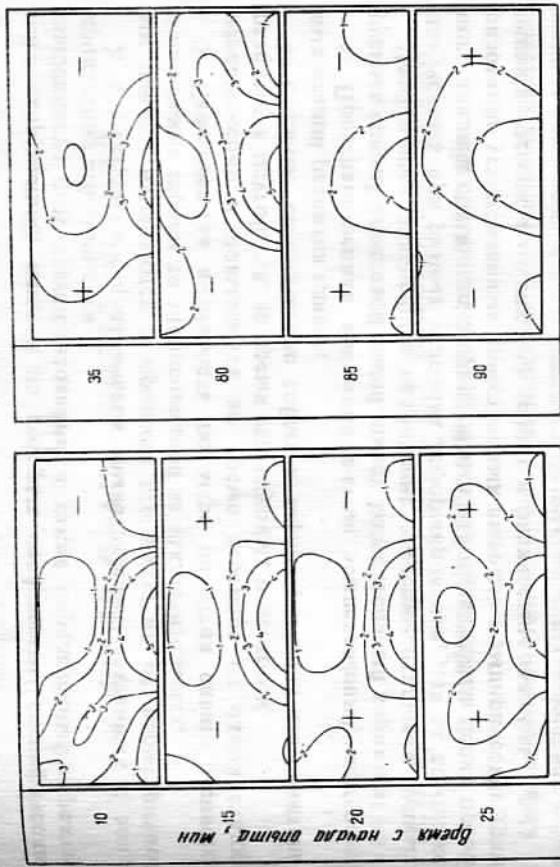


Рис. 3. Миграция областей повышенной интенсивности касательных напряжений (усл. ед.) из крыла сдвига в крыло формирующегося сдвига в течение одного эксперимента (по: [8])

Значками + и - обозначены крылья, обладающие в данный момент соответственно большей и меньшей активностью

ды землетрясения ведет в уравнениях к увеличению эллипсоидности очага землетрясения. В реальной обстановке, как показывают эксперименты, формулы подтверждаются на качественном уровне, т.е. взаимосвязь явлений та же, но причинность другая: увеличение эллипсоидности и размеров зоны деформаций во время развития сдвиговой зоны ведет к увеличению магнитуды землетрясений. Для длительно развивающихся сдвигов, находящихся на поздней дизъюнктивной стадии развития, характерны сильные, но редкие сейсмические события, тяготеющие к осевой зоне сдвига.

Пространственная миграция очагов связана с последовательностью слияния и ростом дислокаций в различных частях области динамического влияния сдвига. Образование протяженных дислокаций происходит прежде всего в тех местах модели, где повышаются напряжения. Экспериментами В.Ю. Буддо [8] установлена миграция поля деформаций вкост и вдоль простирания формирующегося сдвига (рис. 3). Миграция при постоянной скорости деформирования носит колебательный характер и дает качественное объяснение наблюдаемой в природе картины временной и пространственной приуроченности сильных землетрясений к структуре сдвиговой зоны.

Таким образом, эксперименты, направленные на изучение физической природы очага землетрясения, генерируемого зоной сдвига, дают основание для следующих утверждений.

1. В развитии крупных сдвиговых зон выделяются четыре крупные стадии (пликативная, ранняя и поздняя дизъюнктивные, пол-

ного разрушения), каждой из которых свойственны специфические особенности структурообразования, а также определенный характер проявления сейсмичности.

2. Структура и форма очагов землетрясений, связанных с зонами сдвига, изменяются в процессе его развития от изометричной в начальные стадии до эллипсоидной на заключительных.

3. Сейсмическая активность по мере развития сдвига меняется неравномерно и повышается во время перехода от одной стадии развития к другой, т.е. во время структурных перестроек.

4. Сильные сейсмические события характерны для заключительных стадий развития сдвига.

5. Пространственная миграция очагов землетрясений, контролируемых единой сдвиговой зоной, имеет колебательный характер.

Необходимо дальнейшее накопление экспериментальных данных, полученных при разных условиях деформирования, для их комплексного анализа совместно с природными наблюдениями в целях преобразования устоявшихся качественных выводов в эмпирические уравнения регрессии, а от них — к теории и физическим законам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронов П.С. Принципы сдвиговой тектоники // Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых. Вып. 1. Л., 1988. С. 8—22.
2. Гвоздский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
3. Карта неотектоники региона Байкало-Амурской магистральной. Масштаб 1:3000000 / Отв. ред. Н.А. Логачев. Иркутск, 1983.
4. Соболев Г.А., Кольцов А.В. Исследование процесса микротрещинообразования в образцах высокопластичной горной породы // Физические процессы в очагах землетрясений. М.: Наука, 1980. С. 99—103.
5. Суворов А.И. К вопросу о классификации крупных разломов геосинклинальных областей (на примере Казахстана и Средней Азии) // Докл. АН СССР. 1962. Т. 147, N 1. С. 191—194.
6. Шибалин Н.В. Оценка размеров и положения очага Ташкентского землетрясения по макросейсмическим и инструментальным данным // Ташкентское землетрясение. Ташкент: ФАН, 1971. С. 68—79.
7. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
8. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. и др. Моделирование механизма образования сейсмоактивных разломов в упруго-вязкой среде // Геология и геофизика. 1985. N 10. С. 9—18.
9. Lensen G.J. Active faults and major earthquakes in New Zealand // New Zealand J. Geol. Geophys. 1965. Vol. 8, N 6. P. 900—901.

III

ФИЗИКА ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

УДК 550.34

К.И. Кузнецова, Л.С. Шумилина, Н.Х. Багманова, Н.А. Козырева

О ПРИРОДЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗАТИШИЙ

Сейсмическое затишье — одно из наиболее значительных явлений, часто предшествующее сильному землетрясению и предупреждающее о его приближении. Оно хорошо известно и изучалось сейсмологами [1]. Вместе с тем это один из наиболее загадочных феноменов сейсмичности. Если форшоки находят свое естественное объяснение как последний этап подготовки землетрясений, то для понимания сейсмического затишья требуются особые предположения.

Среди этих предположений центральное место занимает гипотеза К. Аки [2] о неровностях (asperity) на поверхности большого разлома, по которому постоянно происходят перемещения. Если перемещения прекращаются вследствие зацепления за неровности, то непосредственно вблизи них должно наступить затишье, а напряжения накапливаются вплоть до разрушения неровности с соответствующим динамическим эффектом. В этой схеме подразумевается, что сейсмичность генерируется на самой поверхности разлома. Но в окружающей разлом среде с прекращением скольжения по ней напряжения (и сейсмичность) должны были бы только возрасти.

В настоящей работе предлагается иная концепция сейсмических затиший перед сильным землетрясением. Она не альтернативна изложенной — в природе возможны различные случаи.

В основу предлагаемой концепции положена мысль о том, что на процесс реализации трещин (и связанных с ними землетрясений) влияет напряженное состояние среды. Действительно, как известно из материаловедения, чем выше всестороннее сжатие и (или) чем ниже дифференциальное (касательное) напряжение, тем более пластично ведет себя материал [3]. В лабораторных условиях с увеличением всестороннего давления наблюдается увеличение числа и уменьшение размера трещин [4, 5] и соответствующих им упругих импульсов [6]. Это наблюдалось и при некоторых сейсмологических исследованиях [7]. Внутренний механизм этого эффекта связан с большей или меньшей свободой перемещения по трещине [8], что обуславливает большую или меньшую вероятность спонтанного объединения