

МОДЕЛЬ ЛАВИННО-НЕУСТОЙЧИВОГО ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ – ЛНТ

© 2019 г. Г. А. Соболев

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

E-mail: sobolev@ifz.ru

Поступила в редакцию 07.05.2018 г.

Принята в печать 15.08.2018 г.

Основные идеи модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) впервые были представлены в докладе сотрудников Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ) РАН на Ассамблее Международного союза геодезии и геофизики в Москве в 1971 г. и опубликованы в специальном выпуске журнала “Tectonophysics” в 1972 г. В последующем были выполнены многочисленные лабораторные и натурные исследования, подтверждающие и развивающие модель ЛНТ. Модель исходит из фундаментальных положений физики длительной прочности. Она не зависит от масштаба явления и может применяться к описанию подготовки разрушения не только в очагах землетрясений разных энергий, но и к динамическим явлениям в шахтах и разрушению инженерных сооружений при длительно действующих нагрузках. С помощью модели объясняется образование широко распространенных эшелонированных систем разрывов. Процесс подготовки землетрясения развивается постепенно, что предполагает возможность прогноза времени будущего сейсмического события. Модель обосновывает **саморазвитие** процесса землетрясения.

Ключевые слова: трещина, разрыв, напряжения, деформации, сейсмическая активность, землетрясение

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-333720191166-179>

ВВЕДЕНИЕ

В конце 60-х годов XX века в ряде сейсмоопасных регионов СССР и затем в США были выявлены предвестники землетрясений, имевшие бухтообразную форму. Это требовало теоретического объяснения их механизма. Основные идеи модели ЛНТ впервые были представлены в докладе сотрудников Института физики Земли РАН на Ассамблее Международного союза геодезии и геофизики в Москве в 1971 г. и опубликованы в специальном выпуске журнала “Tectonophysics” [Miachkin et al., 1972]. Приведем здесь выдержку из этой статьи. “On the basis of experience of mechanics of destruction of different materials and laboratory investigations we can consider, that the majority of tectonic earthquakes are the result of developments of fractures (defects) at first slowly, then quickly, in rock masses. The number and dimension of fractures increases with time until **avalanche-type** growth is realized, and at some critical moment their number and dimensions increase to the extent that interaction and connection of fracture begins”. Выделенный

нами жирным шрифтом термин “**avalanche-type**” указывал на процесс лавинообразного разрушения, что и вошло затем в название модели ЛНТ. Далее в упомянутой статье приводились примеры предвестников бухтообразной формы в скоростях сейсмических волн, деформациях поверхности земли и электротеллурического поля, происхождение которых могло бы быть объяснено предлагаемой моделью. Форма предвестников в виде бухты имела принципиальное значение. Обнаружение точки максимума или минимума давало лучшую возможность оценить время до землетрясения по сравнению с экспоненциальным или линейным изменением амплитуды параметра, интерпретируемого как предвестник.

Зарубежные ученые получили представление об идеях модели ЛНТ на той же Ассамблее Международного союза геодезии и геофизики в 1971 г. Общий интерес советских и американских исследователей привел к публикации [Miachkin et al., 1975], где были изложены основные положения модели ЛНТ. Приведем цитату из этой работы. “In 1969 seismologists in USSR reported premonitory changes

in the seismic velocities prior to a series of earthquakes near Garm... Later, electrical resistivity precursors and changes in radon content of wells were also reported prior to several earthquakes... US seismologists learned a great deal more of these developments during the 1971 IUGG Congress in Moscow... There are currently two quite different ways of explaining these and other precursors. One has been put forward by Soviet scientists at the Institute of Physics of the Earth, Moscow, the other by geophysicists in USA... However, because the Russian model (abbreviated IPE) has precedence, is more highly developed, and is poorly understood outside the USSR, we restrict attention here to comparison of it with the US model involving dilatancy and diffusion (abbreviated DD)”.

Основные положения модели ЛНТ

Далее в работе [Miachkin et al., 1975] авторы представили описания моделей ЛНТ и ДД. Приведем положения модели ЛНТ в русском переводе, поскольку к ним мы будем неоднократно возвращаться в настоящей статье.

1. Трещина в статистически гетерогенном материале вызвана увеличением числа и размера трещинообразных дефектов.

2. Дефекты могут развиваться во времени при относительно постоянном напряжении и скорость их образования увеличивается с ростом напряжений.

3. Общая деформация состоит из внутренней упругой деформации и деформации, вызванной совместным смещением поверхностей трещин.

4. Макротрещина (образование главного разрыва) есть результат лавинообразного роста и неустойчивости, которая возникает при достижении определенной плотности трещин.

5. Образование главного разрыва приводит к понижению уровня напряжений в окружающем объеме, в результате чего прекращается рост новых дефектов, и количество активных трещин уменьшается.

6. Процесс трещинообразования не зависит существенно от масштаба.

В целом аналогичные представления о формировании землетрясения были изложены в работе [Мячкин и др., 1975]. Иногда считают, что модель ЛНТ впервые была предложена именно в этой работе. Действительно, там было дано описание модели ЛНТ на русском языке. Но приоритет ИФЗ РАН в данном вопросе надо отсчитывать от 7 августа 1971 г., когда статья [Miachkin et al., 1972] поступила в редакцию

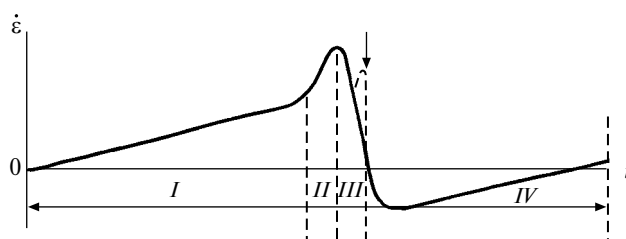


Рис. 1. Схема изменения скорости средней деформации за время сейсмического цикла.

журнала “Tectonophysics”. Главный смысл работы [Мячкин и др., 1975] состоял в обосновании нового направления в сейсмологии под названием «Физика очага землетрясения». Но там к 6-ти вышеперечисленным положениям были сформулированы некоторые дополнения, имеющие отношение к модели ЛНТ. Была приведена схема изменения скорости средней деформации за время сейсмического цикла, которая воспроизводится здесь на рис. 1. На стадии I происходит постепенное накопление микротрещин в условиях медленного роста напряжений. По достижении во всем объеме или его значительной части некоторой средней критической плотности микротрещин наступает необратимая лавинная стадия подготовки данного землетрясения. За счет взаимодействия микротрещин процесс более или менее резко ускоряется по всему объему. Соответственно, резко возрастают скорость неупругой деформации и изменения интегральных физических характеристик среды (стадия II). Приводящий к землетрясению неустойчивый процесс в силу неоднородности среды стягивается в небольшое число узких зон, в каждой из которых формируется несколько относительно больших трещин в близких плоскостях. Интегральная скорость деформации всей зоны уменьшается, так как она определяется главным образом подрастанием трещин сначала в нескольких узких зонах, а затем только в одной из них (стадия III). Лавинообразный процесс трещинообразования может происходить и при снижении уровня макронапряжения.

Некоторые положения модели ЛНТ были обобщены в работе [Соболев, 1993]. Подчеркнуто, что основу модели составляют два явления: взаимодействие полей напряжений трещин и локализация процесса трещинообразования. Теоретически показано, что устойчивость системы трещин падает при уменьшении расстояния между ними [Костров, Фридман, 1975; Петров, 1984]. Например, в случае взаимодействия двух неравных трещин отрыва малая трещина может замедлить свой рост или остановиться, если

она находится над или под плоскостью большой трещины. Напротив, ее рост может ускориться, если она расположена на продолжении большой трещины. Таким образом, при статистически равномерном распределении трещин в среде и постепенном увеличении их числа и размеров вследствие медленно возрастающих нагрузок благоприятно расположенные трещины будут сливаться, образуя трещины большего размера.

В модели ЛНТ существенным моментом является представление об иерархии трещин. Например, если готовится землетрясение магнитуды 7 (длина разрыва $L \approx 20-40$ км), то взаимодействуют трещины с длиной разрыва менее 10 км (магнитуда $\sim 5-6$). Это происходит и при меньших размерах разрывов. Таким образом, рассматриваемая в модели дилатантно-диффузионной (ДД) [Scholz et al., 1973] стадия образования микротрещин, относится к далекому прошлому. В рамках модели ЛНТ при подготовке большого землетрясения она, по сути, не учитывается, хотя ее вклад в изменение интегральных свойств среды не отрицается. Отметим также следующее различие моделей ЛНТ и ДД. В работе [Scholz, 2012] первая названа моделью сухой дилатансии. Это не точно. На самом деле, модель ЛНТ применима и к водонасыщенным средам.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ ЛНТ

Локализация неустойчивой деформации и трещинообразования

Были выполнены эксперименты на моделях из цемента и песчаной фракции (диаметр зерен 1–2 мм) в соотношении 1/3, имевшие размеры $150 \times 75 \times 37.5$ мм [Sobolev et al., 1987; Соболев, Пономарев, 2003]. Две пары стеклянных пластин размером $36 \times 25 \times 1.2$ мм внедрялись в верхний и нижний углы моделей под углом 35° к длинной оси, совпадающей с направлением главной нагрузки (рис. 2а). На примыкающие друг к другу поверхности парных пластин наносилась смазка. Эти пары пластин служили концентраторами напряжений. В результате нагружения возникал макроразрыв сдвигового типа. Его можно видеть на фотографии рис. 2а. Параллельно модели для увеличения жесткости нагружающей системы устанавливались колонны из алюминиевых труб. Эксперименты выполнялись при различных от опыта к опыту, но постоянных в каждом эксперименте скоростях деформации в диапазоне $10^{-6}-10^{-8}$ 1/с.

На противоположной рис. 2а грани модели располагались 4 тензометрических датчика, регистрирующих локальные деформации. Датчики были установлены вдоль профиля, начинающегося между сближенными краями концентраторов и идущего под углом 25° к вертикальной оси. Показанная на рис. 2а грань модели периодически фотографировалась в свете лазера. Между двумя последовательными экспозициями

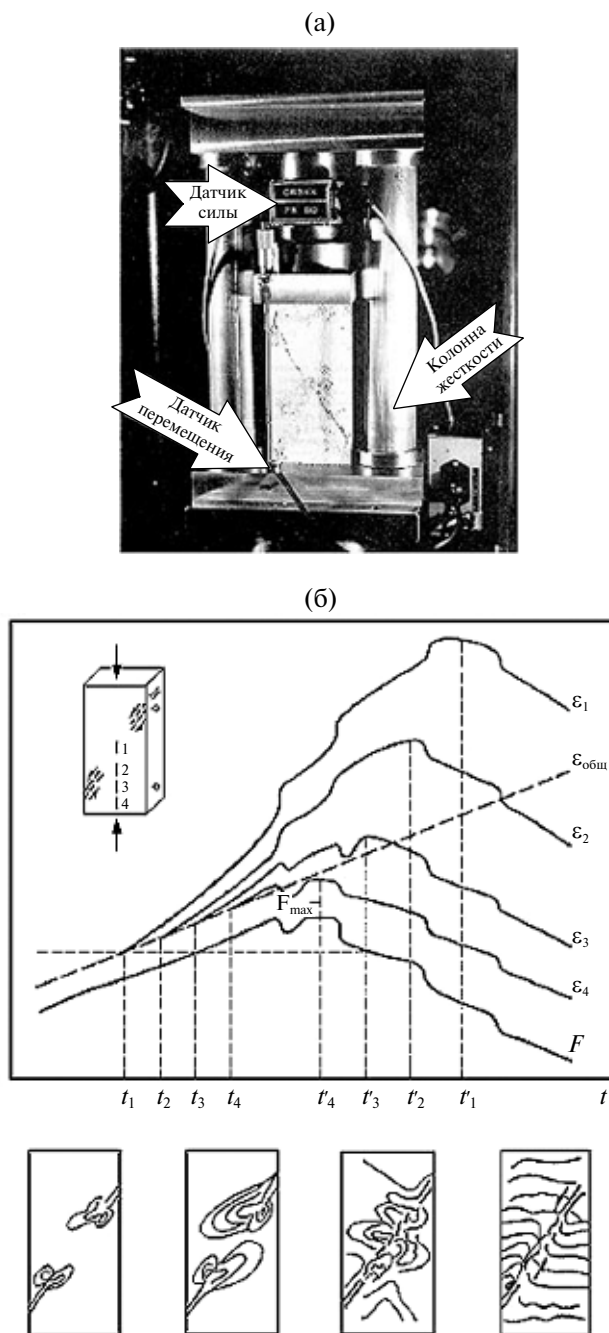


Рис. 2. Схема эксперимента (а), нагрузка F , локальные деформации ϵ и соответствующие изменения рельефа грани (б).

при лазерной съемке модель деформировалась; при этом происходило изменение рельефа изучаемой боковой грани. На рис. 2б демонстрируется обобщенный результат этих исследований. На четырех схемах внизу показано изменение рельефа грани модели.

В верхней части рис. 2б показаны в функции времени графики вертикальных компонент деформации $\varepsilon_1 - \varepsilon_4$, регистрируемых тензодатчиками 1–4, а также графики общей деформации (укорочения) модели $\varepsilon_{\text{общ}}$ и нагрузки F . Видно, что на допредельном участке нагружения датчики 1–4 последовательно в моменты времени $t_1 - t_4$ 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. Максимум локальной деформации первым проявляется на тензодатчике 4 (время t'_4) и последним – на датчике 1 (время t'_1).

Рассмотрим ситуацию 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 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ при падающей нагрузке), в то время как внешняя часть модели испытывает упругую разгрузку (восстановление $\varepsilon_3, \varepsilon_4$, пропорциональное падению F). Таким образом, модель разделяется на две области с различными механическими свойствами.

На допредельном участке нагружения (до максимума нагрузки F) наблюдается рост двух областей интенсивной деформации, начинающийся от концов концентраторов (нижняя часть рис. 2б). Они возникают в результате взаимодействия их полей напряжений. Соответствующая теоретическая задача была исследована в сотрудничестве с Б.В. Костровым, В.И. Осауленко и В.Н. Фридманом [Соболев, Кольцов, 1988]. Поле напряжений для упругой плоскости с трещинами, находящейся в поле приложенных на бесконечности напряжений двухосного сжатия, может быть вычислено по формулам:

$$\sigma_x + \sigma_y = 4 \operatorname{Re} \cdot \Phi(z) + 2p \quad (1)$$

$$\sigma_y - \sigma_x + 2i \cdot \tau_{xy} = -4(\Phi(z) + iy\Phi'(z)) - 2qe^{-2i\alpha}, \quad (2)$$

где

$$\Phi(z) = \frac{iT_0}{2} \left(1 - \frac{P(z)}{\sqrt{R(z)}} \right),$$

$$P = \frac{\sigma_1^0 + \sigma_2^0}{2}, \quad q = \frac{\sigma_1^0 - \sigma_2^0}{2},$$

$$T_0 = q \sin 2\alpha - k(p - q \cos 2\alpha),$$

$$P(z) = z^2 - 2az + b,$$

$$R(z) = (z - a_1) \cdot (z - a_2) \cdot (z - a_3) \cdot (z - a_4),$$

$$z = x + iy.$$

Здесь p – полусумма главных сжимающих напряжений, q – полуразность главных сжимающих напряжений, k – коэффициент трения. Коэффициенты a и b определяются из дополнительных условий убывания $\Phi(z)$ на бесконечности и однозначности смещения при обходе одной из трещин. Трещины задаются вдоль отрезков a_1, a_2, a_3, a_4 ; они ориентированы под углом α по отношению к главному сжимающему напряжению; берега трещин при сдвиге взаимодействуют по закону Кулона–Мора с постоянным коэффициентом трения.

Структура поля максимальных касательных напряжений, рассчитанная по формулам (1) и (2), представлена на рис. 3. Она аналогична в первом приближении экспериментально полученной картине (рис. 2б), где локальное поле напряжений создано вследствие отно-

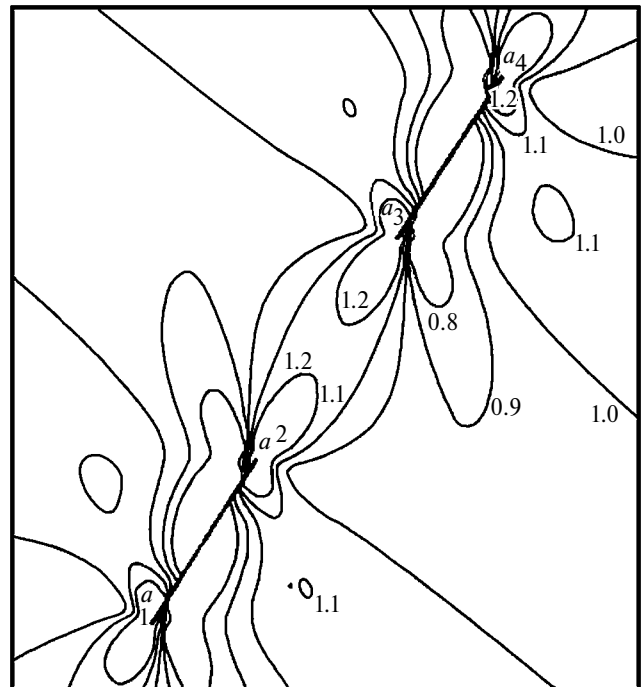


Рис. 3. Структура поля максимальных касательных напряжений между двумя коллинеарными трещинами.

сительного перемещения материала по берегам пластин – концентраторов.

Дальнейшее развитие поля деформаций (рис. 2б) состоит в увеличении интенсивности аномалии, сопровождающейся ее расширением и постепенным усложнением структуры изолиний. Последнее вызвано формированием эшелона трещин в центральной части образца. Первоначально отмечаются близвертикальные трещины отрыва, перемычки между которыми разрушаются наклонными по отношению к сжимающей нагрузке более длинными трещинами сдвига. При F_{\max} формируется соединяющий концы пластин магистральный разрыв. Однако при этом еще остаются неразрушенными барьеры меньшего масштаба и возникают шероховатости берегов разрыва, что обуславливает сложную форму поля деформаций. На запредельном участке нагружения – при падающей нагрузке F – разрыв становится более гладким по мере разрушения барьеров и шероховатостей.

Эксперимент подтверждает два положения модели ЛНТ: локализацию деформации по мере формирования макроразрыва и различное изменение свойств материала внутри области макроразрыва и вне ее.

Процесс развития макроразрыва сдвигового типа был изучен детально в работе [Sobolev, et al., 1978]. Изучались образцы высоко пластичной горной породы – пиррофиллита, деформируемые в условиях двухосного сжатия. Структура боковой грани фотографировалась методом оптической голографии через прозрачные нагружающие пистоны. В результате, получены детальные картины последовательного возникновения отрывных трещин и формирования секущих их трещин сдвига большего размера.

Локализация сейсмической эмиссии

Принципиальным является вопрос, насколько быстро протекает процесс локализации при формировании очага макроразрушения. Его изучение в лабораторных экспериментах с применением обычных гидравлических прессов затруднено тем, что интервал времени от зарождения очага до полного разрушения образца измеряется секундами. Для удлинения этого интервала применяются прессы высокой жесткости или с сервоконтролем, которые сбрасывают прикладываемую нагрузку на запредельной стадии деформирования, предохраняя таким образом образец от раздавливания нагружающим устройством.

В исследованиях [Lockner et al., 1991; Lockner et al., 1992] была применена оригинальная методика. Скорость нагружения уменьшалась при возрастании акустической активности вследствие включенной обратной связи между приемником акустических сигналов и управляющим устройством пресса с сервоконтролем. В экспериментах в лаборатории J. Byerlee и D. Lockner (Менло-Парк, Калифорния) участвовали российские ученые: А. Пономарев, В. Куксенко, С. Станциц. Проанализируем динамику акустической эмиссии в одном из типичных экспериментов [Соболев, Пономарев, 1999; Соболев, Пономарев, 2003].

Образец цилиндрической формы диаметром 76.2 мм и длиной 190.5 мм, приготовленный из мелкозернистого гранита Вестерли, деформировался одноосной нагрузкой в условиях всестороннего постоянного сжатия 50 МПа. Шесть идентичных пьезоэлектрических датчиков для приема акустических сигналов монтировались на поверхности образца по винтовой схеме. Один из датчиков, расположенный в средней части образца, использовался в качестве управляющего для организации обратной связи, с помощью которой изменялась скорость нагружения в зависимости от текущей акустической активности. Пороговое значение скорости АЭ для использования в цепи обратной связи устанавливалось на уровне нескольких событий в секунду и поддерживалось постоянным на протяжении всего опыта. Система сбора акустических событий обеспечивала запись в цифровом виде времен первых вступлений и амплитуд первых максимумов сигналов для каждого из шести пьезодатчиков. Для локализации источников АЭ применялся алгоритм, использующий времена прихода первых вступлений продольных волн на датчики и минимизирующий невязки времен пробега. Скорость упругих волн определялась в течение эксперимента при разных уровнях нагрузки с помощью четырех дополнительных пьезодатчиков, что позволяло вычислить изменения скорости в различных направлениях для последующего уточнения координат источников АЭ. Погрешность определения координат источников составляла 1–3 мм.

Рассмотрим динамику акустической активности в одном из образцов в тот период, когда нагрузка на него F приближалась к предельной, а также на запредельной стадии деформирования до момента искусственной разгрузки образца [Соболев, Пономарев, 2003]. Эта стадия нагружения продемонстрирована на рис. 4. Она занимала интервал времени от 7553 до 15 349 секунд.

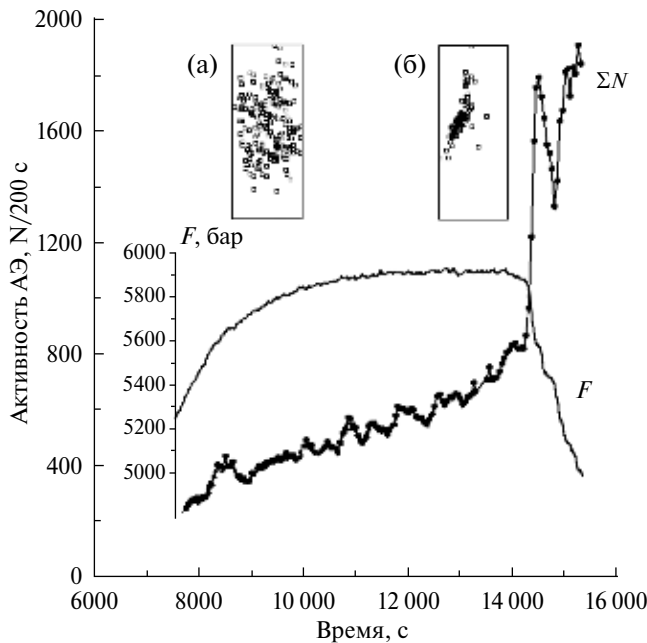


Рис. 4. Изменение акустической активности ΣN при изменении нагрузки F . Образец гранита. На врезках показаны проекции гипоцентров источников акустических сигналов при росте F (а) и ее падении (б).

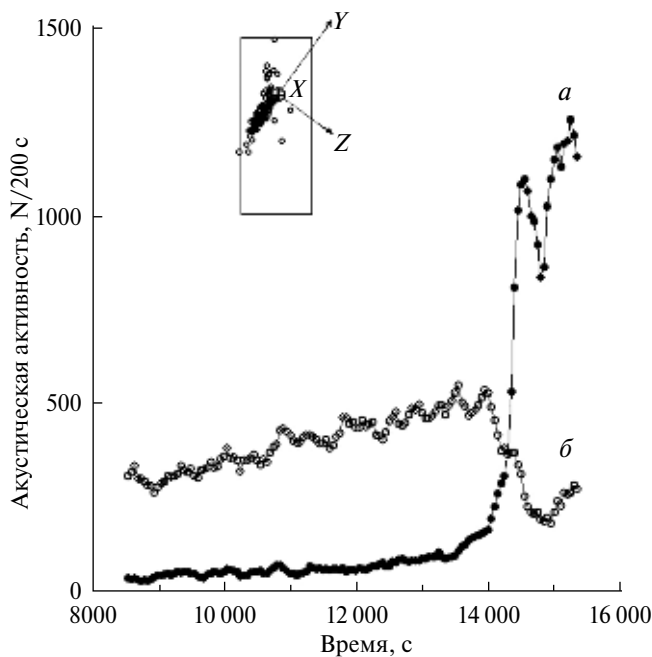


Рис. 5. Изменение акустической активности в области формирования макроразрыва (а, $Z < +/- 3$ мм) и во внешней зоне (б, $Z > 6$ мм). На врезке показана область локализации акустической эмиссии и координаты при расчете расстояния Z источников сигналов от оси этой области.

За это время было зарегистрировано 26 504 акустических сигналов, гипоцентры которых удалось определить с точностью лучше 3 мм.

На рис. 4, кроме кривой изменения нагрузки F , нанесены графики изменения числа акустических событий ΣN во всем образце в окне 200 с со сдвигом в 50 с. Из рис. 4 следует, что ход эксперимента можно в первом приближении разделить на два интервала. Первый характеризуется медленно меняющейся нагрузкой F и возрастанием акустической активности. Он занимает время от 7753 с до 14 200 с. На этом этапе пространственное распределение образующихся микротрещин носит случайный характер. Затем акустическая активность резко увеличивается, что сопровождается падением нагрузки. При этом источники акустических сигналов локализируются в узкой полосе шириной до 5 мм, наискось пересекающей образец.

Замедленное формирование разрыва и высокая точность локации гипоцентров акустических сигналов в обсуждаемом эксперименте давали возможность проследить динамику акустической эмиссии в области формирующегося макроразрыва и вне ее. Каталог был разделен на части в зависимости от расстояния Z источников сигналов от оси локализации гипоцентров. На рис. 5 показаны графики акустической активности во внутренней ($Z \leq \pm 3$ мм) и внешней ($Z > 6$ мм) зонах. Видно, что в интервале от 14 000 с до 15 000 с, т. е. при формировании макроразрыва, наблюдаются противофазные вариации акустической активности. Отмеченный в этом интервале времени на рис. 4 рост числа акустических событий объясняется исключительно эмиссией во внутренней зоне, в то время как активность во внешней зоне падает. Эксперимент подтверждает два положения модели ЛНТ: возрастание сейсмической активности в зоне формирования макроразрыва и одновременное ее уменьшение во внешней зоне.

Кластеризация источников акустических сигналов

Формирование очага макроразрушения (магистрального разрыва) сопровождается в рамках модели ЛНТ укрупнением участвующих в процессе разрывов. При этом в условиях локализации трещинообразования могут возникать кластеры нескольких разрывов. Проанализируем эффект кластеризации в выше описанном эксперименте. На этапе приближения нагрузки F к предельной, а также на запредельной стадии деформирования было зарегистрировано 26 504 акустических сигналов, гипоцентры которых удалось определить с точностью лучше 3 мм. Их амплитуда A менялась от 5 до 180 мВ, что при

пересчете на условную энергетическую характеристику по формуле $K = \lg E = 2 \lg A$ составляло диапазон K от 1.4 до 4.55. Зарегистрированные сигналы были разделены на три условных энергетических класса: $K1 = 1.4 - 2.43$; $K2 = 2.44 - 3.43$ и $K3 = 3.44 - 4.43$. Формирование очага происходит на том этапе нагружения, когда материал в области будущего макроразрыва достигает метастабильного состояния. В этих условиях возникновение очередного разрыва с повышенной вероятностью вызывает образование новых или удлинение существующих, особенно в близлежащей области. Следствием является повышенная вероятность возникновения кластеров акустических сигналов.

Эффект кластеризации исследовался следующим образом [Соболев, Пономарев, 2003]. Считалось, что кластером является появление двух или более акустических сигналов, если местоположение их гипоцентров, разница во времени появления и энергия удовлетворяют следующим условиям. Расстояние между гипоцентрами должно быть меньше критического:

$$R_{cr} = 3 \cdot R + B. \quad (3)$$

Здесь R представляет собой размер трещины, вычисляемый по формуле:

$$\lg R = D \cdot \lg E + C. \quad (4)$$

Коэффициент 3 соответствует критерию разрушения [Куксенко, 1986], который указывает на то, что перед макроразрушением твердого тела в его объеме накапливается критическая плотность трещин, расположенных на утроенном расстоянии их размеров. Коэффициент D , определяющий связь размера трещины с энергией, был выбран по аналогии с сейсмологическими данными равным 0.244 [Ризниченко, 1976], а коэффициент C был подобран опытным путем, исходя из предположения, что размеры ответственных за акустическую эмиссию трещин соизмеримы с размерами зерен (порядка 100 мк) [Hadley, 1975]; использовано значение $c = -1.3416$. Коэффициент B был введен для учета ошибок в определении гипоцентров и равнялся 1.5 мм. Величина R_{cr} для зарегистрированных акустических событий всех энергий изменялась от 1.8 мм до 3 мм. Время между двумя событиями должно быть меньше критического, вычисляемого по формуле:

$$T_{cr} = \alpha \cdot 10^{\beta(K_i - K_0)}, \quad (5)$$

где K_0 – минимальный используемый в эксперименте энергетический класс. Коэффициент β был выбран равным 0.5, что соответствовало

относительному уменьшению числа сигналов более высоких энергий в соответствии с законом повторяемости. Коэффициент α подбирался эмпирически и был равен 10. Соответственно, длительность T_{cr} изменялась в пределах от 10 до 300 с. Кроме соблюдения указанных условий по R_{cr} и T_{cr} к кластерам относились только те группы, в которых предыдущий акустический сигнал был меньше последующего. Таким образом, исключались афтершоки. Это было сделано с учетом того, что применявшаяся схема нагружения с обратной связью подавляла часть афтершоков, но количественно влияние данного фактора не было определено. В результате в описываемом эксперименте было найдено, соответственно, 4313 кластеров, что составило 16.3% от общего числа зарегистрированных акустических сигналов.

Во всех экспериментах динамика подготовки макроразрушения, представленная в пространственно-временном распределении гипоцентров акустических сигналов, развивалась одинаковым образом. Вначале гипоцентры (генерировавшие их трещины) хаотически возникали в объеме образца. После того, как нагрузка F достигала своих пиковых значений и на этапе ее постепенного послепикового падения происходила локализация гипоцентров в области будущего макроразрыва, как это было показано на рис. 6.

Рассмотрим последовательность возникновения и местоположение кластеров по ходу эксперимента (рис. 6). Назовем коротким кластером группу, состоящую из двух акустических импульсов, и длинным – состоящую более чем из трех импульсов. В интервале 7553–14 200 с большинство гипоцентров одиночных событий распределены в широкой полосе размером 100 мм. Кластеры распределены в более узкой полосе 60 мм. Их явная локализация до полосы шириной < 20 мм совпадает с падением нагрузки F , и эта полоса сформирована преимущественно длинными кластерами. При обсуждении модели ЛНТ важно подчеркнуть, что процесс формирования зоны кластеров на запредельной области нагрузки занимает некоторое время. Это оставляет принципиальную возможность прогноза времени макроразрыва.

Вышеприведенные результаты лабораторного моделирования позволяют утверждать, что последовательно проявляются три главных стадии развития макроразрушения [Соболев, 1993]: 1) рассеянное по объему накопление трещин; 2) слияние и укрупнение трещин по мере достижения их критической концентрации в объеме;

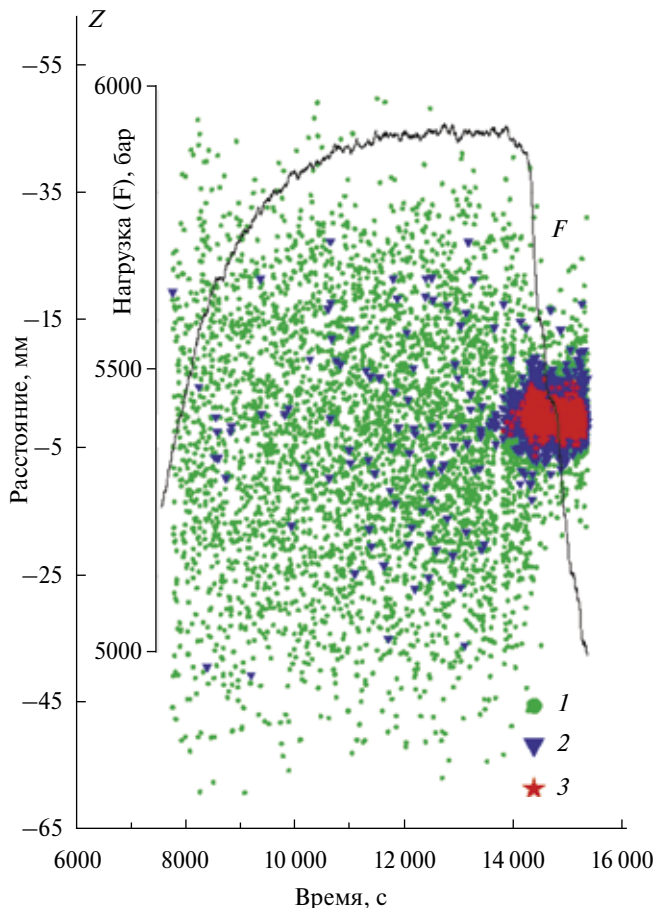


Рис. 6. Пространственно-временное распределение единичных акустических событий (1), коротких (2) и длинных кластеров (3) по мере формирования макроразрыва в образце гранита.

3) постепенное стягивание трещинообразования к поверхности будущего макроразрыва. Эти стадии отражаются в пространственно-временных изменениях акустического режима. На рис. 7 приведен результат наблюдения акустической эмиссии при деформировании модели из бетона с концентраторами напряжений [Соболев, Кольцов, 1988]. Установлены 3 стадии процесса трещинообразования в центральной области модели, расположенной между концами концентраторов. *Первая* характеризуется постепенным накоплением преимущественно трещин отрыва при постепенном росте приложенной нагрузки F/F_{max} . На *второй* стадии происходит укрупнение трещин. При этом возникают сгущения трещин в пространстве и времени (кластеры), содержащие как трещины отрыва, так и сдвига. Эта стадия соответствует близ максимальным значениям F/F_{max} . *Третья* стадия характеризуется возникновением эшелона более крупных трещин сдвига, трассирующих будущий макроразрыв. Число возникающих акустических

сигналов N/N_{max} возрастает вплоть до макро-разрушения. Эта стадия протекает при падающей нагрузке.

Динамика локализации сейсмичности

Насколько полученные в лабораторных экспериментах результаты проявляются в реальном сейсмическом процессе? В работе [Соболев, Завьялов, 1984] были предложены алгоритм и программа расчетов параметров локализации сейсмичности и исследован этот процесс перед Усть-Камчатским землетрясением 15 декабря 1971 г., $M = 7.9$. Эта методика затем была проверена на более представительном каталоге землетрясений Камчатки [Завьялов, Никитин, 1999; Завьялов, 2006]. Ниже мы кратко опишем методику и результаты. Пусть в некотором ограниченном объеме имеется «облако» из N точек (гипоцентров землетрясений) с координатами (x_i, y_i, z_i) . Величина каждой точки (землетрясения) характеризуется весовым параметром m_i в виде: $m_i = l_i^\alpha$, где l_i длина разрыва в очаге i -го землетрясения, α – показатель степени. Длина l_i оценивается по формуле [Ризниченко, 1976]:

$$\lg l_i = 0.244 K_i - 2.266, \tag{6}$$

где K_i – энергетический класс землетрясения.

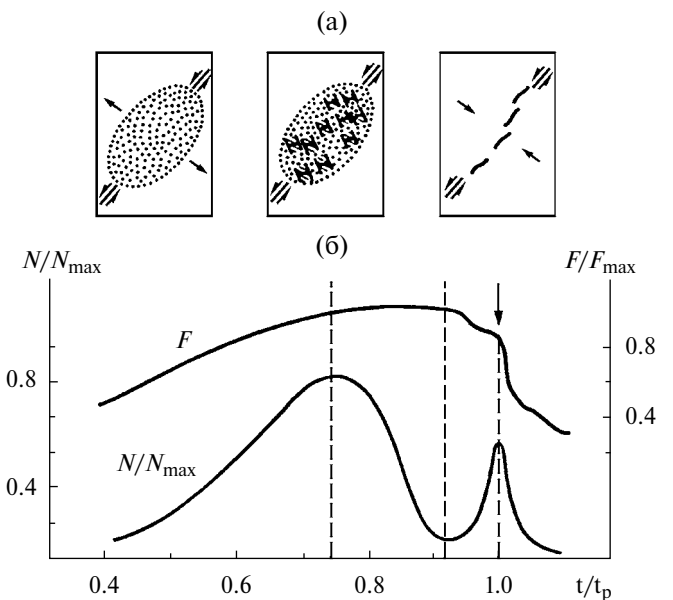


Рис. 7. Три основные стадии формирования магистрального разрыва в рамках модели ЛНТ: (а) – накопление мелких трещин – появление более крупных трещин и кластеров – возникновение эшелона трещин больших трещин; (б) – последовательные стадии изменения нагрузки F/F_{max} и числа возникающих акустических сигналов N/N_{max} , нормированных на максимальные значения.

Пусть далее задана некоторая плоскость (одна из нодальных плоскостей будущего сильного землетрясения) $Ax + By + Cz + D = 0$. Расстояние от точки (x_i, y_i, z_i) до плоскости может быть найдено по формуле:

$$r_i = \left| \frac{Ax_i + By_i + Cz_i + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \right|. \quad (7)$$

Тогда среднее взвешенное расстояние R центра тяжести облака гипоцентров землетрясений до нодальной плоскости будущего сильного события равно:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N m_i r_i}{\sum_{i=1}^N m_i}. \quad (8)$$

При вычислении весового вклада отдельно землетрясения m_i степенной показатель α варьировался в пределах: $\alpha = 0 \div 3$. При $\alpha = 0$ все землетрясения вносят одинаковый вклад в расчет параметра R . При $\alpha = 3$ вносимый вклад пропорционален энергии, выделившейся в результате отдельного землетрясения. В последнем случае результат определяется несколькими относительно крупными событиями, тогда как вклад слабых землетрясений ничтожно мал. Приведенные ниже примеры расчета относятся к $\alpha = 1$, когда вклад отдельного землетрясения в общую картину пропорционален длине разрыва в его очаге.

При исследовании вариаций параметра R во времени для каждого сильного землетрясения выбирался шар, центр которого совмещен с гипоцентром сильного события. Радиус шара составлял 50 км, что соизмеримо с длиной готовящегося разрыва, оцененной по формуле (6) для землетрясений с $K \geq 14$. В этом шаре в скользящем временном окне длительностью 2 года с шагом 2 месяца рассчитывались значения параметра R . При исследовании вариаций параметра R в пространстве выбирался сейсмоактивный слой размером 200×200 км вдоль нодальной плоскости каждого сильного землетрясения. Толщина слоя вкост нодальной плоскости составляла 50 км. Слой разбивался вдоль плоскости на элементарные ячейки размером 20×20 км, перекрывающиеся наполовину. В каждой ячейке рассчитывались значения параметра R . На рис. 8 показаны временные зависимости параметра R для 2-х землетрясений: 4 октября 1987 г. [55.52 с.ш. – 162.08° в.д.] и 13 ноября 1993 г. [51.79 с.ш. – 158.83° в.д.]. Величина R для каждой точки соответствует правому краю скользящего временного окна. На рисунке видно уменьшение параметра R в течение 16–18 лет. Аналогичные результаты были получены и при подготовке других сильных землетрясений Камчатки [Завьялов, Никитин, 1999]. Результаты свидетельствовали, что перед сильными землетрясениями сейсмичность стягивалась к их нодальным плоскостям.

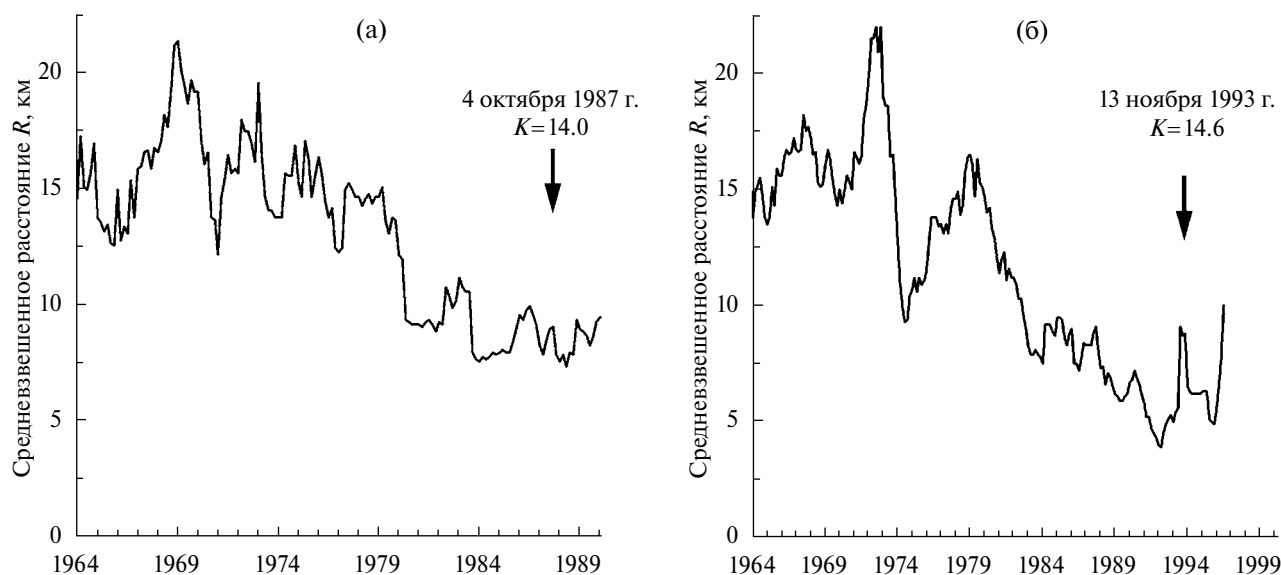


Рис. 8. Примеры локализации сейсмичности по мере приближения времени землетрясений Камчатки: 4 октября 1987 г. и 13 ноября 1993 г. энергетических классов $K = 14$ и $K = 14.6$.

Сейсмичность в области будущего землетрясения и вне ее

Из выше описанных лабораторных экспериментов следует, что локализация неустойчивой деформации в условиях длительно действующих напряжений не есть мгновенный процесс, а развивается постепенно. При этом ширина зоны неустойчивой деформации сокращается, а окружающий материал разгружается и частично восстанавливает свои первоначальные свойства. Зона неустойчивой деформации может быть названа внутренней зоной формирующегося макроразрыва, а окружающая область разгрузки – внешней зоной. Ускоряющаяся неустойчивая деформация в приразрывной области сопровождается уменьшением в ней действующих напряжений. В силу непрерывности напряжений в сплошной среде они уменьшаются и в окружающем пространстве. Насколько этот фундаментальный физический процесс может быть обнаружен при анализе сейсмичности?

Проанализирован сейсмический каталог Камчатки выше представительного энергетического класса $K=8.5$ [Федотов и др., 1987; Смирнов,

1997]. в фокальной зоне были выбраны области, включающие гипоцентры сильных землетрясений 2 марта 1992 г. [52.92 с.ш. – 159.83° в.д.], $K=14$ и 13 ноября 1993 г. [51.79 с.ш. – 158.83° в.д.], $K=14.6$. Каждая область состояла из трех подобластей: центральной, включающей разрыв от землетрясения, и двух боковых. Ориентация областей в пространстве выбиралась с учетом механизма очагов и нодальных линий, ориентированных в ЮВ – СЗ направлении (вкrest оси фокальной зоны); размеры соответствовали длинам разрывов с учетом соотношений между энергетическим классом и длиной разрыва в очагах [Ризниченко, 1976] и составляли 40 км. Ширина всех подобластей в поперечном направлении равнялась 20 км.

Для обнаружения сейсмического затишья или активизации использован параметр RTL [Соболев, Тюпкин, 1996]. Он позволяет выделить аномалии в единицах среднеквадратического отклонения σ от долговременного уровня; отрицательные значения параметра свидетельствуют о сейсмическом затишье, положительные – об активизации. На рис. 9а демонстрируются значения RTL перед землетрясением 2 марта 1992 г.

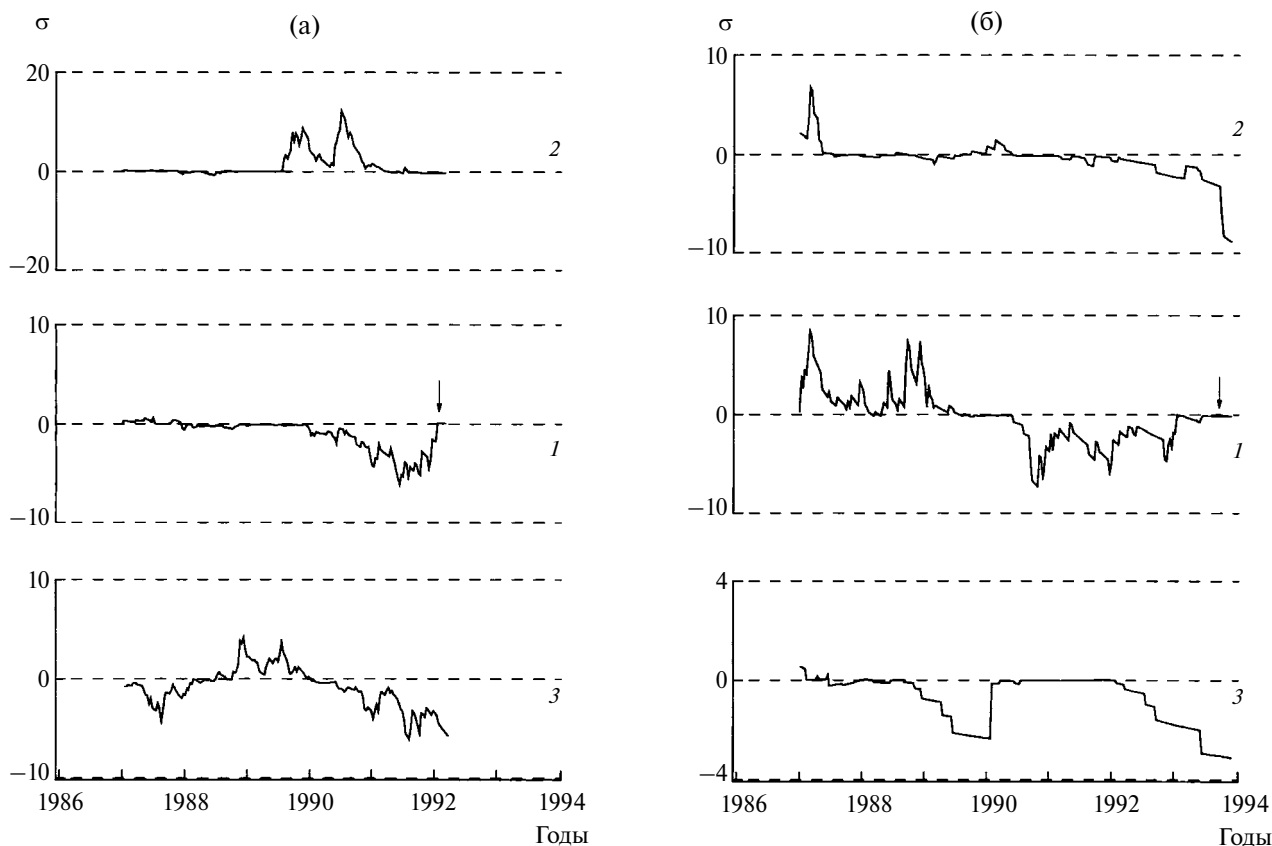


Рис. 9. Не синхронное изменение сейсмичности в приразрывных зонах 1 и боковых зонах 2, 3 перед землетрясениями Камчатки 2 марта 1992 г. (а) и 13 ноября 1993 г. (б). Оба землетрясения характеризовались магнитудой $M=7.1$.

в центральной под-области (график 1) и; боковых под-областях (графики 2 и 3). Видно, что ход сейсмичности в под-областях различается. В частности, в центральной под-области за год до землетрясения четко проявилось сейсмическое затишье с амплитудой $\sigma \approx -6 \sigma$, в целом не синхронное изменение сейсмической активности отмечено и перед землетрясением 13 ноября 1993 г. (рис. 9б). Здесь сейсмическое затишье с амплитудой $\sigma \approx -7 \sigma$ отмечалась в центральной под-области за 3 года до землетрясения (график 1), а в боковых областях — за 0.5 г. (графики 2 и 3). Эти результаты подчеркивают положение модели ЛНТ о том, что свойства горных пород при формировании очага землетрясения изменяются по разному в области будущего макроразрыва и вне ее.

Модель ЛНТ создавалась с учетом физического объяснения разнообразных предвестников землетрясений. в работах были представлены схемы предвестников в различных геофизических полях. Обратим внимание на изменение наклона графика повторяемости (*b*-value), отражающего возрастание перед землетрясением числа относительно больших сейсмических событий [Miachkin et.al., 1975; Мячкин и др., 1975]. Это объясняется последовательным объединением трещин меньшего размера с образованием более длинных, причем такой процесс происходит независимо от геометрического и временного масштабов: от лабораторных образцов до сейсмоактивных регионов. Существование такого рода предвестника подтверждено многочисленными наблюдениями [Завьялов, 2006; Смирнов и др., 2013]. В модели ДД этот тип предвестника не объясняется [Scholz, 2012].

ОБЩАЯ СХЕМА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, НЕ ПРОТИВОРЕЧАЮЩАЯ МОДЕЛИ ЛНТ

Возникновение вызывающего землетрясение разрыва в массиве горных пород есть явление, главным образом, механическое. Массив локально переходит от неразрушенного состояния к разрушенному, т. е. к новому качественному состоянию, и этот переход можно назвать катастрофой. То, что разрыв занимает небольшую область в окружающем объеме пород, а после землетрясения среда восстанавливает свою сплошность, не меняет явление по существу. В такой постановке мы не можем уйти от положений механики разрушения твердых тел. Рассмотрим реологическую диаграмму (рис. 10) [Соболев, 2011]. Макроразрушение деформируемого тела в условиях трехосного

неравномерного сжатия наступает после того, как главное напряжение превосходит предел длительной прочности. Назовем участок реологической кривой σ - ϵ вблизи предела прочности областью неустойчивого равновесия и образование макроразрыва — динамической подвижкой. Динамическая подвижка есть акт землетрясения. Среда долго может находиться в области неустойчивого равновесия, испытывая при этом небольшие флуктуации прочности и напряженного состояния. В лабораторном эксперименте эта фаза легко определяется, так как известна зависимость σ - ϵ в глубине земной коры мы не можем прямо измерить ни напряжение, ни деформацию.

Крутизна спада графика σ - ϵ и интервал времени от максимума графика до динамической подвижки зависят от жесткости нагружающей машины. Под жесткостью *k* в этом контексте понимается отношение величины уменьшения приведшей к неустойчивости силы ΔF к величине деформации в процессе развития неустойчивости *D*, $k = \Delta F/D$. Если это отношение велико, то напряжение падает по мере развития неустойчивой деформации, так что макроразрушения может не произойти. Это продемонстрировано в серии опытов на прессах с сервоконтролем, когда обеспечивается постоянная скорость деформации [Ставрогин, Протосеня, 1985]. В мягкой машине процесс протекает взрывообразно в течение короткого интервала времени после достижения предела прочности. Нормальная и сдвиговая жесткость разломных зон с средним ниже жесткости окружающих массивов [Кочарян, Спивак, 2003]. Это предполагает возможность постепенного развития неустойчивости при падающем напряжении внутри разломной зоны. Поочередно разрушаются перемычки в разломной зоне от менее к более прочным. Следовательно, существует возможность следить за развитием сейсмического процесса вплоть до динамической подвижки с целью ее прогноза.

В левом верхнем углу рис. 10 показана схема развития процесса на участке падающей прочности, а в правом нижнем углу — условная схема блокового строения земной коры. Пусть напряжения σ_1 в блоке 1 в некоторый момент времени t_1 достигли уровня 96% от максимально возможных и в блоке накопилась близкритическая концентрация разрывов. При дальнейшем росте напряжений и накоплении разрывов в момент времени t_2 развивается неустойчивая деформация, что сопровождается ростом скорости деформации ϵ_1 в приразрывной области и одновременным падением уровня напряжений σ_1 . Ускорение деформации в условии хрупкого разрушения пород проявляется

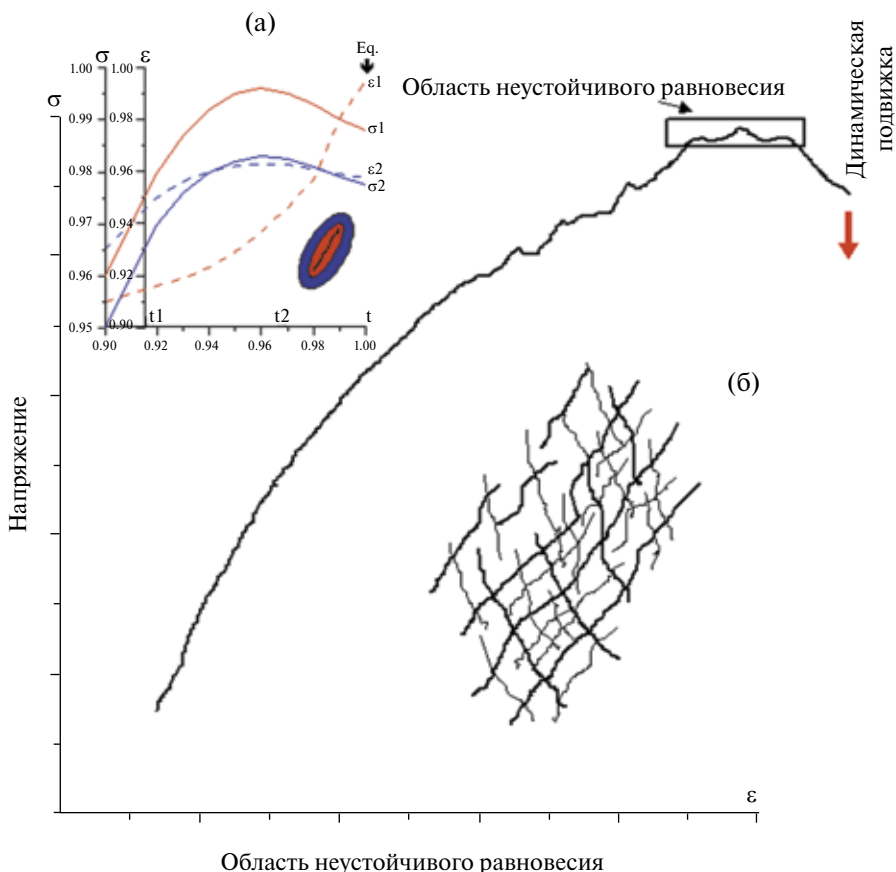


Рис. 10. Схема возникновения динамической подвижки (землетрясения): (а) – разделение материала на области неустойчивой и устойчивой деформации; (б) – реологическая кривая и схема блокового строения сейсмоактивного района.

и в усилении сейсмической активности. Предположим также, что в соседнем блоке 2 уровень напряжений σ_2 в момент t_1 составлял 94%. Их возрастание к моменту времени t_2 недостаточно для развития неустойчивости в этом блоке. Расход накопленной энергии для поддержания процесса неустойчивой деформации в приразрывной области блока 1 и соответствующее падение напряжений σ_1 приведут к некоторому падению напряжений в соседних блоках. Там будет понижаться скорость деформации ϵ_2 и уменьшаться сейсмическая активность. Таким образом, при развитии неустойчивой деформации во времени массив разделяется на две области, в которых деформационные (и сейсмические) процессы протекают по-разному. Можно ожидать, что внутри блока 1 будет развиваться сейсмическая активизация, в то время как в окружающем пространстве – сейсмическое затишье. Это было продемонстрировано в выше описанных лабораторных экспериментах и при наблюдениях в сейсмоактивных районах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модель ЛНТ сформулирована на качественном уровне. Описание взаимодействия полей напряжений трещин, приводящее к их постепенному укрупнению в сужающейся зоне локализации, требует математического расчета. Взаимное влияние комплекса разно ориентированных в пространстве трещин варьирует после изменения длины каждой трещины или смещения берегов ее разрыва. Поле напряжений трещины описывается трудоемкими для расчета уравнениями [Muskhelishvili, 1966]. Только в одной известной нам работе [Lermontova, Rebetsky, 2012], выполнены расчеты для трещин скола, ориентированных под разными углами друг к другу. Там сделаны некоторые упрощения. Приведем цитату из этой работы. «Приближенность созданного аналитического решения достигается рядом упрощающих положений, первое из которых определяет задание вида функций смещения бортов трещин, аналогичного вида функции смещения для одиночной трещины, второе – задание краевых условий на трещинах в интегральной

форме, в виде средних значений по длине трещины... Приведенные в качестве примеров результаты расчетов показывают зависимость конечного поля напряжений от числа, размеров и расположения трещин, а также от очередности возникновения смещений их бортов». При всех достоинствах данной работы отметим, что динамика развития системы трещин, приводящая к их слиянию и локализации процесса трещинообразования, пока не исследована.

Заключая описание ЛНТ-модели, отметим, что к ее достоинствам относятся следующие [Соболев, 1993]. Модель исходит из фундаментальных положений физики длительной прочности. Она не зависит от масштаба явления и может применяться к описанию подготовки разрушения не только в очагах землетрясений разных энергий, но и к динамическим явлениям в шахтах и разрушению инженерных сооружений при длительно действующих нагрузках. С помощью модели объясняется образование широко распространенных эшелонированных систем разрывов. Процесс подготовки землетрясения развивается постепенно, что предполагает возможность прогноза времени будущего сейсмического события. Модель обосновывает **саморазвитие** процесса землетрясения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений. М.: Наука. 2006. 254 с.
- Завьялов А.Д., Никитин Ю.В.* Процесс локализации сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 83–89.
- Костров Б.В., Фридман В.Н.* Механика хрупкого разрушения при сжимающих нагрузках. Физика очага землетрясения. М.: Наука. 1975. С. 30–45.
- Кочарян Г.Г., Спивак А.А.* Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: ИКЦ «Академкнига». 2003. 423 с.
- Куксенко В.С.* Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел. Сб. докл. 1-й Всесоюз. шк.-семинара «Физика прочности и пластичности». Л.: Наука. 1986. С. 36–41.
- Мухелишвили Н.И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука. 1966. с 707.
- Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г.* Основы физики очага и предвестники землетрясений. Физика очага землетрясения. М.: Наука. 1975. С. 6–29.
- Петров В.А.* Основы кинетической теории разрушения и его прогнозирования // Прогноз землетрясений. 1984. № 5. С. 30–44.
- Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. Исследования по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 9–27.
- Смирнов В.Б.* Опыт оценки представительности каталогов землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 93–105.
- Смирнов В.Б., Chadha R.K., Пономарев А.В., Srinagesh D.* Прогностические аномалии наведенной сейсмичности в области водохранилищ Койна-Варна, Западная Индия // Физика Земли. 2013. № 2. С. 94–109.
- Соболев Г.А.* Сейсмические свойства внутренней и внешней зоны очага землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2003. № 3. С. 41–51.
- Соболев Г.А.* Изучение образования и предвестников разрыва сдвигового типа в лабораторных условиях. Физические процессы в очагах землетрясений. М.: Наука. 1980. С. 86–99.
- Соболев Г.А.* Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. Российская академия наук. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта. М. 2011. 56 с.
- Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 313 с.
- Соболев Г.А., Завьялов А.Д.* Локализация сейсмичности перед Усть-Камчатским землетрясением 15 декабря 1971 г. // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1984. № 4. С. 17–24.
- Соболев Г.А., Завьялов А.Д.* Локализация сейсмичности перед Усть-Камчатским землетрясением 15 декабря 1971 г. // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1984. № 4. С. 17–24.
- Соболев Г.А., Кольцов А.В.* Крупномасштабное моделирование подготовки и предвестников землетрясений. М.: Наука. 1988. 203 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Акустическая эмиссия и стадии подготовки разрушения в лабораторном эксперименте // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 50–62.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. Монография. М.: Изд-во «Наука». 2003. 273 с.
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С.* Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4. С. 64–74.
- Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г.* Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М.: Недра. 1985. 271 с.
- Федотов С.Ф., Шумилина Л.С., Чернышева Г.В.* Сейсмичность Камчатки и Командорских островов по данным детальных исследований // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 29–60.
- Hadley K.* V_p/V_s anomalies in dilatant rock samples // PAGEOPH. 1975. V. 113. P. 1–23.
- Lermontova A.S., Rebetsky Yu.L.* Research of interactions between shear fractures on the basis of approximate analytical

- elastic solutions // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2012. V. 3(3). P. 239–274. doi:10.5800/GT-2012–3–3–0073
- Lockner D., Byerlee J., Kuksenko V., Ponomarev A., Sidorin A.* Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite // *Nature*. 1991. V. 350. № 6313. P. 39–42.
- Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev V., Sidorin A.* Observations of Quasistatic Fault Growth from Acoustic Emissions. In “Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks” / Ed. Evans B., Wong T.-F. London: Academic Press. 1992. P. 3–31.
- Miachkin V.I., Brace W.F., Sobolev G.A., Dieterich J.H.* Two models for earthquake Forerunners // *PAGEOPH*. 1975. V. 113. № 1. P. 169–181.
- Miachkin V.I., Sobolev G.A., Dolbilkina N.H. et al.* The study of variations in geophysical fields near focal zones of Kamchatka // *Tectonophysics*. 1972. V. 14. № 3. P. 287–293.
- Ponomarev A.V., Zavyalov A.D., Smirnov V.B., Lockner D.A.* Physical modelling of the formation and evolution of seismically active fault zones // *Tectonophysics*. 1997. V. 277. P. 57–81.
- Scholz C.H.* The mechanics of earthquakes and faulting. 2nd edition. Cambridge University Press. 2012. 539 p.
- Sobolev G., Getting I., Spetzler H.* Laboratory study of the strain field and acoustic emissions during the failure of barrier // *J. Geoph. Res.* 1987. V. 92.B. № 9. P. 9311–9318.
- Sobolev G., Spetzler H., Salov B.* Precursors of failure in rocks while undergoing anelastic deformations // *J. Geoph. Res.* 1978. V. 83. P. 1775–1784.
- Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwall Y.P.* Earthquake prediction: a physical basis. *Science*. 1973. V. 181. P. 803–810.

Avalanche Unstable Fracturing Formation Model

G. A. Sobolev^{a,*}

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^{*}*E-mail: sobolev@ifz.ru*

Received May 24, 2018

The basic ideas of the avalanche unstable fracture formation (AUF) model were for the first time presented by the scientists of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences at the Assembly of International Union of Geodesy and Geophysics in Moscow in 1971 and published in a special issue of *Tectonophysics* in 1972. Subsequently, numerous laboratory and in situ experiments have validated and elaborated the AUF model. The model builds on the fundamental principles of the long-term strength physics. The model is independent of the scale of a phenomenon and can be used for describing the rupture preparation not only in the earthquake sources of different energy levels but also for the dynamic events in mines and for the failures of engineering structures under long-term loading. Based on the model, the formation of the widespread en-echelon fracture systems is explained. The earthquake preparation process develops gradually suggesting the possibility to forecast the time of a future seismic event. The model substantiates *self-evolution* of the earthquake process.

Keywords: fracture, rupture, stresses, strains, seismic activity, earthquake