



ВЕЕРНЫЙ МЕХАНИЗМ СОЗДАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РАЗЛОМОВ С ВЫСОКИМИ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ НА СЕЙСМОГЕННЫХ ГЛУБИНАХ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Борис Григорьевич Тарасов

Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ», 199106, Санкт-Петербург, 22-я линия В.О., 3, корп. 1, Россия, bgтарас@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0453-4870>

Аннотация. Обсуждаются основы недавно обнаруженного веерного механизма разрушения горных пород на сейсмогенных глубинах земной коры, создающего разломы с высокими фильтрационно-емкостными свойствами. Феноменальной особенностью веерного механизма является способность создавать новые разломы в прочных горных породах при аномально низких сдвиговых напряжениях и обеспечивать высокие скорости роста разломов вплоть до сверхзвуковых, что делает его самым опасным механизмом землетрясений. Показано, что данный механизм может быть активизирован искусственно для различных целей, например, при создании глубинных коллекторов для петротеплоэлектростанций и для увеличения нефтеотдачи трудноизвлекаемых запасов.

Ключевые слова: прочные горные породы, механизмы разрушения, высокие давления, сейсмогенные глубины, землетрясения, искусственные глубинные коллекторы

Для цитирования: Тарасов Б.Г. Веерный механизм создания динамических разломов с высокими фильтрационно-емкостными свойствами на сейсмогенных глубинах земной коры // Геофизические технологии. 2024. № 1. С. 118–186. doi:10.18303/2619-1563-2024-1-118.

FAN MECHANISM CREATING DYNAMIC RUPTURES WITH HIGH PERMEABILITY AT SEISMOGENIC DEPTHS OF THE EARTH'S CRUST

Boris G. Tarasov

Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying – the Intersectoral Scientific Center VNIMI, 22 Line VO, 1, bld. 3, St. Petersburg, 199106, Russia, bgтарас@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0453-4870>

Abstract. The article discusses the basis of the recently discovered fan mechanism of rock rupture at seismogenic depths of the Earth's crust, creating faults with high permeability. A phenomenal feature of the fan mechanism is the ability to create new faults in strong rocks at abnormally low shear stresses and provide high fault velocity up to supersonic, which makes it the most dangerous earthquake mechanism. It is shown that this mechanism can be activated artificially for various purposes, for example, when creating deep collectors for petro-thermal power plants and to increase oil recovery from hard-to-recover reserves.

Keywords: strong rocks, fracture mechanisms, high pressures, seismogenic depths, earthquakes, artificial deep collectors

For citation: Tarasov B.G. Fan mechanism creating dynamic ruptures with high permeability at seismogenic depths of the Earth's crust // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 1. P. 118–186. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2024-1-118.

ВВЕДЕНИЕ

Данная статья обсуждает природу формирования новых разломов на сейсмогенных глубинах земной коры. Подавляющее большинство землетрясений на континентах происходит в пределах сейсмогенного слоя, который варьируется по глубине от 10 до 40 км [Maggi et al., 2000; Scholz, 2002]. В течение последних почти шести десятилетий (начиная с работы [Brace, Byerlee, 1966]) общепризнано, что основным механизмом землетрясений является периодическое динамическое проскальзывание (stick-slip) по существующим разломам, представляющим слабейшие элементы в структуре земной коры [Heaton, 1990; Scholz, 2002; Соболев, Пономарев, 2003; Rice, 2006; Кочарян, 2016]. Такой подход не допускает активного участия цельных прочных горных пород в создании землетрясений путем их разрушения, а следовательно, и в формировании новых разломов в земной коре, важная роль которых как зон нефтегазонакопления и каналов миграции хорошо известна [Попков, 2012].

Данная ситуация связана с тем, что до недавнего времени не был известен тщательно скрываемый природой особый механизм разрушения, который может формировать новые разломы в прочных породах при сдвиговых напряжениях существенно ниже прочности разломов. Этот механизм назван «веерным механизмом» по конфигурации структуры головной части динамических трещин [Tarasov, 2008, 2010, 2014]. Веерный механизм создает преимущественные условия для разрушения цельных пород по сравнению с динамическим сдвигом по существующим разломам. Ввиду того, что веерный механизм оперирует вблизи существующих разломов, большие глубины скрывают этот факт, создавая иллюзию реактивации существующих разломов.

Веерный механизм в корне меняет традиционные представления о природе землетрясений. Он обладает целым рядом феноменальных свойств, совокупность которых делает его самым опасным механизмом разрушения в земной коре. В статье показано, что подавляющее большинство землетрясений на сейсмогенных глубинах земной коры происходит в результате создания новых динамических разломов в цельных породах. Эти разломы обладают высокими фильтрационно-емкостными свойствами, создавая новые пустотные пространства в земной коре. Показано, что данный механизм может быть активирован искусственно, что позволит использовать его для различных целей, например, при создании глубинных коллекторов для петротеплоэлектростанций и для увеличения нефтеотдачи трудноизвлекаемых запасов. Физические основы веерного механизма, его феноменальные свойства и их проявление в лабораторных и природных условиях изложены детально в статье.

ПРОБЛЕМЫ В ПОНИМАНИИ МЕХАНИЗМОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ГЛУБИННЫХ ГОРНЫХ УДАРОВ И РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Поскольку данная статья противопоставляет новый (веерный) механизм землетрясений общепринятому (стик-слип) механизму, то уместно начать с примеров различных точек зрения на некоторые особенности землетрясений. Несмотря на единодушное международное признание стик-слип механизма в качестве основного механизма землетрясений в течение последних шести десятилетий, накопилось много неразрешенных вопросов. В данном разделе обсуждаются некоторые из них. Следует заметить, что веерный механизм работает только на сейсмогенных глубинах земной коры, поэтому наше внимание будет уделено землетрясениям, происходящим на этих глубинах.

Связь между существующими разломами и землетрясениями

Стик-слип подход к пониманию механизмов землетрясений основан на предположении, что существующие разломы являются слабым звеном в структуре земной коры, поэтому потеря устойчивости на разломах представляется приоритетной при создании землетрясений. На рисунке 1 показана карта глобальных разломов в земной коре, представляющих границы между тектоническими плитами, и распределения землетрясений по земному шару [Silva et al., 2017]. Каждая точка на карте соответствует очагу (гипоцентру) землетрясения. Точки разных цветов относятся к разным глубинам расположения очага. Красные точки соответствуют глубинам 0–30 км, оранжевые точки – глубинам 30–60 км, более глубокие очаги отмечены другими цветами (см. пояснение на карте). Обращает на себя внимание тот факт, что абсолютное большинство очагов, возникших на глубинах, не превышающих толщину земной коры, расположены вне глобальных разломов и могут быть рассеяны на больших площадях земной коры. Более глубокие землетрясения в основном приурочены к границам тектонических плит.

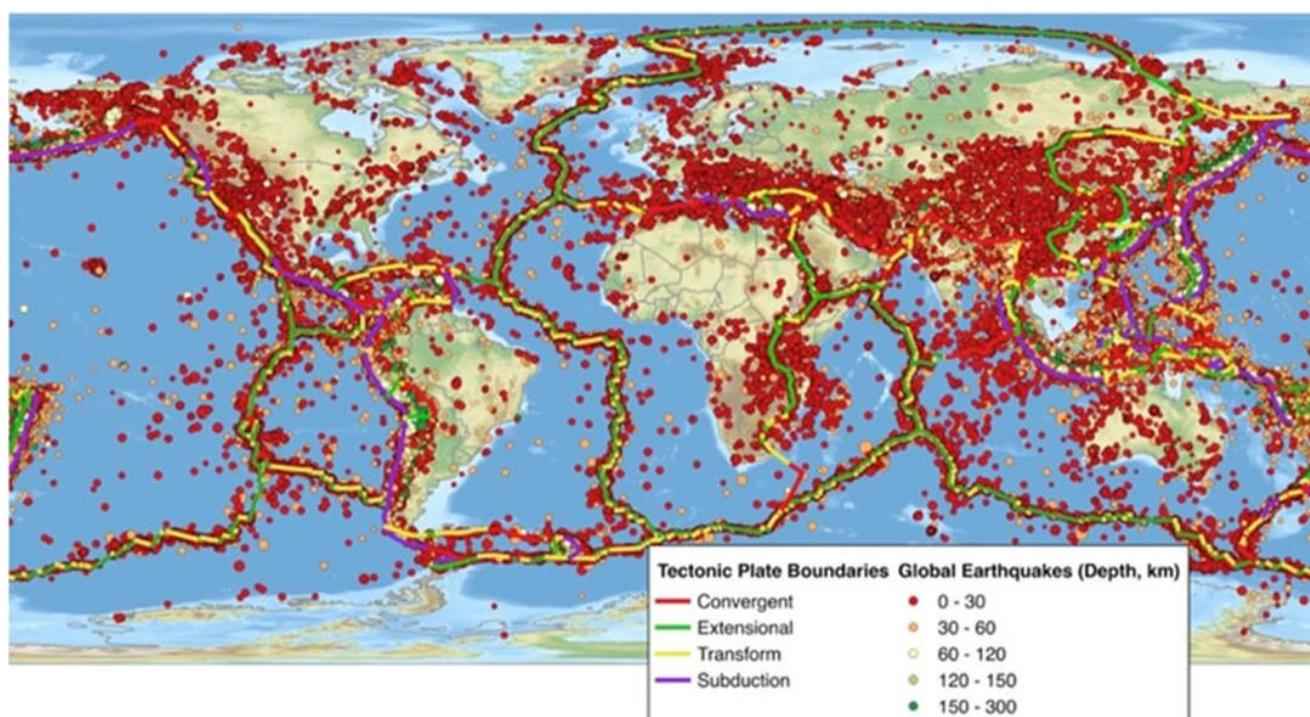


Рис. 1. Карта глобальных разломов в земной коре, представляющих границы между тектоническими плитами, и распределения землетрясений по земному шару [Silva et al., 2017].

Факт рассеянности землетрясений имеет фундаментально различные объяснения с позиций стик-слип и веерного механизмов. Согласно стик-слип подходу утверждается, что вся земная кора насыщена разломами, которые активизируются в случае удачного расположения по отношению к полю действующих напряжений, вызывая землетрясения. С точки зрения веерного механизма, образование новых разломов в цельных породах является приоритетным по сравнению со сдвигом по существующим разломам, т. к. оно может происходить при сдвиговых напряжениях ниже фрикционной прочности. Поэтому основная масса землетрясений организуется вне существующих разломов путем образования новых разломов, что расширяет зоны сейсмической активности и повышает плотность разломов в земной коре.

Данное утверждение выглядит противоестественным с точки зрения современных представлений о свойствах пород на сейсмогенных глубинах. Поскольку динамические события землетрясений происходят на больших глубинах, то непосредственное наблюдение за действующими механизмами исключено. Однако, когда разломы достигают земной поверхности, то можно наблюдать результаты подземных коллизий. На рисунке 2а показана карта разломов, создавших множество землетрясений в различное время в Новой Зеландии (<https://temblor.net/>). Красными линиями показаны старые разломы, а зеленым – новые разломы за последние 20 лет. Эта карта показывает, что динамическая активность в данном районе связана с последовательным созданием целой сети новых разломов, вместо периодического проскальзывания по изначально сформированному разлому.

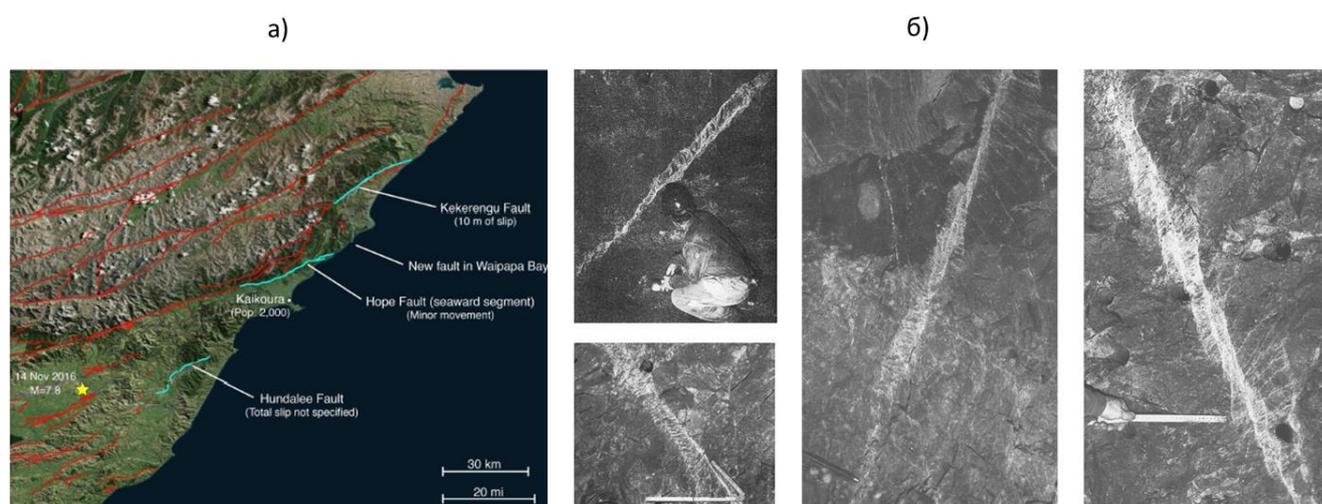


Рис. 2. а – Карта разломов, создавших множество землетрясений в различное время в Новой Зеландии (<https://temblor.net/>), б – фотографии новых разломов в цельных горных породах, окружающих ультраглубокие выработки Южной Африки [Ortlepp, 1997].

Благодаря созданию глубоких подземных выработок, сегодня появилась возможность наблюдать непосредственно за особенностями динамических процессов на больших глубинах. Когда выработки достигают больших глубин (как правило, свыше 2 км), то возникает особая форма горных ударов, связанная с формированием новых разломов в цельных породах. Такой вид горных ударов классифицируется как глубинные горные удары. Фотографии на рис. 2б показывают новые разломы, созданные динамическими трещинами сдвига в цельных горных породах, окружающих ультраглубокие выработки Южной Африки [Ortlepp, 1997]. Как отмечают исследователи [McGarr et al., 1979; Ortlepp, 1997; Ortlepp et al., 2005], такие горные удары характеризуются следующими особенностями:

- сейсмически неотличимы от землетрясений;
- связаны с формированием новых разломов (трещин сдвига) в цельных прочных горных породах;
- разрушение цельных прочных пород происходит при низких сдвиговых напряжениях, что является общим парадоксом для глубинных горных ударов и землетрясений;
- разломы зарождаются на большом расстоянии от выработки за зоной повышенных напряжений опорного давления;
- разрушение сопровождается аномально большим выделением энергии.

По итогам изучения глубинных горных ударов исследователи пришли к выводу, что наши знания о механизме разрушения, действующего на этих глубинах, являются абсолютно неадекватными (our knowledge of the mechanism of damage is completely inadequate) [McGarr et al., 1979; Ortlepp, 1997; Ortlepp et al., 2005].

Новый подход к пониманию механизмов глубинных динамических разломов

Изучение таких разломов показывает, что все они имеют одинаковую специфическую структуру, которая является также типичной для разломов землетрясений и динамических трещин в образцах, испытанных при высоких боковых давлениях, соответствующих сейсмогенным глубинам. На фотографиях рис. 3а видна структура разломов глубинного горного удара и землетрясения [Ortlepp, 1997; Scholz, 2002]. Структура этих разломов состоит из эшелона пластин горной породы, образованных трещинами отрыва, которые формируются на кончике растущего разлома. Как будет показано далее, этим процессом управляет веерный механизм, который так назван по веерной форме головы бегущего разлома (рис. 3б). При развороте пластин, вызванного относительным сдвигом берегов разлома, образуется веерная структура в голове трещины и формируется пустотное пространство, которое обладает высокими фильтрационно-емкостными свойствами (см. рис. 3б).

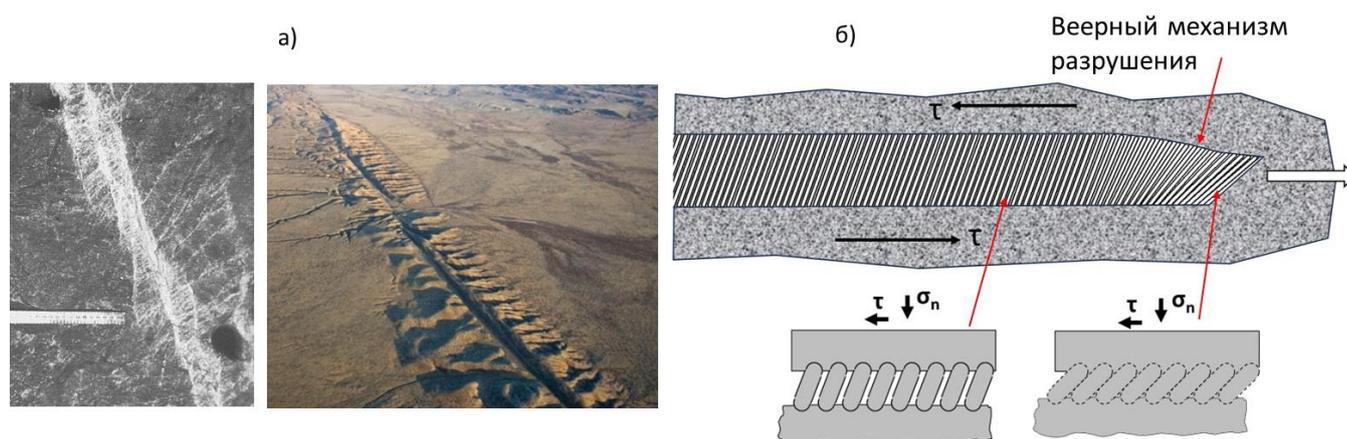


Рис. 3. а – Структура разломов глубинного горного удара и землетрясения [Ortlepp, 1997; Scholz, 2002], б – иллюстрация веерной головы растущей трещины сдвига и принципа образования пустотного пространства в результате разворота структурных пластин.

Для предварительного понимания роли веерной структуры в создании разломов, представим вкратце наиболее важные свойства веерной структуры. Исследователи отмечают, что большинство трещин землетрясений распространяются в виде волны (pulse-like), когда относительное смещение берегов трещины (сдвиг) происходит только в головной зоне трещины, а впереди и сзади этой зоны смещение заблокировано [Heaton, 1990; Perrin et al., 1995; Zheng, Rice, 1998; Noda et al., 2009]. Рисунок 4 иллюстрирует такой вид распространения трещины сдвига, управляемой веерным механизмом. Верхний график показывает, что смещение имеет место только в зоне веера, а впереди и сзади оно отсутствует.

Возможность продвижения веерной структуры через цельную породу при низких приложенных напряжениях сдвига обусловлено феноменальными свойствами этой структуры, которые проиллюстрированы графически под веерной моделью на рис. 4. Здесь красный график показывает, как

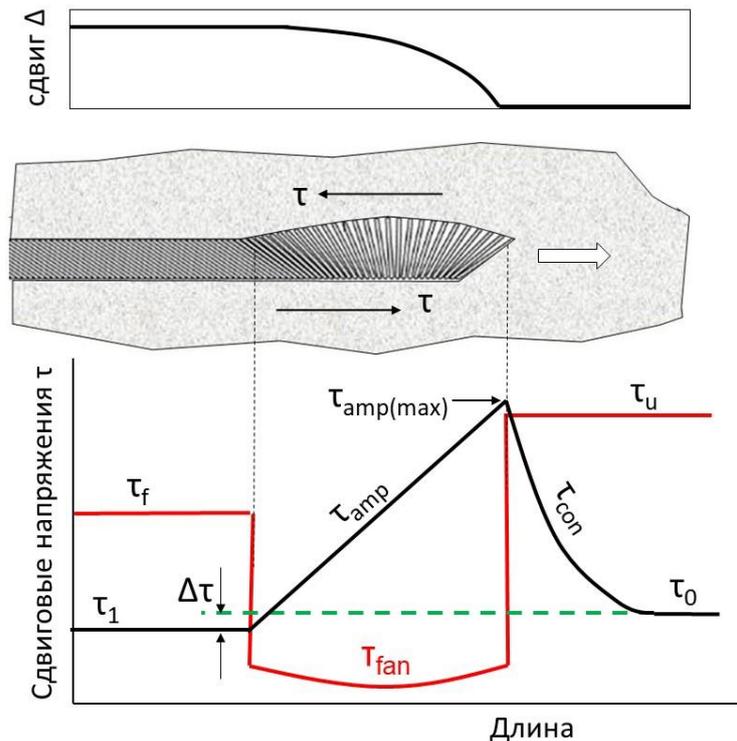


Рис. 4. Наиболее значимыми свойствами веерной структуры являются ее способности снижать сопротивление сдвигу почти до нуля τ_{fan} (красный график) и усиливать приложенные низкие напряжения τ_0 в десятки раз до значений предела прочности породы $\tau_{amp(max)} \geq \tau_u$ (черный график).

меняется сопротивление сдвигу вдоль бегущего веера. Перед веером сопротивление определяется прочностью породы τ_u , за веером силой трения τ_f между берегами образованной трещины, а внутри веерной зоны сопротивление τ_{fan} может быть очень низким (на порядок ниже фрикционной прочности τ_f). Черный график показывает вариацию действующих сдвиговых напряжений. Здесь τ_0 – исходный уровень приложенных напряжений; τ_1 – напряжения после разрушения породы; τ_{amp} и τ_{con} – напряжения, усиленные веерным механизмом на базе исходных приложенных напряжений τ_0 . Будет показано, что веерная структура является природным механизмом, с мощной способностью усиливать действующие напряжения. Он может в десятки раз увеличить исходные напряжения, обеспечивая напряжения на кончике трещины $\tau_{amp(max)}$ выше прочности породы τ_u . Совокупность низкого сопротивления сдвигу и высокой концентрации усиленных напряжений позволяет веерному механизму создавать новые динамические трещины в цельных породах при низких исходных напряжениях. Разрушение в таких условиях сопровождается малым сбросом напряжений (stress drop) $\Delta\tau = \tau_0 - \tau_1$.

Типичное распределение числа землетрясений с глубиной

На рисунке 5 представлены типичные гистограммы распределения количества землетрясений с глубиной [Maggi et al., 2000; Scholz, 2002]. Они показывают, что в определенном (сейсмогенном) слое земной коры (разном для разных мест) порода приобретает склонность к динамическим процессам, которая усиливается с глубиной до максимума, а затем уменьшается до нуля. Важный вопрос состоит в том, чем вызвано такое распределение сейсмической активности. Ответ на этот вопрос может служить индикатором в оценке правильности понимания механизма землетрясений.

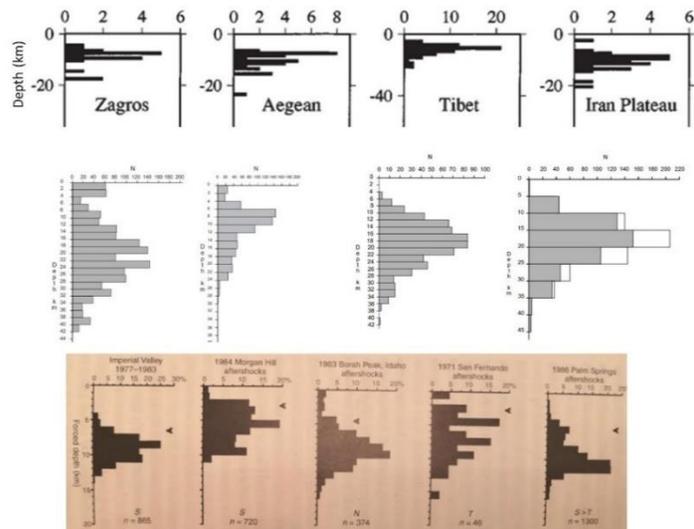


Рис. 5. Типичные гистограммы распределения количества (или частоты) землетрясений с глубиной [Maggi et al., 2000; Déverchère et al., 2001; Scholz, 2002].

На рисунке 6 проиллюстрированы три подхода к объяснению причин типичной вариации активности землетрясений с глубиной, схематично показанной на рис. 6а. Синие горизонтальные линии обозначают верхнюю и нижнюю границы сейсмогенного слоя. Все подходы базируются на сравнении вариации активности (количества) землетрясений с вариацией прочности земной коры. Модели на рис. 6б, в построены на базе стик-слип механизма, а на рис. 6г – на базе веерного механизма. Нижеприведенный анализ этих моделей показывает, что стик-слип модели дают некорректное объяснение в отличие от веерной модели.

Рисунок 6б демонстрирует модель зависимости статической фрикционной прочности литосферы от глубины [Brace, Kohlstedt, 1980; Kirby, 1980; Kohlstedt et al., 1995; Albaric et al., 2009]. Здесь верхняя часть с возрастающей прочностью соответствует универсальному закону трения [Byerlee, 1978], а нижняя часть с убывающей прочностью, представляет собой гипотетическую кривую, построенную с учетом влияния растущей температуры на больших глубинах [Kirby, Raleigh, 1973]. Результирующая модель представляет статическую прочность литосферы, которая соответствует критическому уровню напряжений, вызывающему потерю устойчивости по существующим разломам. Подобные модели прочности литосферы получают также при рассмотрении влияния давления флюида на фрикционные свойства разломов с глубиной [Sibson, 1973; Киссин, 2015]. Согласно этим моделям, сходство между профилями кривых, отражающих вариацию сейсмической активности и прочности литосферы с глубиной, подразумевает, что вероятность потери устойчивости возрастает с ростом прочности литосферы и достигает максимума на глубине максимальной прочности. Такой вывод, означающий, что чем прочнее литосфера, тем выше вероятность ее разрушения, выглядит не очень логично.

Модель на рис. 6в предлагает другую причину, вызывающую типичную вариацию активности землетрясений с глубиной [Scholz, 1998, 2002]. Согласно этой модели, прочность литосферы подчиняется универсальному закону трения [Byerlee, 1978] до глубин за пределами нижней границы сейсмогенного слоя, что не согласуется с первой моделью. Склонность существующих разломов к динамической нестабильности в данной модели определяется характером реакции фрикционной прочности на возрастание скорости деформации.

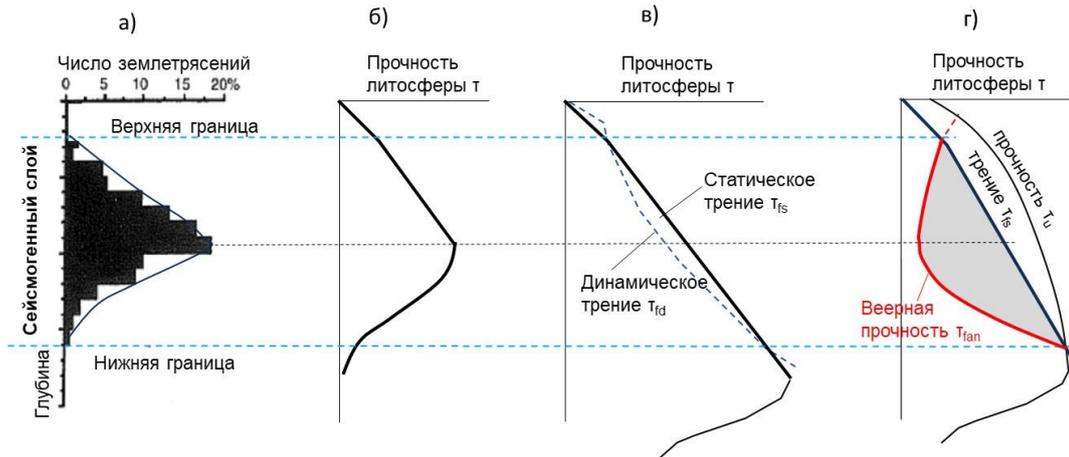


Рис. 6. Существующие модели для объяснения типичного распределения количества землетрясений с глубиной.

Согласно модели, в пределах сейсмогенного слоя рост скорости деформации вызывает снижение фрикционной прочности (velocity-weakening response), что создает условия для динамического спонтанного сдвига. За пределами сейсмогенного слоя увеличение скорости деформации сопровождается увеличением трения (velocity-strengthening response), что подавляет возможность динамического сдвига. Характер изменения величины динамического трения τ_{fd} на модели отражает пунктирная кривая в сравнении со сплошной кривой статического трения τ_{fs} . В модели предполагается, что между верхней и нижней границами сейсмогенного слоя разница между статическим и динамическим трением $\Delta\tau = \tau_{fs} - \tau_{fd}$ меняется с глубиной таким образом, что в верхней части она увеличивается до максимальной величины на некоторой глубине, а затем уменьшается до нуля на нижней границе. Далее предполагается, что величина разности $\Delta\tau$ определяет степень склонности разлома к потере устойчивости и вероятность землетрясения, что вызывает типичное распределение частоты землетрясений с глубиной.

Данная модель, так же, как и первая рассмотренная модель, содержит нарушение логики. Дело в том, что для возникновения начального смещения по разлому, за которым последует реакция динамического снижения трения (velocity-weakening response), необходимо достичь напряжений, соответствующих величине статического трения τ_s . Таким образом, количество землетрясений, возникающих на определенной глубине, определяется тем, как часто напряжения здесь достигают критического уровня, равного статической прочности τ_s . В рассматриваемой модели, статическая прочность τ_s растет линейно с глубиной. На вопрос, почему в центральной части сейсмогенного слоя напряжения чаще достигают критический уровень τ_s по сравнению с периферийными частями, данная модель не дает ответа.

Таким образом, можно заключить, что существующие объяснения причин, вызывающих типичное распределение количества землетрясений с глубиной, на базе стик-слип подхода недостаточно физически обоснованы и предлагают противоречащие друг другу модели.

На рисунке 6г представлена модель прочности земной коры, построенная на базе веерного механизма [Tarasov, 2013; Tarasov, Randolph, 2016]. В дополнение к кривым, характеризующим изменение с глубиной прочности цельных пород τ_u и фрикционной статической прочности разломов τ_{fs} , здесь

показана вариация прочности τ_{fan} цельных пород, когда они разрушаются веерным механизмом (красная кривая). Условия активизации веерного механизма и физика его феноменальных свойств будут рассмотрены детально в основной части статьи. На данной стадии мы демонстрируем результат действия веерного механизма в определении прочности цельных пород при разрушении сдвигом. В пределах сейсмогенного слоя веерный механизм снижает прочность цельных пород до значений τ_{fan} , которая ниже фрикционной прочности τ_{fs} . Ввиду переменной эффективности веерного механизма с глубиной, соответственно меняется прочность пород, отображаемая красной кривой на графике. Согласно данной модели, распределение количества землетрясений с глубиной определяется соответствующим уровнем веерной прочности горных пород τ_{fan} – чем ниже прочность, тем больше вероятность возникновения землетрясения. Такая причинно-следственная связь является логичной в сравнении с предлагаемой на базе стик-слип механизма. Следует подчеркнуть, что разрушение веерным механизмом может происходить при любом уровне напряжений в земной коре, соответствующем серой зоне на графике. Более доказательно данная модель будет рассмотрена после детального анализа свойств веерного механизма.

Степень изученности свойств горных пород при разрушении в условиях высоких σ_3

Рисунок 7 показывает пробелы в экспериментальном изучении свойств горных пород, которые не позволяют понять поведение пород в условиях сейсмогенных глубин. Данная статья обсуждает механизм создания новых динамических разломов в земной коре, для чего необходимо знать запредельные свойства пород, т. к. спонтанное разрушение может происходить только на запредельной стадии разрушения. На рисунке 7 представлены серии кривых «напряжение–деформация», полученные в условиях $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ при разных уровнях бокового давления σ_3 , имитирующего уровень всестороннего литостатического давления на разных глубинах земной коры. Представленные результаты показывают, что слабые и средней прочности породы исследованы в полной мере в широком диапазоне боковых давлений до достижения квазипластической деформации при высоких давлениях. Однако прочные породы (с прочностью на одноосное сжатие UCS около 250 МПа и выше) исследованы за пределом прочности только при низких уровнях σ_3 и абсолютно не исследованы при высоких давлениях, соответствующих сейсмогенным глубинам. Причиной этого является тот факт, что прочные породы в таких условиях разрушаются с высочайшей динамикой и с выделением огромной энергии на любых существующих жестких и сервоконтролируемых машинах. Нужно отметить, что образцы в таких условиях всегда разрушаются за счет формирования трещины сдвига (показана пунктиром на схеме), аналогично разрушению на сейсмогенных глубинах. Ввиду отсутствия экспериментальных данных, сегодня считается, что запредельные свойства прочных пород должны быть аналогичными свойствам хорошо исследованных слабых пород, где остаточная прочность, определяемая трением по образовавшейся трещине, представляет собой нижний предел прочности пород в условиях объемного сжатия. Такое предположение является ошибочным, что будет показано дальше.

Проведенный в данном разделе анализ показал, что понимание динамического проскальзывания по имеющимся разломам (стик-слип), как основного механизма землетрясений на сейсмогенных глубинах земной коры, является недостаточно обоснованным. В то же время наблюдения, указывающие на динамическое образование новых разломов в земной коре и отсутствие экспериментальных исследований процессов разрушения при напряженных состояниях, соответствующих сейсмогенным

глубинам, дают основания для более глубокого изучения нового подхода, который делает свои первые шаги, по сравнению с полувековым активным изучением и практически единодушным принятием стик-слип механизма.

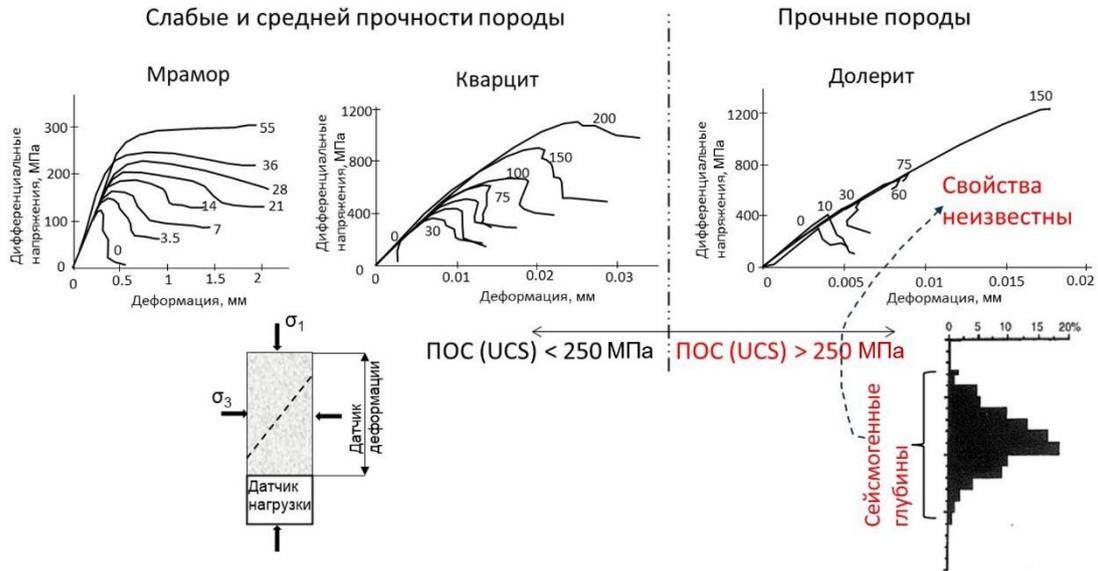


Рис. 7. Иллюстрация степени изученности запредельных свойств горных пород различной прочности в широком диапазоне боковых давлений σ_3 .

АНОМАЛЬНЫЕ ЗАПРЕДЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПРОЧНЫХ ПОРОД ПРИ БОКОВЫХ ДАВЛЕНИЯХ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ СЕЙСМОГЕННЫМ ГЛУБИНАМ

Новая методика экспериментальных исследований

Причиной отсутствия экспериментальных данных по запредельным свойствам прочных горных пород при высоких боковых давлениях σ_3 , соответствующих сейсмогенным глубинам, является невозможность предотвращения бурного спонтанного разрушения на всех существующих жестких сервоконтролируемых испытательных машинах. Все существующие машины обладают относительно низкой скоростью реакции на резкое изменение скорости деформации в момент начала спонтанного разрушения. Это обусловлено рядом факторов, основными из которых являются следующие:

1. Недостаточно высокая жесткость нагружающей системы.
2. Высокая инерционность нагружающих элементов из-за большой массы.
3. Большой объем рабочей жидкости в нагружающей и разгружающей камерах силовых агрегатов.

Автором данной статьи была разработана специальная машина, в которой все эти и другие важные параметры были существенно улучшены на базе предыдущих разработок [Ставрогин, Тарасов, 2001]. Внешний вид установки и образца в сборе с датчиками нагрузки, продольной и поперечной деформации показаны на рис. 8а, б. Конструктивные особенности установки показаны на рис. 8в. Для увеличения жесткости нагружающей системы использована монолитная рама пресса и минимизированы размеры всех элементов конструкции, которые передают нагрузку на образец. Нагружающий шток гидродомкрата (желтого цвета на схеме) был выполнен в виде полого цилиндра особой конструкции для снижения инерционной массы. Рабочий ход гидродомкрата был уменьшен до 5 мм (вместо 100 мм в обычных установках), что существенно снизило объемы нагрузочной и разгрузочной камер, а

следовательно, и объемы рабочей жидкости, который необходимо перемещать во время спонтанных режимов разрушения. Данные изменения позволили достигать скорости вариации нагрузки (скорость реакции нагружающей системы) до значений 24 000 ГПа/сек. Проведенные эксперименты показали, что даже такой высокой скорости недостаточно, чтобы обеспечить полный контроль запредельного разрушения при боковых давлениях, соответствующих сейсмогенным глубинам. Однако полученные результаты позволили установить закономерности процесса разрушения в таких условиях нагружения.

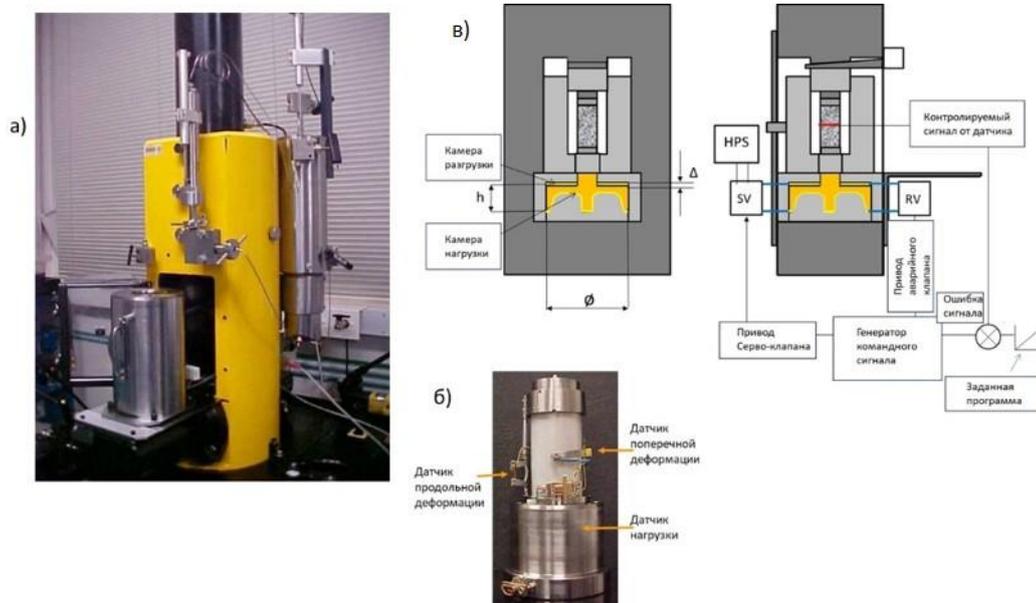


Рис. 8. Общий вид (а) и конструкционные особенности машины (б, в), созданной для изучения запредельных свойств прочных горных пород при высоких давлениях σ_3 .

Полученные результаты показали, что свойства прочных пород при разрушении за пределом прочности при высоких σ_3 фундаментально отличаются от общепринятых представлений. Для широкомасштабного изучения этих свойств нужны специальные машины нового поколения, принцип создания которых стал понятен после обнаружения этих аномальных свойств.

Основные результаты экспериментов

Рисунки 9 и 10 демонстрируют типичные особенности поведения прочных горных пород при разных уровнях бокового давления σ_3 [Tarasov, Randolph, 2008, 2011; Tarasov, 2010; Tarasov, Stacey, 2017]. На рисунке 9а показана серия кривых «напряжение–деформация», полученных на образцах долерита с прочностью на одноосное сжатие 300 МПа. Разрушение при одноосном сжатии и при низких боковых давлениях $\sigma_3 = 10$ и 30 МПа было полностью контролируемым за пределом прочности. Важной особенностью запредельного поведения прочных пород является изменение запредельного модуля с класса I ($M = d\sigma/d\varepsilon < 0$) на класс II ($M = d\sigma/d\varepsilon > 0$) с увеличением σ_3 . Красные пунктирные линии на графиках отражают запредельные модули (или модули спада). Изменение модулей связано с изменением механизмов разрушения, что будет подробно обсуждаться дальше. При более высоких боковых давлениях, начиная с уровня $\sigma_3 = 60$ МПа, контроль разрушения за пределом прочности был возможен только на начальной стадии (до точки А), после чего следовало спонтанное бурное разрушение, связанное с развитием трещины сдвига, показанной на образце на рис. 9в. Нужно подчеркнуть, что уровень $\sigma_3 = 60$ МПа соответствует условно глубине в 2.5 км в земной коре. Будет показано, что эта глубина для данной

породы представляет верхний уровень сейсмогенного слоя. При более высоких σ_3 спонтанное разрушение становится еще более бурным.

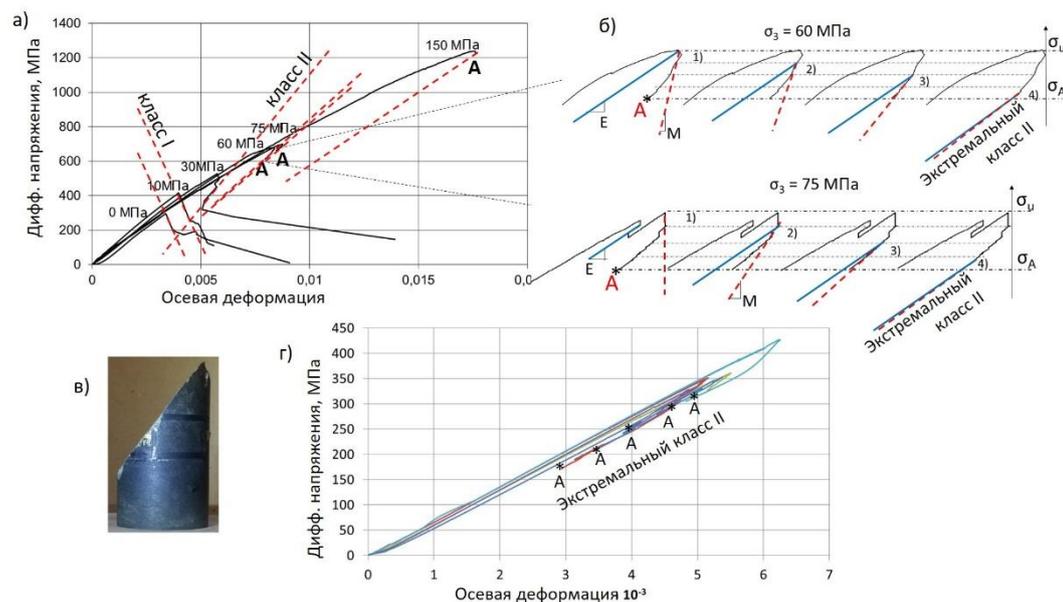


Рис. 9. Экспериментальные диаграммы «напряжение–деформация», демонстрирующие первое anomальное свойство прочных пород при разрушении в условиях высоких σ_3 , соответствующих сейсмогенным глубинам. На определенной стадии запредельного разрушения модуль запредельной деформации совпадает с модулем упругой разгрузки, что означает отсутствие поглощения энергии при разрушении.

Причина потери контроля за процессом запредельного разрушением после точки А объясняется на рис. 9б. Здесь показаны увеличенные фрагменты диаграмм, включающие запредельные участки до точки А, для давлений $\sigma_3 = 60$ и 75 МПа. Эти фрагменты продублированы четыре раза, а запредельная часть разделена на четыре стадии. На каждой стадии синей линией показан модуль упругой разгрузки $E = d\sigma/d\varepsilon$, а красной пунктирной линией показаны модули спада $M = d\sigma/d\varepsilon$. Модуль упругой разгрузки, определенный экспериментально для $\sigma_3 = 75$ МПа на пределе прочности (см. график), остается постоянным на стадии разрушения до точки А. Запредельный же модуль меняется очень сильно и приближается к модулю упругой разгрузки. Площади, расположенные между модулями Е и М, отражают энергоёмкость разрушения на каждой стадии. В точке А эти модули почти сравниваются, что означает, что энергоёмкость разрушения приблизилась к нулю. Запредельное разрушение, происходящее практически без поглощения энергии, классифицируется как экстремальное класс II.

В этом случае обеспечить контролируемое разрушение можно только на машинах с супервысокими скоростями работы сервосиловых систем. Таких машин сегодня не существует. Опыт показал, что специальная машина, на которой проводились данные эксперименты, может контролировать экстремальное класс II разрушение при более низких исходных нагрузках, чем для рассмотренного долерита, где напряжение на пределе прочности было около $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 \approx 700$ МПа. Например, экстремальное класс II поведение было получено на пяти образцах кварцита (см. рис. 9г), у которых предел прочности был в диапазоне $\Delta\sigma \approx 350 \div 400$ МПа. *Экстремальное класс II разрушение прочных пород при напряженных состояниях, соответствующих сейсмогенным глубинам, является первым anomальным свойством этих пород.*

Нужно отметить, что при испытании кварцита, аналогично долериту, после запредельной стадии, соответствующей точке А, стартовало спонтанное разрушение, предотвратить которое было невозможно. Применяемая в экспериментах аппаратура была настроена так, что в момент начала спонтанного разрушения включалась скоростная запись, которая регистрировала сигналы от датчиков во времени с быстродействием до 10^6 событий в секунду. Полученные графики «напряжение–время», построенные по данным датчика нагрузки для образцов долерита, показаны на рис. 10. Эти графики демонстрируют, что при разрушении прочность образцов снижается до значений, приближающихся к нулю σ_{\min} , а затем поднимается до уровня остаточной прочности, определяемой трением по образованной трещине сдвига σ_{fs} . *Снижение прочности породы во время разрушения при напряженных состояниях, соответствующих сейсмогенным глубинам, до значений близких к нулю, является второй аномальной особенностью прочных пород.*

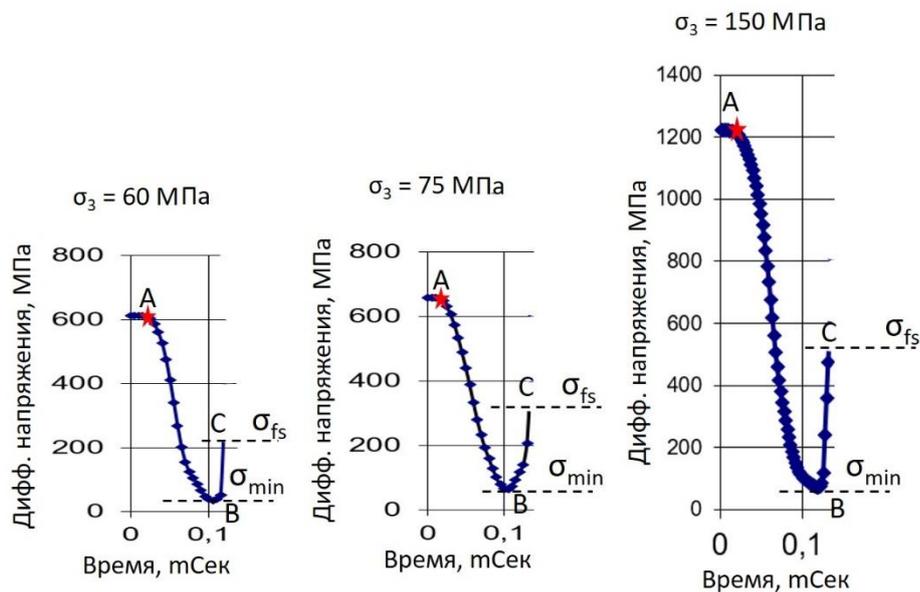


Рис. 10. Экспериментальные диаграммы «нагрузка–время», демонстрирующие второе аномальное свойство прочных пород при разрушении в условиях высоких σ_3 , соответствующих сейсмогенным глубинам. В процессе разрушения прочность образцов снижается до значений близких к нулю σ_{\min} , а в конце разрушения восстанавливается до уровня остаточной (фрикционной) прочности σ_{fs} .

СМЕНА МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ С РОСТОМ БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Обнаруженный характер изменения запредельных свойств горных пород с ростом бокового давления σ_3 вызван изменением механизмов разрушения, как показано на рис. 11. На горизонтальной оси уровень σ_3 возрастает слева направо от нуля до величин, условно соответствующих глубинам в земной коре за пределами сейсмогенного слоя. Вдоль оси показаны фрагменты горных пород с изображением механизмов разрушения при разных σ_3 . Известно, что при любом σ_3 разрушение сопровождается возникновением трещин отрыва, которые растут вдоль действия максимального главного напряжения σ_1 . Однако размер трещин отрыва (длина ℓ) зависит от уровня σ_3 и уменьшается с его увеличением, условно в соответствии с пунктирной кривой. Изменение размера трещин отрыва, в свою очередь, меняет макроскопический механизм разрушения. На схеме представлено чередование механизмов разрушения с ростом σ_3 .

При низких боковых давлениях длинные трещины отрыва не допускают развитие трещин сдвига в своей плоскости, поэтому образуются следующие формы разрушения:

1. Разрушение длинными трещинами отрыва происходит при одноосном сжатии и при низких $\sigma_3 < \sigma_{3(1)}$.
2. Разрушение за счет накопления микротрещин отрыва в объеме породы с последующим их объединением в макроскопическую плоскость разрушения происходит в диапазоне боковых давлений $\sigma_{3(1)} \div \sigma_{3\text{shear}}$.

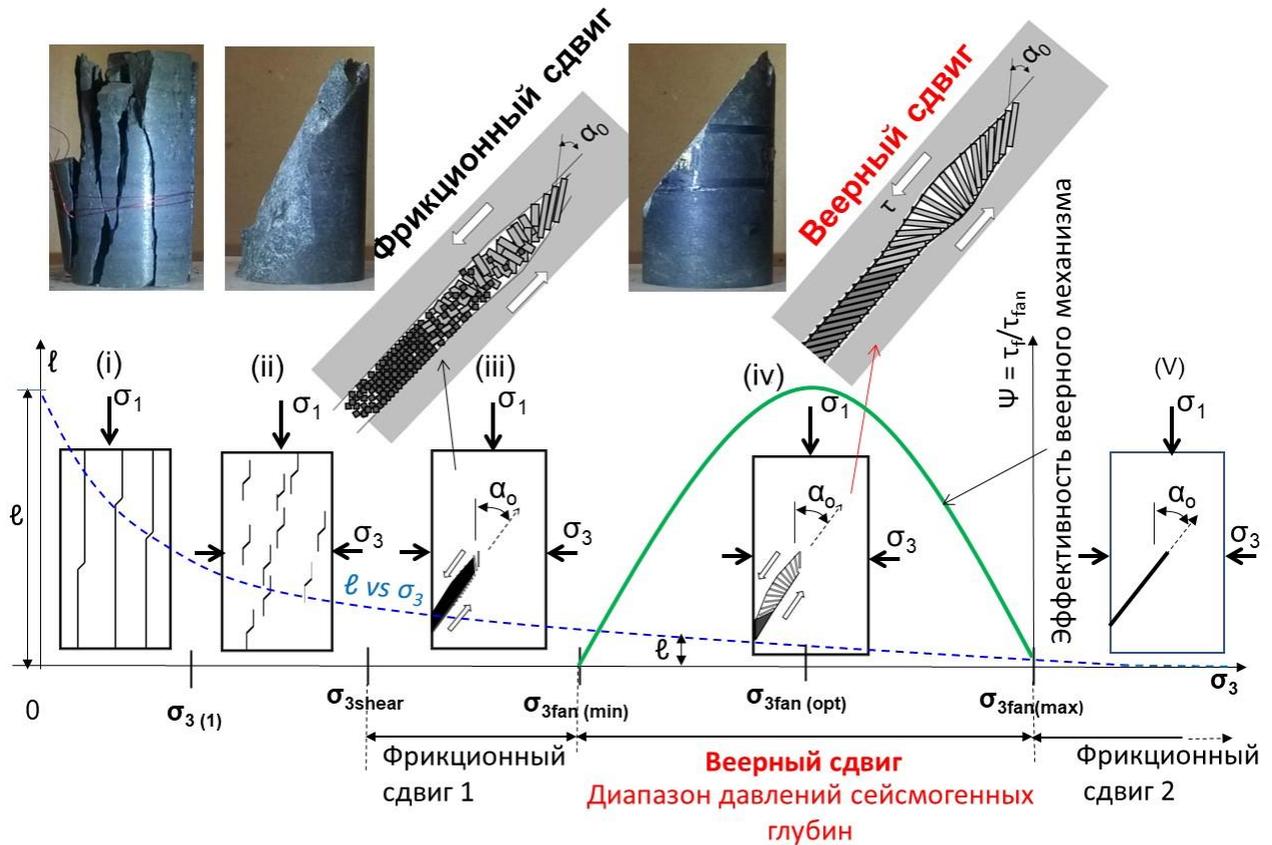


Рис. 11. Модель, объясняющая вариацию механизмов разрушения прочных горных пород с ростом уровня бокового давления σ_3 . Давление растет вдоль горизонтальной оси слева направо от нуля до значений, соответствующих глубинам ниже сейсмогенного слоя.

При более высоких боковых давлениях $\sigma_3 > \sigma_{3\text{shear}}$, когда трещины отрыва становятся достаточно короткими, макроскопическое разрушение происходит в виде локализованных трещин сдвига. Здесь рассеянное накопление дефектов в объеме тела в виде микротрещин отрыва запрещено давлением σ_3 . Это доказано экспериментально и теоретически при изучении акустической эмиссии [Reches, Lockner, 1994]. Было установлено, что макроскопическая трещина сдвига в этих условиях растет за счет последовательного образования эшелона трещин отрыва, совокупность которых формирует типичную пластинчатую структуру сдвиговых трещин, показанную на рис. 3. Угол α_0 наклона макроскопической трещины сдвига по отношению к трещинам отрыва составляет $30^\circ \div 40^\circ$ (см. рис. 11) [Horii, Nemat-Nasser, 1985; Reches, Lockner, 1994]. При сдвиге берегов трещины структурные пластинки подвергаются развороту [Peng, Johnson, 1972; King, Sammis, 1992; Reches, Lockner, 1994]. Различное поведение структурных пластин при развороте создает трещины сдвига с фундаментально различными свойствами.

3. *Фрикционный сдвиг 1* происходит в диапазоне боковых давлений $\sigma_{3\text{shear}} \div \sigma_{3\text{fan}(\text{min})}$. Здесь относительно длинные пластинки при вращении подвергаются разрушению, создавая трение по всей длине трещины, включая головную часть. Этот механизм разрушения соответствует классическим теориям.
4. *Веерный сдвиг* происходит в диапазоне боковых давлений $\sigma_{3\text{fan}(\text{min})} \div \sigma_{3\text{fan}(\text{max})}$, соответствующих сейсмогенным глубинам [Tarasov, 2008, 2010, 2011, 2013, 2014]. При этих условиях структурные пластины приобретают такую геометрию, что они могут поворачиваться без разрушения и играть роль шарниров между сдвигающимися берегами магистральной трещины. Вследствие того, что относительный сдвиг между берегами трещины увеличивается с ростом расстояния от кончика трещины (см. верхний график на рис. 4), то пластинки по мере удаления от кончика будут разворачиваться на больший угол, таким образом формируя веерную структуру. Веерная структура при таких условиях разрушения представляет голову развивающейся трещины, которая перемещается в виде волны. Нужно подчеркнуть, что в реальных трещинах количество пластин, образующих веер, может достигать нескольких тысяч. Такая многочисленная «команда» пластин, сделанных из пород высокой прочности, может выдерживать, не разрушаясь при вращении, высокие нормальные напряжения, соответствующие сейсмогенным глубинам. Как уже упоминалось, веерный механизм обладает рядом феноменальных свойств, главные из которых – это низкое сопротивление сдвигу и высокая концентрация напряжений.

Важно подчеркнуть, что в диапазоне давлений $\sigma_{3\text{fan}(\text{min})} \div \sigma_{3\text{fan}(\text{max})}$ веерный механизм работает с переменной эффективностью, которая отображается зеленой кривой на рис. 11. Эффективность определяется тем, насколько хорошо структурные пластины выполняют роль шарниров между сдвигающимися берегами трещины. От этого зависит, в частности, соотношение между величиной фрикционного трения τ_f и веерной прочностью τ_{fan} , выражаемое коэффициентом эффективности $\psi = \tau_f / \tau_{\text{fan}}$. При нижнем уровне σ_3 веерного диапазона давлений длина пластинок относительно велика, и они частично разрушаются, обеспечивая низкую эффективность. С ростом σ_3 пластины укорачиваются и эффективность растет. При некотором оптимальном давлении $\sigma_{3\text{fan}(\text{opt})}$ эффективность достигает максимального уровня. При более высоких давлениях эффективность снижается, что вызвано продолжающимся уменьшением длины трещин отрыва, а следовательно, и длины пластинок. При давлениях свыше $\sigma_{3\text{fan}(\text{max})}$ короткие пластинки полностью теряют способность работать как шарниры.

5. *Фрикционный сдвиг 2* происходит при давлениях $\sigma_3 > \sigma_{3\text{fan}(\text{max})}$, которые действуют на глубинах ниже нижней границы сейсмогенного слоя.

Фундаментальная разница запредельных свойств при фрикционном и веерном сдвиге

В данном разделе обсуждается фундаментальная разница между запредельными характеристиками образцов прочных пород, при разрушении фрикционными и веерными сдвиговыми трещинами. На рисунке 12а показана принципиальная схема развития фрикционной трещины сдвига в образце при боковых давлениях, соответствующих диапазонам давлений $\sigma_{3\text{shear}} \div \sigma_{3\text{fan}(\text{min})}$ и $\sigma_3 > \sigma_{3\text{fan}(\text{max})}$, обозначенным на рис. 11. Процесс показан в пяти стадиях. Стадия 1 соответствует пределу прочности. Снижение прочности образца в запредельной области связано с удлинением трещины сдвига, в которой сопротивление сдвигу определяется трением. На рисунке 12б–г показаны диаграммы «напряжение–деформация». Рисунок 12б соответствует ситуации на пределе прочности, где площадь красного

треугольника условно отображает упругую энергию, запасенную на данной стадии нагружения. Диаграммы на рис. 12в, г отображают возможные классы запредельного разрушения (класс I и класс II), которые могут реализоваться в обоих диапазонах боковых давлений. Класс I характеризуется отрицательным значением запредельного модуля (или модуля спада) $M = dt/d\varepsilon < 0$, а класс II характеризуется положительным модулем $M = dt/d\varepsilon > 0$.

На запредельных диаграммах обоих классов каждая точка обозначает аналогичную стадию разрушения образца. На стадии 5 образец полностью разрушен и его прочность соответствует остаточной прочности, определяемой трением по образованной трещине. Для создания трещины сдвига класса I (рис. 12в) за пределом прочности потребляется большое количество энергии, которая обозначается светло-серой зоной. Эта работа совершается за счет упругой энергии, запасенной в образце, а также за счет дополнительной энергии, поставляемой из нагружающей системы. Уменьшенный красный треугольник соответствует упругой энергии, оставшейся в образце после разрушения до остаточной прочности.

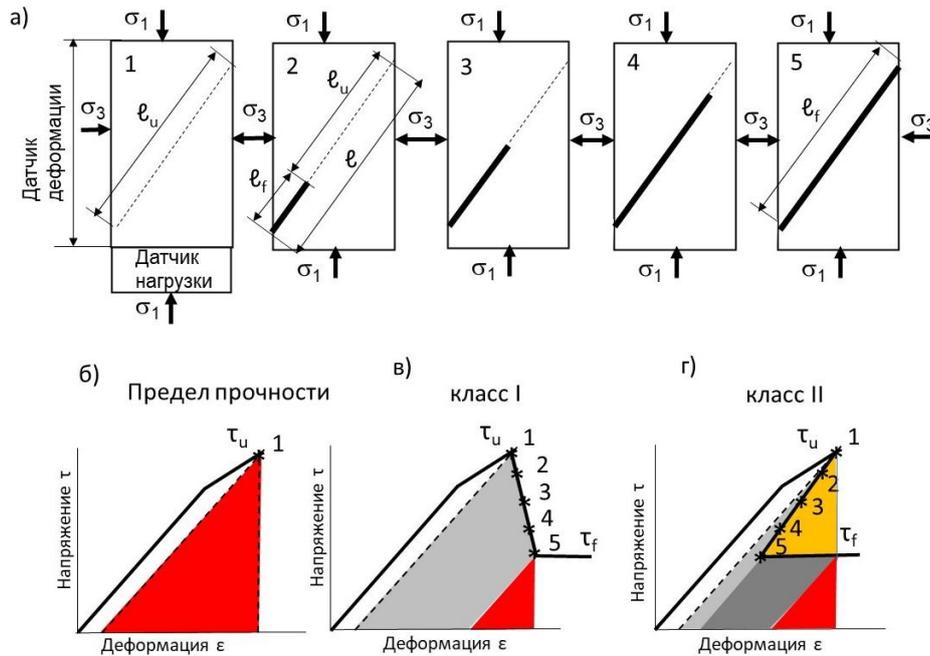


Рис. 12. Характер запредельных кривых при разрушении горных пород классическими механизмами разрушения, где за кончиком трещины сопротивление сдвигу определяется трением.

При классе II (рис. 12г) количество энергии, необходимое для развития трещины сдвига до полного разрушения образца, меньше, чем запасено в образце на пределе прочности. Поэтому процесс разрушения будет носить спонтанный характер даже при абсолютной жесткости нагружающей системы. Получение запредельной диаграммы «напряжение–деформация» для пород класса II возможно только на жестких машинах с сервоконтролем. Сервосистема дозированно разгружает образец в момент начала спонтанного процесса на всех стадиях разрушения, таким образом извлекая из образца избыточную энергию и обеспечивая стабильный и управляемый процесс разрушения. Энергия разрушения на рис. 12г показана светло-серой зоной. Темно-серая зона соответствует энергии трения при скольжении вдоль сдвиговой плоскости после разрушения. При спонтанном разрушении эта работа также выполняется

упругой энергией, накопленной в образце на пределе прочности. Желтая зона соответствует избыточной энергии, которая извлекается из образца во время сервоконтролируемого процесса разрушения. Без сервоконтроля эта энергия является источником динамического спонтанного разрушения.

Общей чертой для класса I и класса II является тот факт, что остаточная фрикционная прочность τ_f представляет минимальную прочность пород в условиях разрушения под боковым давлением. Этот факт для фрикционного сдвига является логичным. Логика состоит в том, что при наличии трещины сдвига прочность образца определяется совокупным сопротивлением сдвигу цельной части образца и растущей трещины. Уравнение (1) описывает условно запредельную прочность образца на разных стадиях разрушения, где: τ_u – прочность цельной породы, τ_f – фрикционная прочность по разлому, l – общая длина будущей трещины сдвига, l_u – длина цельной части образца, l_f – длина трещины (см. рис. 12а). Согласно уравнению (1), с ростом трещины вклад цельной породы в определение прочности образца уменьшается, а вклад трещины увеличивается. При полном разрушении прочность образца всецело определяется фрикционной прочностью τ_f . Данный взгляд используется при определении минимальной прочности литосферы, которая соответствует фрикционной прочности τ_f .

$$\tau = \tau_u \frac{l_u}{l} + \tau_f \frac{l_f}{l} \quad (1)$$

Однако прочные породы при напряженных состояниях, соответствующих сейсмогенным глубинам, разрушение которых управляется веерным механизмом, ведут себя принципиально иначе по сравнению с рассмотренным на рис. 12 классическим поведением. На рисунке 13 показаны запредельные свойства прочных пород, создаваемые веерным механизмом. На рисунке 13а показаны пять стадий запредельного разрушения. Далее будет показано, что начальное формирование веерной структуры происходит до предела прочности путем накопления локализованных трещин отрыва и структурных пластин. На пределе прочности образуется первая половина веера, что соответствует стадии 1 на рис. 13. Способность веерной структуры радикально снижать сопротивление сдвигу и усиливать приложенные напряжения проявляется при создании второй половины веера. Это происходит на стадии 1–2 и определяет экстремальный класс II поведения пород за пределом прочности (см. рис. 13б). Феноменальные способности веера достигают максимума при завершении формирования веерной структуры на стадии 2.

Феноменальные способности полной веерной структуры показаны на рис. 13в, которые состоят в уменьшении сопротивления сдвигу до значений близких к нулю ($\tau_{fan} \ll \tau_f$) и в усилении низких приложенных сдвиговых напряжений $\tau_0 \approx \tau_{fan}$ до значений, превосходящих предел прочности породы $\tau_{amp(max)} > \tau_u$. Это означает, что веер может обеспечивать развитие трещины сдвига в цельной породе даже при напряжениях $\tau_0 \approx \tau_{fan}$. Таким образом, прочность образца на стадиях разрушения 2–4 (см. рис. 13б) соответствует $\tau_{fan} \ll \tau_f$.

Разрушение прочной породы за пределом прочности при напряжениях $\tau_0 < \tau_f$ классифицируется как класс III. Образец обретает фрикционную прочность τ_f только в конце разрушения, когда веерная структура покидает образец. Энергоемкость разрушения образца веерным механизмом очень мала и соответствует серой зоне на графике. Желтая зона представляет избыточную энергию, которая в случае контролируемого разрушения извлекается из образца сервосистемой, а в случае спонтанного разрушения создает бурную динамику.

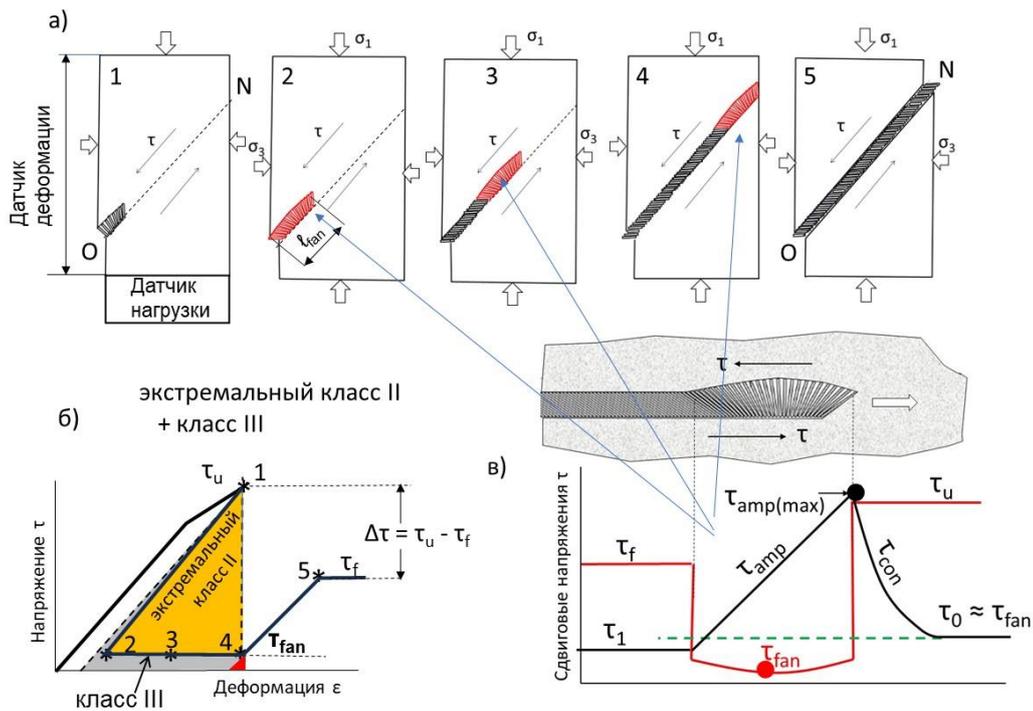


Рис. 13. Принцип создания веерным механизмом феноменальных запредельных свойств прочных горных пород при высоких σ_3 , соответствующих сейсмогенным глубинам. Эти свойства характеризуются экстремальным классом II поведением на начальной стадии разрушения и классом III на последующей стадии.

Нужно обратить внимание также на следующую общую особенность разрушения образцов цельных пород в лаборатории – на большую величину сброса напряжений (стресс дроп), который определяется как разность между предельной прочностью породы и статической фрикционной прочностью $\Delta\tau = \tau_u - \tau_{fs}$. Этот факт выдвигается как аргумент против рассмотрения разрушения цельных пород в земной коре в качестве механизма землетрясений, т. к. все землетрясения характеризуются малыми величинами стресс дроп [Brace, Byerlee, 1966]. Будет показано, что *in situ* реализуется иной принцип активизации веерного механизма, чем в лабораторных образцах, благодаря которому создание новых динамических разломов сопровождается малыми величинами стресс дроп.

Супер-хрупкость горных пород в условиях сейсмогенных глубин и универсальная шкала хрупкости

Спонтанное макроскопическое разрушение горных пород при сжатии может происходить только за пределом прочности. Если рассматривать хрупкость пород при сжатии как способность к саморазрушению за счет внутренней упругой энергии, запасенной на пределе прочности, то наиболее объективными критериями являются критерии, построенные на базе запредельного баланса энергии [Cook, 1965; Петухов, Линьков, 1983; Ставрогин, Протосеня, 1985]. Здесь мы описываем критерий, который имеет наиболее ясную физическую основу и позволяет создать универсальную шкалу хрупкости [Tarasov, 2011; Tarasov, Potvin 2013].

Универсальная шкала хрупкости показана на рис. 14. Она представлена графически серией схематичных диаграмм «напряжение–деформация», включающих допредельную и запредельную части. Запредельные модули класса I на диаграммах показаны пунктирными синими линиями, а модули класса

II показаны пунктирными красными линиями. Серые площади на диаграммах отражают энергоемкость запредельного разрушения W_r , а площади под красным треугольниками соответствуют упругой энергии W_e , запасенной в разрушаемом материале на пределе прочности. Для того чтобы наиболее четко выявить влияние запредельных характеристик на хрупкость пород, допредельная часть на всех диаграммах принята одинаковой.

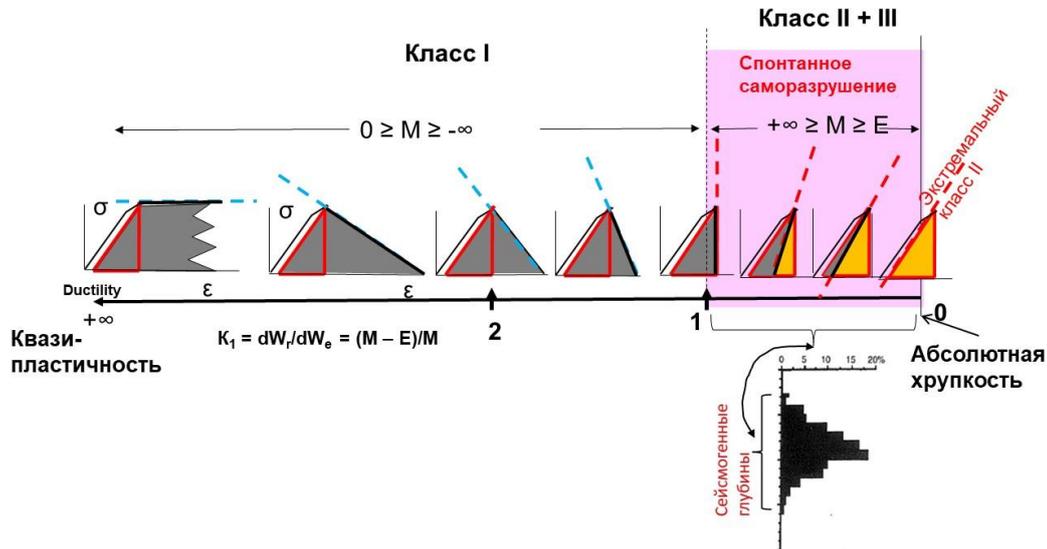


Рис. 14. Универсальная шкала хрупкости, представленная графически серией схематичных диаграмм «напряжение–деформация», включающих допредельную и запредельную части. Шкала отражает степень склонности породы к саморазрушению за счет внутренней энергии, запасенной в разрушаемом материале. Розовая зона соответствует состоянию спонтанного саморазрушения.

Критерий хрупкости определяется как отношение энергии запредельного разрушения к упругой энергии, выделившейся из породы в процессе разрушения. На базе баланса энергии полного разрушения критерий выглядит так:

$$K = W_r / W_e. \quad (2)$$

Для определения хрупкости на любой стадии запредельного разрушения, критерий K_1 выражается соответствующими долями энергии, которые могут быть определены через локальные модули упругости E и спада M :

$$K_1 = \frac{dW_r}{dW_e} = \frac{M - E}{M}. \quad (3)$$

С физической точки зрения данный критерий характеризует степень склонности пород к саморазрушению и меняется от $K = 0$ до $K = \infty$, т. е. от абсолютной хрупкости до квазипластичности. Абсолютная хрупкость является гипотетическим понятием. Здесь разрушение происходит без поглощения энергии (серая зона на графике отсутствует) и вся упругая энергия целиком переходит в динамические формы энергии, представленные желтой зоной. Запредельный модуль в этом случае полностью совпадает с модулем упругой разгрузки и характеризуется как экстремальный класс II. В диапазоне коэффициента хрупкости K от 0 до 1 порода находится в состоянии спонтанного саморазрушения за счет

превосходства упругой энергии, запасенной в разрушающемся материале, над энергией разрушения. Состояние пород при хрупкости близкой к абсолютной хрупкости характеризуется как суперхрупкое. Этим свойством обладают породы, находящиеся на сейсмогенных глубинах в условиях сильного объемного сжатия. Процесс разрушения в этих условиях осуществляется веерным механизмом. Породы, находящиеся на меньших и больших глубинах (за пределами сейсмогенного слоя), разрушаются другими механизмами (см. рис. 11) и характеризуются большими значениями коэффициента хрупкости $K > 1$.

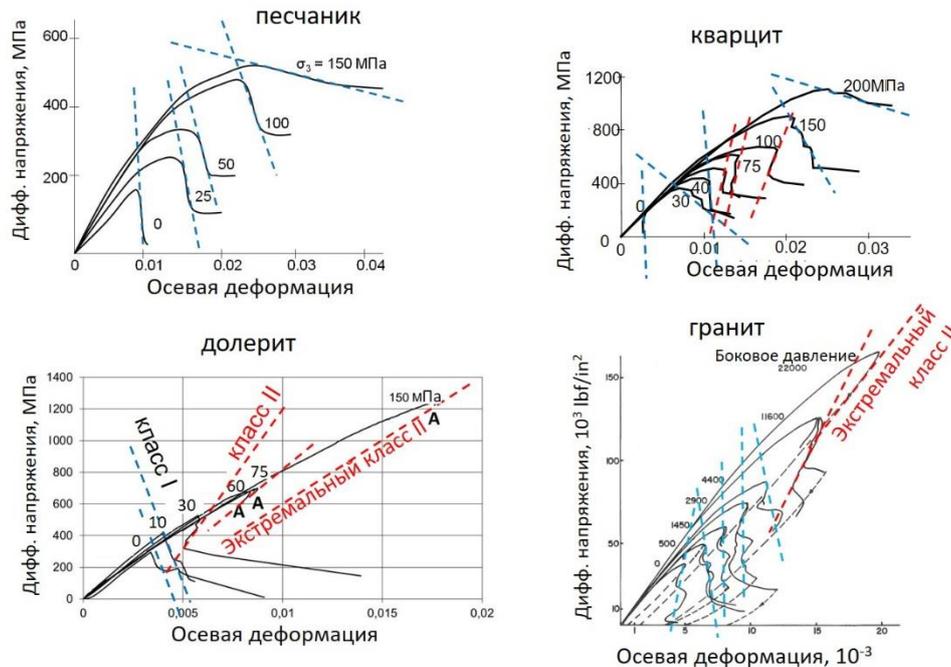


Рис. 15. Полные диаграммы «напряжение–деформация» для различных пород, испытанных при разных уровнях бокового давления σ_3 , демонстрируют влияние σ_3 на запредельные модули, которые представлены синими пунктирными линиями для класса II и красными пунктирными линиями для класса III.

Используя универсальную шкалу хрупкости, можно оценить, как меняется хрупкость различных пород с изменением уровня бокового давления σ_3 , т. е. глубины. На рисунке 15 показаны диаграммы «напряжение–деформация», полученные на образцах песчаника, кварцита, долерита и гранита, испытанных при разных уровнях σ_3 . Запредельные модули $M = d\sigma/d\varepsilon$ для класса I показаны синими пунктирными линиями, а для класса II – красными пунктирными линиями.

На базе этих кривых рассчитаны значения коэффициента хрупкости K для всех пород при разных σ_3 и построены графики в координатах «хрупкость K – боковое давление σ_3 » (рис. 16а). Из графиков видно, что хрупкость песчаника при всех уровнях σ_3 характеризуется как класс I и снижается с ростом σ_3 . У кварцита при низких давлениях хрупкость соответствует классу I, но при более высоких давлениях в диапазоне σ_3 между 40 и 130 МПа хрупкость характеризуется как класс II, и порода находится в состоянии спонтанного саморазрушения. Максимальная хрупкость достигается при $\sigma_3 = 100$ МПа. При давлениях свыше $\sigma_3 = 130$ МПа хрупкость возвращается в класс I.

Гранит и долерит подобно кварциту при низких σ_3 имеют хрупкость класса I, но с увеличением σ_3 резко увеличивают хрупкость и входят в состояние спонтанного саморазрушения. При давлении $\sigma_3 = 150$ МПа их хрупкость становится более чем в 200 раз более высокой по сравнению с одноосным сжатием.

При этих и более высоких давлениях показатели хрупкости данных пород приближаются к абсолютной хрупкости, что означает суперхрупкое состояние. Можно предположить, что максимальная хрупкость достигается при $\sigma_3 = 300$ МПа (что соответствует примерно глубине в 8–10 км), а затем снижается подобно кварциту. Такая вариация хрупкости с ростом σ_3 определяет соответствующую типичную вариацию количества землетрясений с глубиной, как показано на рис. 16б. Чем выше хрупкость пород, тем выше частота землетрясений.

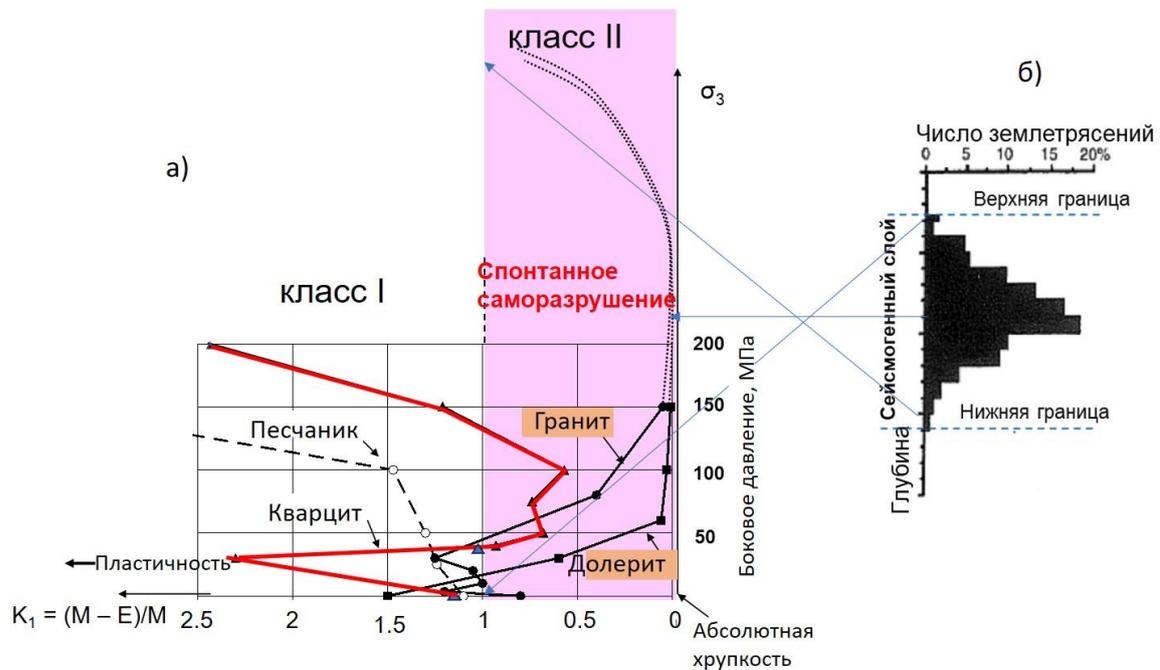


Рис. 16. Диаграммы изменения хрупкости различных пород с ростом уровня бокового давления σ_3 . Розовая зона соответствует состоянию спонтанного саморазрушения.

Полный паспорт прочности горных пород

Как показали эксперименты, наряду с хрупкостью веерный механизм определяет также прочность пород на сейсмогенных глубинах. Для характеристики прочности с глубиной необходимо определять полные паспорта прочности, как показано на рис. 17а. Сегодня паспорта прочности отражают только изменение абсолютной прочности τ_u и фрикционной прочности τ_f с ростом уровня бокового давления σ_3 . Но в определенном диапазоне σ_3 , в случае активизации веерного механизма, прочность пород радикально снижается. Вследствие зависимости эффективности работы веерного механизма от уровня σ_3 (см. рис. 11), величина веерной прочности τ_{fan} также соответственно варьируется. Это отражается красной кривой на паспорте прочности. Нужно отметить, что диапазон сейсмогенных глубин, определяемых веерным механизмом, соответствует диапазону боковых давлений, где веерная прочность ниже фрикционной прочности $\tau_{fan} < \tau_f$. Этот диапазон на паспорте находится между $\sigma_{3fan(min)}$ и $\sigma_{3fan(max)}$.

На рисунке 17 показан принцип построения полного паспорта прочности. Для этого необходимо получать экспериментально полные кривые «напряжение–деформация» при разных уровнях σ_3 . Диаграмма на рис. 17б получена при $\sigma_3 = \sigma_{3fan(opt)}$, при котором веерный механизм проявляет максимальную эффективность, снижая прочность цельных пород до уровня τ_{fan} . Значения τ_u и τ_f также

определяются по данной диаграмме. Диаграмма на рис. 17в получена при другом уровне σ_3 , при котором эффективность веерного механизма ниже. Все три характеристики прочности с нее переносятся соответственно на полный паспорт прочности.

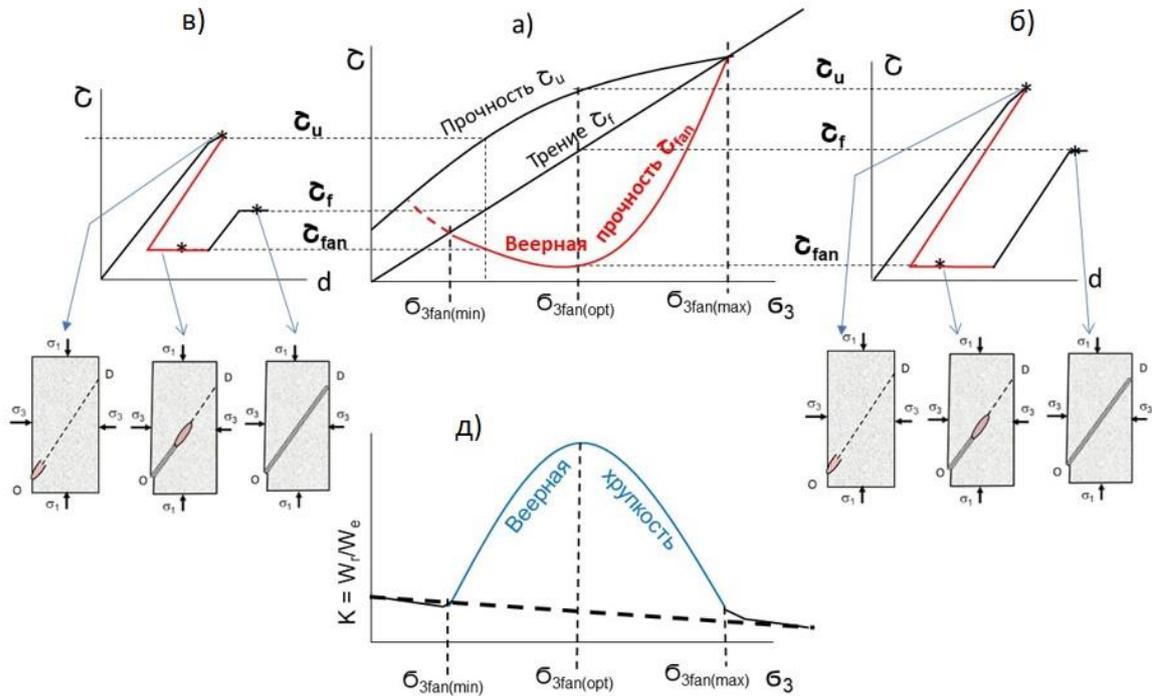


Рис. 17. Принцип построения полного паспорта прочности (а) и хрупкости (д) горных пород по экспериментальным диаграммам «напряжение – деформация», включающих полную запредельную характеристику (в) и (б).

График на рис. 17д показывает полный паспорт хрупкости пород при сжатии. Пунктирная линия отражает классические представления о снижении хрупкости пород с глубиной. Веерный механизм меняет это картину. В диапазоне сейсмогенных глубин хрупкость резко возрастает. Таким образом, веерный механизм формирует два важнейших свойства горных пород, которые являются определяющими при создании землетрясений на сейсмогенных глубинах земной коры, т. е. прочность и хрупкость.

О технике нового поколения для изучения запредельных свойств прочных пород при напряженном состоянии сейсмогенных глубин

Рассмотренные выше экспериментальные результаты показывают, что прочные горные породы при напряженных состояниях, соответствующих сейсмогенным глубинам, проявляют резко выраженные аномальные запредельные свойства, выражающиеся в низкой прочности и высокой хрупкости. Важно еще раз подчеркнуть, что вся существующая сегодня в мире испытательная техника (жесткие сервоконтролируемые машины) не годится для экспериментального изучения запредельных свойств прочных горных пород в таких условиях. Поэтому эти свойства остаются неисследованными, а понимание динамических процессов на сейсмогенных глубинах неверным. Созданная автором испытательная машина (см. рис. 8) не является совершенной и позволила лишь обнаружить аномальные свойства прочных пород при высоких σ_3 . Эти свойства следующие:

- экстремальный класс II на начальной стадии разрушения;
- аномально низкая прочность на последующей стадии разрушения (класс III);

- аномально низкая энергоемкость разрушения;
- аномально высокое выделение свободной энергии, которая переходит в динамические виды энергии при спонтанном разрушении.

Для широкомасштабных исследований свойств пород при напряженных состояниях, соответствующих сейсмогенным глубинам, необходимо создание испытательной техники нового поколения. Диаграммы на рис. 18 иллюстрируют недостатки существующих машин (включая машину автора) и подсказывают путь решения проблемы. Слева на рис. 18 показана диаграмма «напряжение–деформация», а справа диаграмма «напряжение–время» для долерита, испытанного при боковом давлении $\sigma_3 = 150$ МПа. Точка А на диаграммах соответствует началу спонтанного разрушения за пределом прочности. Красные линии отражают истинные характеристики породы, которые были недоступны в эксперименте.

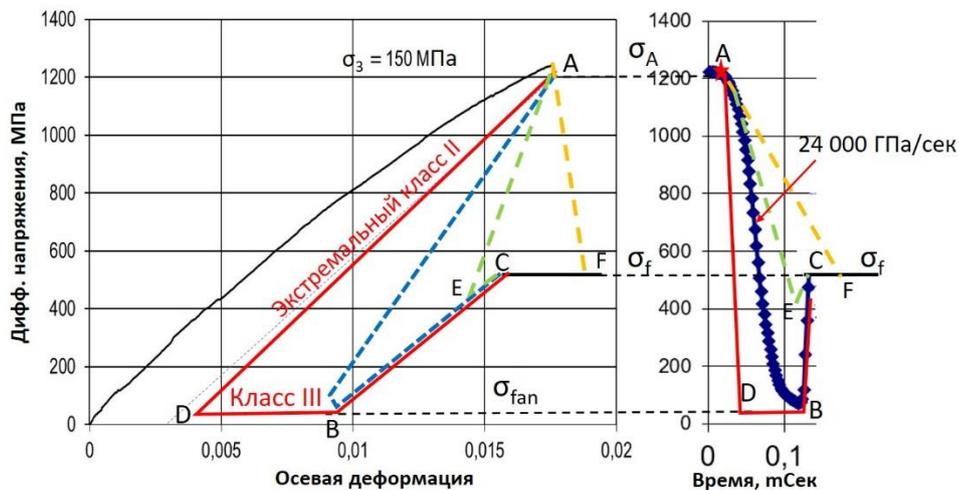


Рис. 18. Иллюстрация зависимости характера регистрируемых в эксперименте кривых за пределом прочности для прочных пород при высоких боковых давлениях σ_3 от скорости реакции (нагрузка–разгрузка) испытательной машины.

Из диаграммы «напряжение–время» видно, что весь процесс разрушения от уровня напряжения σ_A до остаточной прочности σ_f длился около 0.1 мСек. Синий график показывает скорость разгрузки–нагрузки, которую обеспечила сервоконтролируемая машина во время разрушения. Такой скорости разгрузки (24 000 ГПа/сек) оказалось недостаточно, чтобы остановить процесс разрушения. Для контролируемого разрушения график разгрузки машины должен совпадать с красным графиком. Здесь нужно отметить, что использованная в эксперименте машина, все же позволила проникнуть в «запретную зону» низкой прочности породы, которая проявляется во время разрушения из-за действия веерного механизма.

Современные методики эксперимента принципиально не позволяют проникнуть в эту область. Дело в том, что веерный механизм создает условия дуализма в проявлении прочности пород. Причины и проявление дуализма прочности пород, создаваемого веерным механизмом, обсуждаются в [Tarasov, 2017, 2019]. Вследствие дуализма прочности, достижение минимального уровня прочности, создаваемого веерным механизмом σ_{fan} , возможно только при высокой скорости разгрузки. При низких скоростях разгрузки датчик нагрузки запишет кривые, показанные зеленым и желтым цветами. Эти кривые выходят сразу на остаточную (фрикционную) прочность, а веерная прочность σ_{fan} , соответствующая классу III, остается «незамеченной».

Для обеспечения полного контроля за процессом запредельного разрушения, скорость реакции (скорость разгрузки–нагрузки) новой машины должна быть увеличена в несколько раз по сравнению с машиной, использованной автором в описанных экспериментах. Этого можно достичь при существенном уменьшении инерционной массы нагружающего гидродомкрата, увеличивая рабочее давление жидкости в нем в несколько раз. Проблема состоит в том, что для этого необходимо создавать новые сервоклапаны, работающие при таких высоких давлениях. Требуемое рабочее давление в клапанах должно быть не менее 100 МПа. В настоящее время таких клапанов не существует.

СТРУКТУРА РАЗЛОМОВ КАК КЛЮЧ К ПОНИМАНИЮ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ

Структура динамических трещин сдвига (разломов) является ключом в понимании механизма разрушения, работающего при напряженных состояниях, соответствующих сейсмогенным глубинам. В дополнение к тому, что уже было сказано о структуре разломов, здесь приводятся некоторые важные результаты наблюдений за поведением структуры во время роста разломов.

Поскольку разломы, образующиеся *in situ*, имеют большие размеры по сравнению с трещинами в лабораторных образцах, то элементы структуры в них наиболее ясно различимы. Самые масштабные наблюдения за развитием динамических разломов (трещин сдвига) в природных условиях сейсмогенных глубин были проведены в глубоких выработках Южной Африки, где разломы создавали мощные горные удары [McGarr et al., 1979; Ortlepp, 1997; Ortlepp et al., 2005]. Общий вид таких разломов показан схематически на рис. 19а [Ortlepp, 1997]. Эта схема включает также каналы, проделанные в массиве горных пород для изучения структуры разломов изнутри. Ortlepp отмечал, что пространство между берегами разломов заполнено рядами плиток, образованных из изначально цельной горной породы эшелонам трещин отрыва. Структурные плитки по форме похожи на кафельные плитки. Все поле между берегами разлома, покрытое слоем структурных плиток, выглядит как рыба чешуя на поверхности рыбы (см. рис. 19б, в). На рисунке каждый квадратик условно обозначает плитку, а синими пунктирными линиями выделен один из рядов плиток.

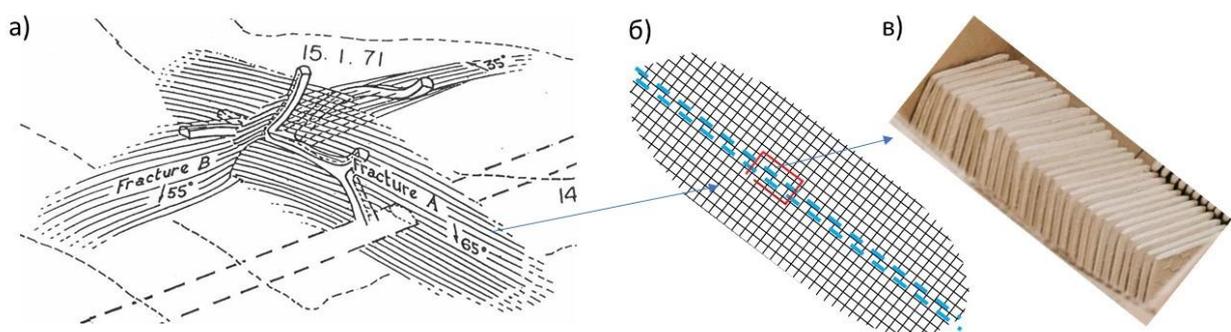


Рис. 19. а – Общий вид разломов, вызвавших мощные горные удары в одной из ультраглубоких рудников Южной Африки [Ortlepp, 1979], б – внутренняя структура разломов, состоящая из множества рядов структурных плиток, похожих на кафельные плитки (в).

Плитки подвергаются развороту при сдвиге берегов разлома. Особенности этого процесса показаны на рис. 20. Здесь изображены срезы разломов (вид структуры разломов в профиль). Исследователи отмечали, что структурные пластинки формируются как результат последовательного образования трещин отрыва на кончике развивающегося разлома [Peng, Johnson, 1972; Ortlepp, 1979;

Horii, Nemat-Nasser, 1985; King, Sammis, 1992]. Трещины отрыва при их образовании сориентированы вдоль действия главного напряжения σ_1 и составляют угол $\alpha_0 = 30^\circ \div 40^\circ$ по отношению к плоскости разлома в зависимости от условий нагружения. На рисунке 20а видно, что при начальном угле $\alpha_0 = 30^\circ$ угол поворота пластин в разных разломах составляет $\beta = 35^\circ, 60^\circ$ и 95° .

Лабораторные эксперименты, в которых контроль на запредельной стадии разрушения был возможен, показали, что структурные пластинки разрушаются при развороте, создавая трение между берегами трещины. Такое поведение согласуется с классическими теориями разрушения. На рисунке 20б такой механизм разрушения соответствует фрикционному сдвигу. Однако при высоких боковых давлениях, соответствующих сейсмогенным глубинам (см. рис. 11), экспериментальное изучение поведения структуры на стадии запредельного разрушения не представляется возможным из-за неуправляемого спонтанного характера разрушения. Анализ изменения механизмов разрушения с ростом бокового давления (см. рис. 11) дает основание считать, что при сейсмогенных давлениях σ_3 геометрия структурных пластинок становится устойчивой при развороте, что приводит к образованию веерной структуры в голове трещины, где пластинки играют роль шарниров между сдвигающимися берегами. Геометрия пластинок характеризуется соотношением длины l к ширине w , как показано на рис. 20б для веерного сдвига.

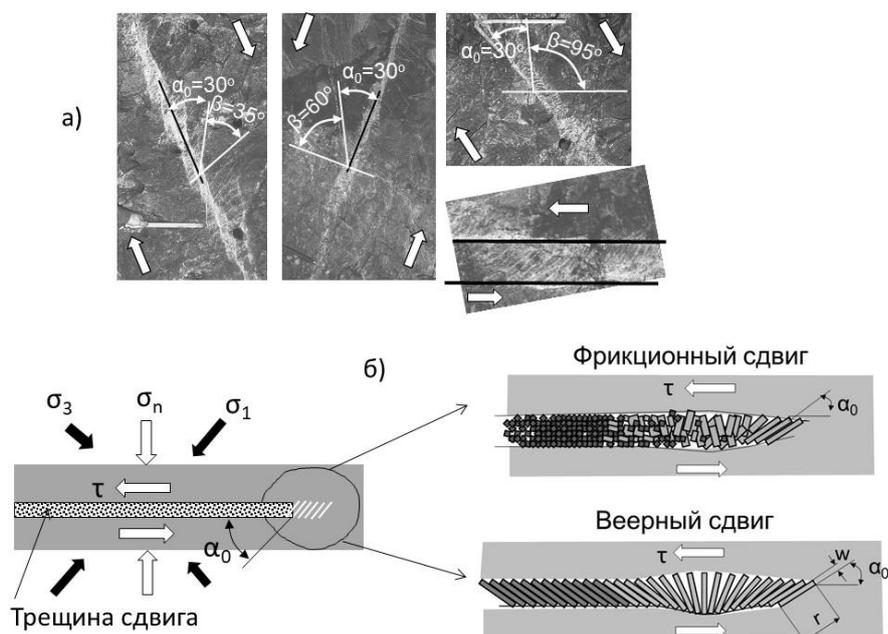


Рис. 20. а – Иллюстрация разворота структурных пластинок при сдвиге берегов разломов, б – разворот пластинок при сдвиге, вызывающий разломом пластинок, ведет к фрикционному механизму разрушения, а при сохранении целостности пластинок, ведет к веерному механизму разрушения.

Отметим еще два важных свойства спонтанных трещин сдвига, которые наблюдаются в экспериментах. Первое свойство касается возможности распространения трещины из очага в противоположных направлениях (bilateral rupture) [Lu et al., 2007; Ngo et al., 2012]. С точки зрения веерного механизма такая ситуация отображена на рис. 21а. В этом случае развиваются две веерные структуры, у которых зоны растяжения (помечены красным) находятся на противоположных сторонах плоскости

трещины. Две веерные головы трещины разбегаются в противоположные стороны, увеличивая разломанное пространство между ними.

Второе свойство состоит в том, что на виде в плоскости рост разбегающейся трещины выглядит как показано на рис. 21б. Трещина стартует из очага, где происходит накопление начальной трещиноватости, регистрируемой в виде акустической эмиссии, а затем распространяется спонтанно, образуя фронт разрушения. Перемещение фронта сопровождается интенсивным процессом образования трещин отрыва. Такой характер роста трещины наблюдался во множестве экспериментов [Rubinstein et al., 2004; Ben-David et al., 2010]. С точки зрения веерного механизма процесс начального накопления трещиноватости связан с формированием первоначальной веерной структуры (в одном или двух направлениях). Трещина продвигается с одновременным образованием множества рядов плиток, каждый из которых управляется веерным механизмом. Условные профили трещины в очаге и на последней стадии ее развития показаны на рис. 21б.

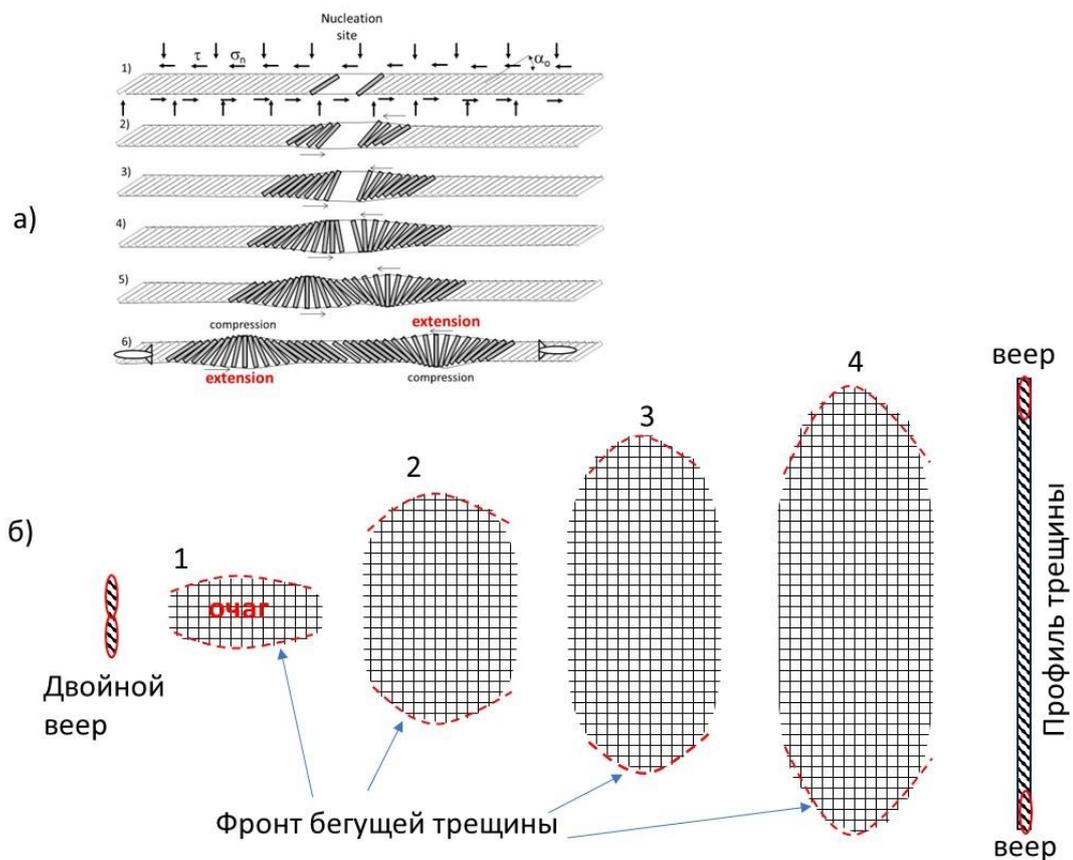


Рис. 21. а – Принцип формирования начальной веерной структуры при распространении трещины из очага в противоположных направлениях, б – развитие трещины сдвига в плоскости из очага, в котором формируется начальная веерная структура.

Еще одно важное наблюдение, отражающее особенности процесса развития трещин сдвига на сейсмогенных глубинах, описано в работе [Ortlepp, 1997] и показано на рис. 22. Здесь представлена фотография плоскости разлома, которая освобождена от плиток, заполнявших разлом. Эта плоскость вся покрыта зазубринами, оставленными плитками при вращении. Слой поворачивающихся плиток оставляет следы на поверхности берегов трещины под действием высоких нормальных напряжений на больших глубинах.

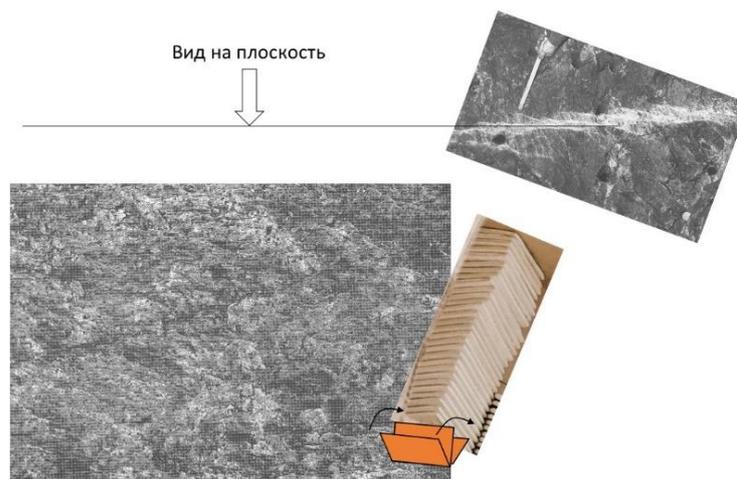


Рис. 22. Фотография берега трещины, образованной на больших глубинах, со следами, оставленными вращающимися плитками под действием высоких нормальных напряжений.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФЕНОМЕНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ВЕЕРНОГО МЕХАНИЗМА

Физические и математические модели веерного механизма

Необходимо подчеркнуть, что веерная структура, как разрушающий механизм, сегодня является неуловимой. Ее невозможно увидеть в экспериментах и *in situ* потому, что все разрушения на ее базе происходят в спонтанном режиме с высокими скоростями роста трещин, включая сверхзвуковые. Кроме того, формирование и существование веерной структуры происходит под действием нормальных и сдвиговых напряжений, и при снятии этих напряжений происходит обратная упругая деформация восстановления, которая «разглаживает» веерную структуру. Обосновать существование веерного механизма на данном этапе изучения (при отсутствии необходимой экспериментальной техники) возможно только путем теоретического анализа свойств веерной структуры и сопоставления этих свойств с поведением динамических разломов в различных условиях. Для этих целей были разработаны физические и математические модели веерного механизма [Tarasov, 2010, 2014; Tarasov, Guzev, 2013; Tarasov, Sadovskii, 2016; Tarasov et al., 2016, 2017]. Математические модели были созданы М.А. Гузевым и В.М. Садовским при участии автора. В данной статье представлены наиболее важные выводы, полученные путем моделирования.

Нужно заметить, что в моделях плиточная структура будущей трещины сдвига изначально задана, в отличие от разрушения горных пород *in situ* при высоких σ_3 , где эта структура образуется в цельной породе по мере продвижения трещины сдвига. Принцип образования эшелона трещин отрыва в цельных породах, создающих пластинчатую структуру сдвиговой трещины, исследован экспериментально и теоретически в работе [Reches, Lockner, 1994]. Принимая во внимание этот факт, представленные далее модели были упрощены и созданы для изучения поведения плиточной структуры, связанной с формированием и продвижением веерной структуры и ее феноменальных свойств.

Физическая модель веерного механизма на рис. 23 позволяет продемонстрировать два важнейших свойства веерной структуры: 1) низкое сопротивление сдвигу и 2) способность усиливать приложенные сдвиговые напряжения. Для начала опишем исходную модель в горизонтальном положении. Она состоит из эшелона плиток, уложенных в ряд плотно друг к другу на балке и склеенных между собой слабым клеем, чтобы создать условие целостности структуры. Эшелон плиток представляет собой модель будущей

трещины сдвига, которая формируется путем образования трещин отрыва между плитками и обеспечивает сдвиг между берегами трещины АВ и CD за счет вращения плиток. Плитки в исходном положении находятся под типичным углом α_0 к плоскости будущей трещины. Все плитки расположены между двумя резиновыми лентами (сверху и снизу), выполняющими роль берегов трещины, и способными растягиваться при вращении плиток.

Здесь следует подчеркнуть, что в моделях веерная структура включает малое число пластин (20 ÷ 30), что вызывает существенное растяжение материала, выполняющего роль берегов трещины. В отличие от модели, в реальных трещинах в состав веерной структуры входит несколько тысяч пластин, поэтому горная порода на берегах трещины растягивается мало и в пределах упругости.

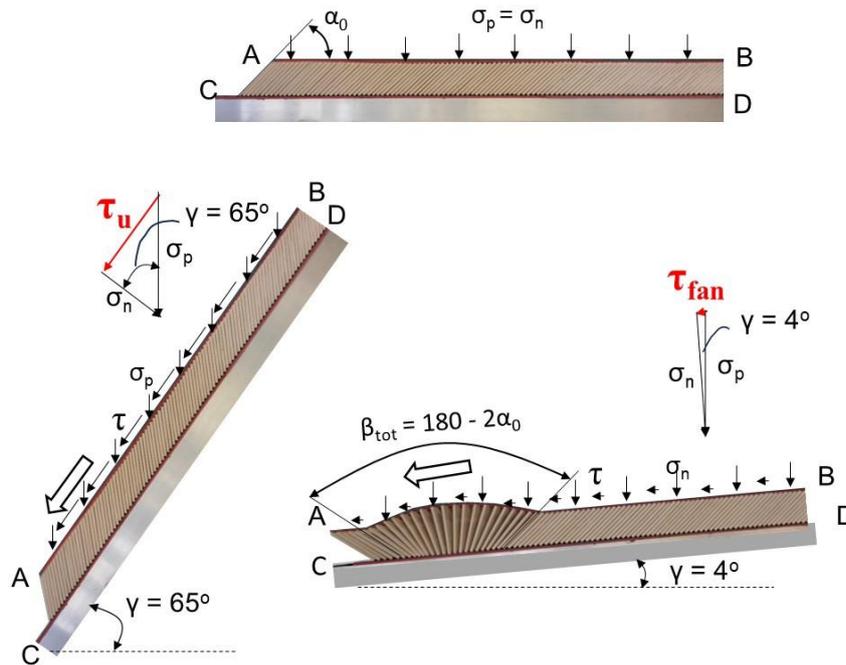


Рис. 23. Внешний вид физической модели веерного механизма.

Нормальные и сдвиговые напряжения на плиточную конструкцию организуются следующим образом. Сверху вся плиточная конструкция нагружена распределенным весом σ_p , создающим нормальное давление σ_n . При развороте конструкции на некоторый угол γ приложенный распределенный вес создает сдвиговые напряжения $\tau = \sigma_p \sin \gamma$. Эксперименты показали, что сдвиг между берегами АВ и CD происходит при большом угле наклона, когда сдвиговые напряжения способны разорвать связь между плитками, обеспечивая им свободу для вращения. В разных экспериментах угол γ был от 60° до 80° . Эти углы отражают сдвиговые напряжения, соответствующие прочности плиточной конструкции τ_u . Однако если создать предварительно начальную веерную структуру, то веер будет спонтанно перемещаться вдоль модели, обеспечивая разрыв связей между плитками на кончике веера и последовательный сдвиг между берегами АВ и CD даже при угле $\gamma = 4^\circ$. Этот угол отражает сдвиговые напряжения, соответствующие прочности плиточной конструкции при действии веерного механизма τ_{fan} . Веер перемещается в виде волны, бегущей вдоль модели, оставляя за собой разрушенную плиточную структуру, типичную для динамических трещин на сейсмогенных глубинах. Видео, иллюстрирующее бег

веерной волны на физической и цифровой моделях, можно посмотреть в [<https://www.youtube.com/watch?v=-AUzCEw35M&feature=youtu.be>; Tarasov, 2023b]. Отдельные кадры показаны на рис. 24.

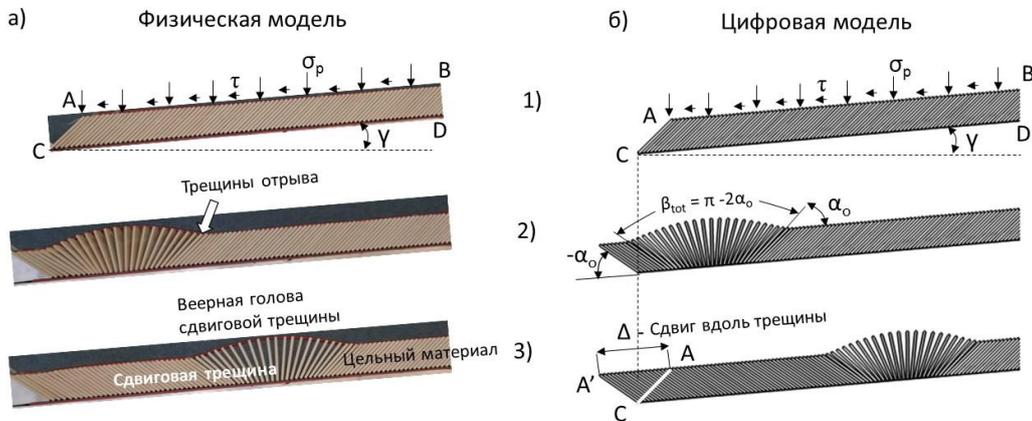


Рис. 24. Иллюстрация отдельных моментов продвижения веерной структуры вдоль физической и цифровой модели.

Способность веера разрывать прочные связи между пластинками (равные прочности данной конструкции τ_u) и перемещаться вдоль цельной конструкции при низких приложенных сдвиговых напряжениях τ_{fan} говорит о том, что веерная структура является мощным усилителем напряжений и обладает низким сопротивлением сдвигу. Физическая модель позволяет оценить эти способности экспериментально. Например, если условный предел прочности модели равен $\tau_u = \sin 65^\circ \approx 0.9$, а условная веерная прочность равна $\tau_{fan} = \sin 4^\circ \approx 0.07$, то коэффициент усиления напряжений веерным механизмом равен 13. Можно также оценить разницу между веерной и фрикционной прочностью. Угол трения для данной конструкции равен примерно 40° . Это значит, что сдвиговые напряжения, при которых происходит сдвиг плиточной конструкции целиком (без разделения плиток) вдоль балки, равны $\tau_f = \sin 40^\circ \approx 0.6$. Отсюда получаем, что веерная прочность почти на порядок ниже фрикционной прочности $\tau_{fan} \approx 0.1 \tau_f$. Физические основы таких феноменальных свойств веерной структуры проанализированы далее на базе физической и математических моделей.

Низкое сопротивление сдвигу веерной структуры

Веерная структура под действием одних нормальных напряжений σ_n (при отсутствии сдвиговых напряжений) имеет симметричную конфигурацию и находится в состоянии равновесия. Образы такой веерной конструкции, представляющие схематичную и цифровую модели, показаны на рис. 25. На рисунке 25а показан схематичный вид веера под действием элементарных нормальных сил N , представляющих нормальное напряжение σ_n . Эти силы, воздействуя на наклонные структурные плитки, вызывают производные силы f_n , которые компенсируются силами реакции f_R упруго растянутой связи между плитками, показанной красной линией. Величина производных сил зависит от угла наклона плиток и увеличивается от середины к краям веера. Важным свойством веерной структуры является тот факт, что силы f_n , находящиеся в головной части веера, препятствуют вращению пластинок и движению веера, а аналогичные силы в задней части веера содействуют движению веерной конструкции. Таким образом, суммарная сила сопротивления движению идеального веера (без учета сил трения в местах контакта

плиток с берегами трещины сдвига) равна нулю даже при воздействии больших нормальных давлений, соответствующих сейсмогенным глубинам.

Уравнение (4) аналитической модели описывает данную ситуацию.

$$F = \frac{N}{\delta} \ln \left| \frac{\sin(\alpha_0 + k_{tot}\delta)}{\sin \alpha_0} \right| = 0, \quad (4)$$

здесь δ – угол между плитками веера, который в простейшей модели принят одинаковым. Этот угол определяется величиной действующей элементарной силы N , модулем упругой связи и геометрическими характеристиками упругой связи и плиток (детали см. [Tarasov, Guzev, 2013]); k_{tot} – число пластинок в полностью сформированном веере.

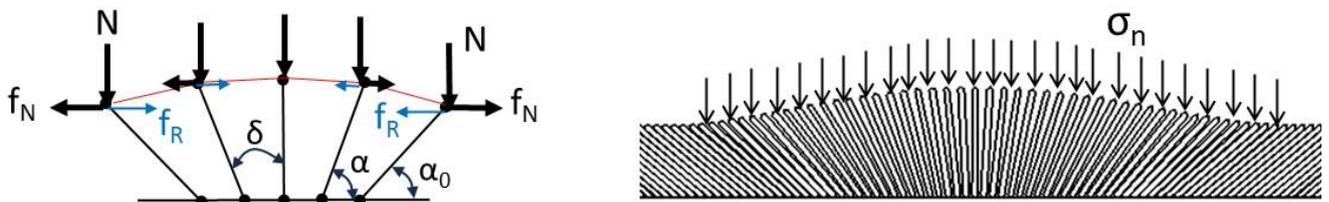


Рис. 25. Симметричная устойчивая веерная структура при действии нормальных напряжений и при отсутствии сдвиговых напряжений.

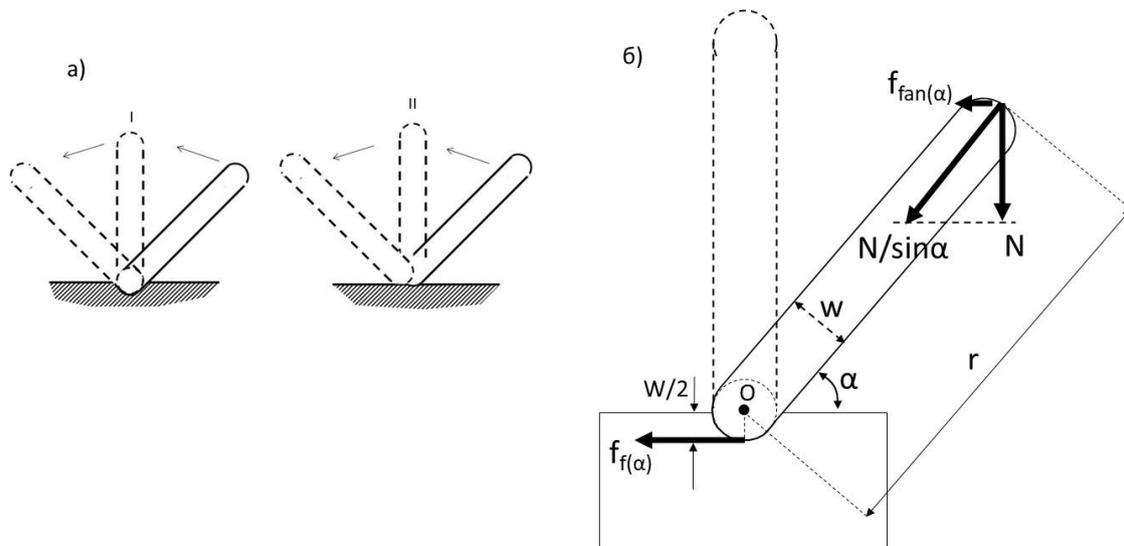


Рис. 26. Схема для оценки влияния трения в торцах поворачивающихся плиток на эффективность работы плиток как шарниров между берегами трещины сдвига.

Чтобы оценить роль трения на концах разворачивающихся плиток, рассмотрим схемы на рис. 26. На рисунке 26а показано, что возможно качение и скольжение концов плиток при вращении, на рис. 26б показана ситуация со скольжением в лунке, где трение проявляется в большей степени. Поскольку все плитки, входящие в веер, находятся в состоянии равновесия под действием нормальных напряжений, то будем считать, что трение при вращении шарнира в лунке определяется только силой, действующей вдоль плитки. На схеме одна плитка под углом $\alpha = 30^\circ$ соответствует крайнему положению в веере, а другая под углом $\alpha = 90^\circ$ соответствует середине веера. Плитки выполняют роль шарниров между

сдвигающимися берегами трещины, поэтому они должны снижать сопротивление сдвигу по сравнению с обычным трением.

Рассмотрим плитку под углом $\alpha_0 = 30^\circ$. Для простоты силу трения $f_{f(\alpha)}$ и веерную силу $f_{fan(\alpha)}$, которая противостоит трению, направим вдоль плоскости сдвиговой трещины, включающей веер. Сила трения $f_{f(\alpha)}$ в лунке при вращении плитки может быть оценена, как $f_{f(\alpha)} = \mu N / \sin \alpha$, где μ – коэффициент трения.

Из уравнения моментов сил $f_{f(\alpha)}$ и $f_{fan(\alpha)}$ относительно центра вращения O , мы получим соотношение между силой трения и веерной силой:

$$f_{fan(\alpha)} = 0.5 f_{f(\alpha)} \frac{w}{r \sin^2 \alpha} \quad (5)$$

Из уравнения (5) видно, что трение оказывает максимальное воздействие на крайние плитки в веере, находящиеся под углом $\alpha_0 = 30^\circ$:

$$f_{fan(30)} = 2 f_{f(30)} \frac{w}{r}$$

При приближении к центру веера влияние трения уменьшается и достигает минимума на вертикальной плитке $\alpha = 90^\circ$:

$$f_{fan(90)} = 0.5 f_{f(90)} \frac{w}{r}$$

Все эти уравнения показывают, что соотношение между силой трения и веерной силой зависит от отношения ширины и длины плиток w/r . Чем меньше это отношение, тем выше эффективность пластин как шарниров, снижающих сопротивление сдвигу берегов трещины. Нас интересует работа веерной структуры в горных породах под действием высоких нормальных напряжений. Длинные и тонкие пластинки в таких условиях ломаются при вращении. Предварительный анализ показал, что сохранять устойчивость и целостность в таких условиях могут пластинки, у которых $w/r \geq 0.1$. Таким образом, можно считать, что $w/r = 0.1$ является оптимальным соотношением, при котором веер работает с максимальной эффективностью.

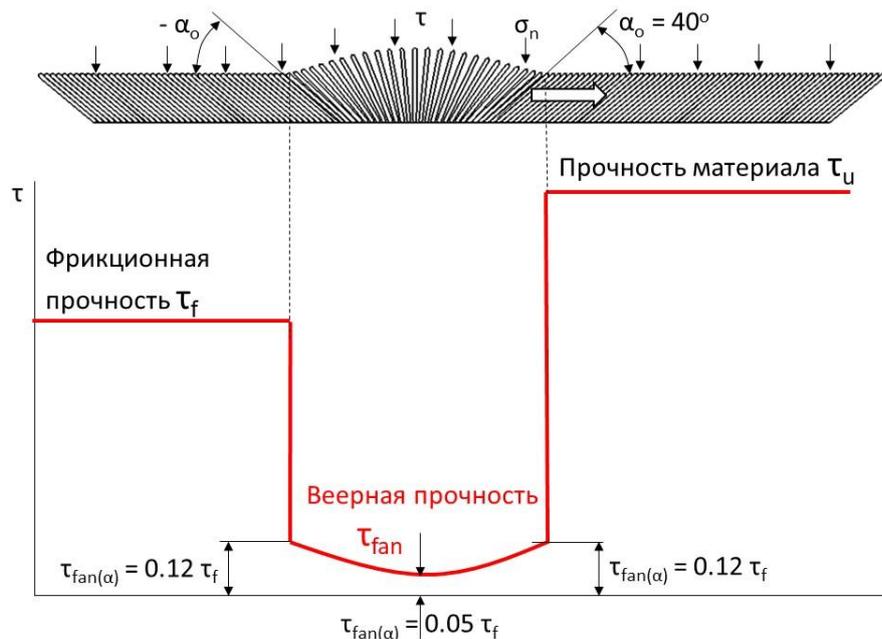


Рис. 27. Характер распределения сопротивления сдвигу вдоль модели сдвиговой трещины при разрушении веерным механизмом.

Принимая во внимание этот факт и используя уравнение (5), можно оценить, как меняется сопротивление сдвигу по всей длине веерной структуры. Рисунок 27 демонстрирует распределение сопротивления сдвигу вдоль модели, включающей пластинки под начальным углом $\alpha_0 = 40^\circ$. Впереди веера сопротивление равно прочности материала τ_u , позади веера оно равно фрикционной прочности τ_f . В зоне веера сопротивление переменное и, в среднем, на порядок ниже фрикционной прочности $\tau_{fan} \approx 0.1 \tau_f$. Этот результат близок к результату, полученному экспериментально на физической модели. *Создание низкого сопротивления сдвигу, приближающегося к нулю, представляет собой одно из феноменальных свойств веерной структуры.*

Веерная структура, как мощный усилитель приложенных напряжений

Другое феноменальное свойство веерной структуры заключается в способности усиливать низкие приложенные напряжения до значений прочности разрушаемого материала. Принцип работы этого механизма показан на рис. 28. На схематизированной веерной структуре на рис. 28а показаны все элементарные силы, действующие при приложении нормальных σ_n и сдвиговых τ напряжений. При приложении сдвиговых напряжений, на каждую структурную плитку в веере действуют активные элементарные силы f_τ (показанные красными стрелками), а реактивная сила f_c возникает только на фронтальной плитке, скрепленной с цельным материалом (показана зеленой стрелкой). Из уравнения (6) видно, что силовое равновесие в веерной структуре будет нарушено, когда суммарная активная сила $f_\tau k_{tot}$ превзойдет реактивную силу f_c (напомним, что первый член уравнения равен нулю, см. уравнение (4)). Таким образом, активные силы в веере суммируются и создают на кончике веера высокую концентрацию напряжений. Если сконцентрированные напряжения превосходят силу f_c , то будет происходить последовательный откол пластинок и продвижение веера через цельный материал. Нужно заметить, что способность к усилению приложенных напряжений зависит от числа пластинок в веере. Чем больше пластинок содержит веер, тем большей усилительной способностью он обладает и тем при меньших приложенных напряжениях может происходить разрушение.

$$F = \frac{N}{\delta} \ln \left| \frac{\sin(\alpha_0 + k_{tot}\delta)}{\sin \alpha_0} \right| + f_\tau k_{tot} > f_c \quad (6)$$

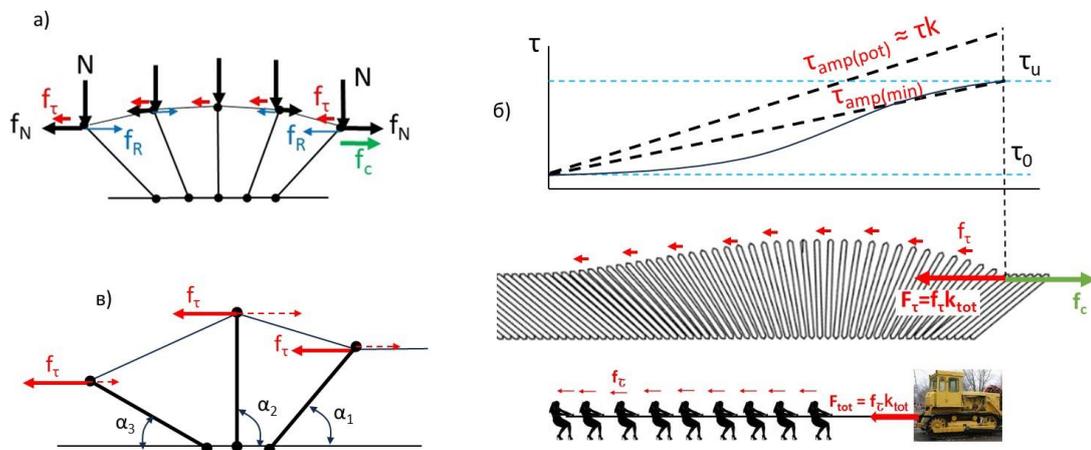


Рис. 28. Принцип усиления веерной структурой низких приложенных напряжений сдвига до значений, превышающих прочность материалов.

Модель на рис. 28б показывает, что усиление сдвиговых напряжений происходит вдоль всей веерной структуры с максимумом на кончике веера, что приводит к соответствующему искажению структуры веера. Он становится несимметричным. Принцип усиления напряжений веерной структурой проиллюстрирован на нижней картинке. В веере этот принцип реализуется следующим образом. Активные элементарные силы f_{τ} , приложенные к верхним концам плиток, как показано на рис. 28в, стремятся повернуть плитки и передают это усилие через эластичную связь (берег трещины сдвига) на кончик веера. Передаваемое усилие от каждой пластинки зависит от угла α ее наклона к плоскости сдвиговой трещины. Плитки под углом $\alpha = 90^\circ$ обладают максимальной способностью к передаче приложенного усилия. С уменьшением угла α эта способность уменьшается. Пунктирные красные стрелки условно отображают передаваемые усилия.

Таким образом, коэффициент 'k' усиления напряжений веерной структуры зависит не только от количества пластинок, но и от их положения в структуре веера. Опыт на физической модели показал, что веер усиливает приложенные напряжения в 13 раз при количестве пластинок в веере равном 20. С учетом этого обстоятельства, фактический график распределения напряжений в зоне веера выглядит так, как показано на рис. 28б сплошной криволинейной линией. В дальнейших наших рассуждениях для простоты будем условно использовать прямолинейное распределение напряжений как показано на рис. 28б пунктирными линиями. При большом количестве пластинок в веере, напряжение на кончике веера может существенно превосходить прочность материала τ_u . Проведенный анализ [Tarasov, 2016, 2023a] показывает, что в реальных трещинах сдвига веерная структура может включать несколько тысяч пластин. Это означает, что в земной коре при разрушении веерным механизмом могут быть созданы высокие локальные напряжения, достаточные для разрушения самых прочных пород даже при низких исходных напряжениях. Это объясняет главный парадокс землетрясений, связанный с малыми напряжениями, при которых они происходят.

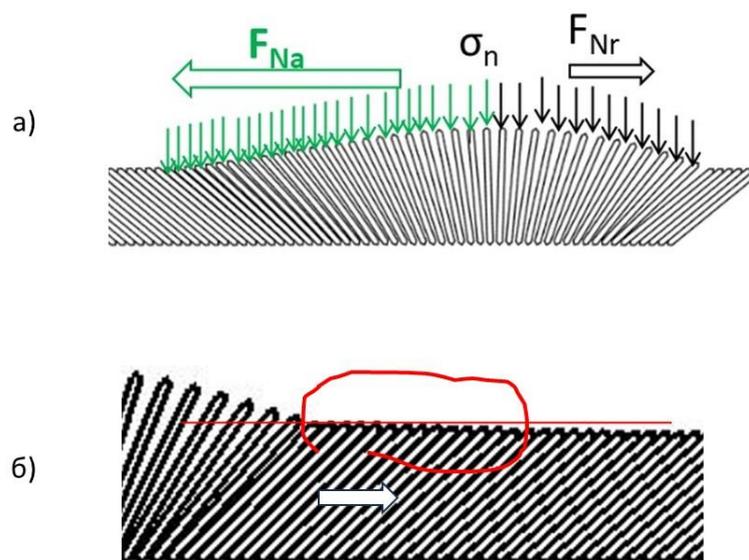


Рис. 29. а – Воздействие нормальных напряжений на несимметричную веерную структуру создает дополнительные сдвиговые напряжения, содействующие перемещению веера, б – полные усиленные веером напряжения передаются в передовую область за пределы веера.

Нужно отметить еще две важные особенности веерного механизма, касающиеся усиления напряжений. Рисунок 29а демонстрирует, что веерный механизм может создавать дополнительную движущую силу за счет нормальных напряжений σ_n . Это происходит из-за того, что веерная конструкция при действующих сдвиговых напряжениях становится несимметричной, как показано на модели. В этом случае задняя часть веера, состоящая из пластинок, наклоненных влево, содержит больше пластинок и длиннее передней части, включающей пластинки с наклоном вправо. Из-за этого возникает дополнительная движущая сила, равная $F = F_{Na} - F_{Nr}$.

На рисунке 29б показаны кончик бегущего веера и передняя часть модели. Горизонтальная красная линия позволяет оценить, что сдвиговые напряжения, создаваемые веерной структурой, распространяются также на переднюю часть. Здесь мы видим, что под действием сдвиговых напряжений пластинки подвергаются развороту в области упругих деформаций. Этот вопрос будет обсуждаться далее в деталях.

Условие силового дисбаланса в веерной зоне

Рисунок 30 показывает совместную диаграмму распределения активных сдвиговых напряжений (черный график) и сопротивления сдвигу (красный график) вдоль двигающейся трещины сдвига, управляемой веерным механизмом. Сопротивление сдвигу перед веером равно прочности материала τ_u , за веером равно фрикционной прочности τ_f . В зоне веера выделяются две подзоны: 1) у кончика веера происходит разрушение материала в форме образования трещины отрыва и структурной пластинки, которое характеризуется напряжением разрушения τ_r (breakdown stress), меняющемся от предела прочности τ_u до веерной прочности τ_{fan} ; 2) затем следует сдвиг вдоль веерной структуры с малым сопротивлением, равным веерной прочности τ_{fan} . После веера сдвиг прекращается и сопротивление сдвигу увеличивается до уровня фрикционной статической прочности τ_{fs} . Вопрос о том, как динамический сдвиг с малым сопротивлением τ_{fan} переходит к остановке со статическим сопротивлением трению τ_{fs} , будет рассмотрен далее.

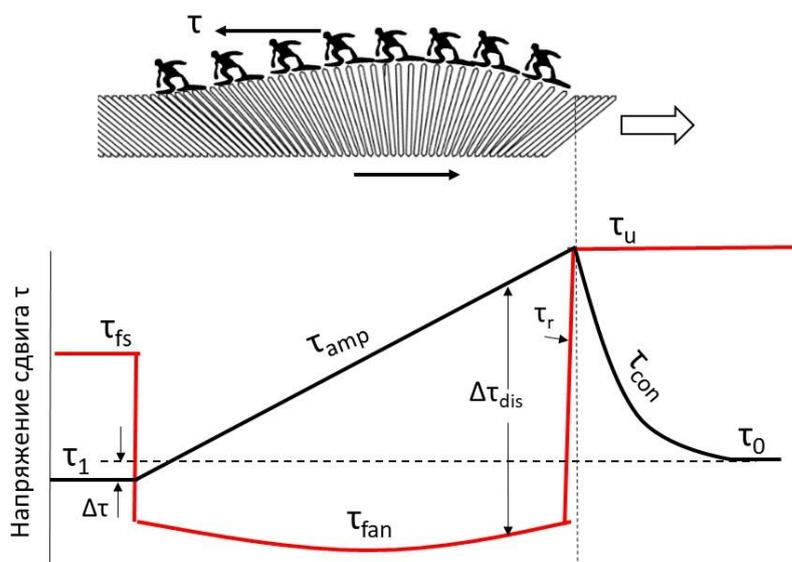


Рис. 30. Совместная диаграмма распределения усиленных активных напряжений τ_{amp} и низкого сопротивления сдвигу τ_{fan} в зоне веера, демонстрирует условие силового дисбаланса, вызывающего спонтанное продвижение веера через цельные породы.

В данный момент мы концентрируем внимание на соотношении между активными напряжениями и сопротивлением сдвигу в веерной зоне. Черный график показывает, что разрушение происходит при низких приложенных напряжениях τ_0 и τ_1 , существенно ниже фрикционной прочности τ_{fs} . Здесь, τ_0 – это исходное напряжение, а τ_1 – напряжение после разрушения. В зоне веера приложенные напряжения усиливаются τ_{amp} и на кончике веера достигают максимума, равного или выше предела прочности τ_u . Как было показано на рис. 29б, веер также создает концентрацию напряжений τ_{con} перед кончиком веера.

Совместная диаграмма на рис. 30 показывает, что в веерной зоне создается одновременно высокие активные сдвиговые напряжения τ_{amp} и очень низкое сопротивление сдвигу τ_{fan} . Благодаря разнице между этими величинами $\Delta\tau_{dis} = \tau_{amp} - \tau_{fan}$ в зоне веера возникает условие силового дисбаланса, которое вызывает спонтанное развитие трещины веерным механизмом. *Создание силового дисбаланса, необходимого для спонтанного разрушения при низких приложенных напряжениях, представляет собой еще одно феноменальное свойство веерной структуры.* Скорость спонтанного роста трещины определяется энергетическим балансом процесса разрушения и может превышать скорость звуковых продольных волн (будет обсуждаться дальше). Следует обратить внимание также на малый сброс напряжений (стресс друп) $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_0$. Это объясняется тем, что прочный материал разрушается веерным механизмом при исходных низких приложенных напряжениях. Этот тип разрушения соответствует классу III запредельного разрушения на рис. 13б и действует при высоких боковых давлениях, соответствующих сейсмогенным глубинам.

Контроль скорости сдвига веерным механизмом. Температурный парадокс

В течение последних двух десятилетий особый интерес проявляется к сверхсдвиговым трещинам, которые развиваются со скоростями, превышающими скорость упругих сдвиговых волн (Rubinstein et al., 2004; Xia et al., 2004; Lu et al., 2007, 2010; Ben-David et al., 2010; Rubino et al., 2017; Gori et al., 2018). Это вызвано обнаружением сверхсдвиговых разломов при землетрясениях [Archuleta, 1984; Bouchon et al., 2001; Ellsworth, Chiaraluce, 2009]. Наблюдения показывают, что неперменной чертой таких трещин является высокая скорость сдвига Q берегов в голове трещины, которая может достигать 10 м/с, что предполагает очень низкое (близкое к нулю) трение между берегами трещины [Heaton, 1990; Ohnaka, Shen, 1999; Lu et al., 2007, 2010].

Несмотря на то что этот факт является решающим для правильного понимания механизма землетрясений, сегодня нет единодушного мнения о природе низкого трения. Наиболее распространенные объяснения низкого трения базируются на предположении о высокой температуре в зоне скольжения [McKenzie, Brune, 1972; Sibson, 1973; Lachenbruch, 1980; Rice, 2006; Bizzarri, Spudich, 2008; Noda et al., 2009]. Но этот подход опровергается экспериментальными определениями температуры при динамических процессах *in situ* и в лаборатории [Lachenbruch, Sass, 1980; Brown, 1998]. Данный эффект известен как температурный парадокс (heat flow paradox). Предложены также механизмы динамического снижения трения, которые не связаны с высокими температурами. Например, снижение трения под воздействием вибраций [Melosh, 1996], динамическая смазка твердыми веществами [Brodsky, Kanamori, 2000].

Как отмечено в работе [Кочарян, 2016], все упомянутые модели имеют серьезный недостаток. Согласно этим моделям, высокий коэффициент трения покоя ($\mu \sim 0.85$) в динамике падает до низких величин ($\mu \sim 0.2$), что предполагает высокую амплитуду сброса напряжений при землетрясении

$\Delta\sigma \sim 100$ МПа. Эта величина на порядок превышает обычно наблюдаемый сброс напряжений при землетрясениях.

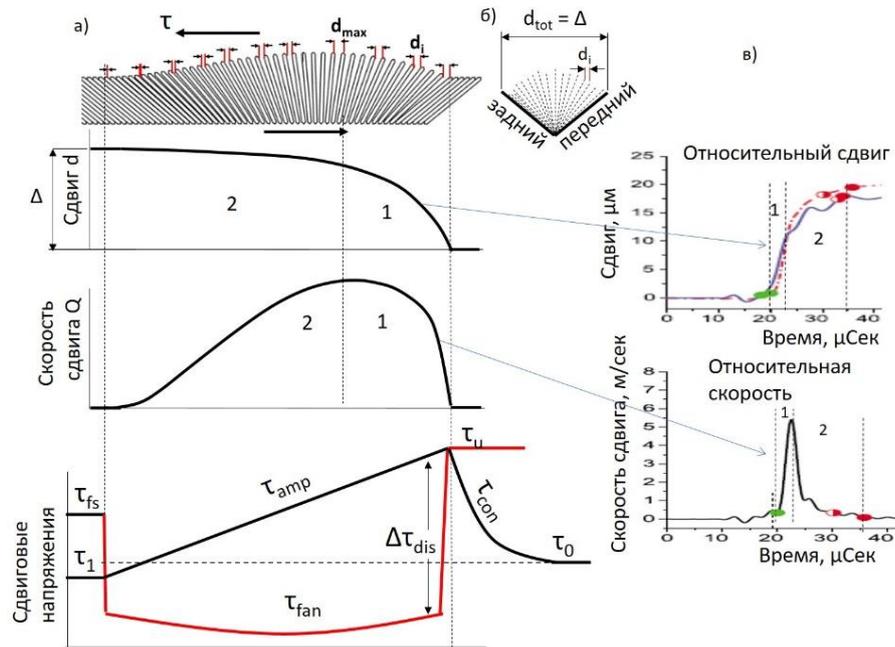


Рис. 31. Веерный механизм определяет взаимосвязь между величинами сдвига d , скорости сдвига Q , усиленных напряжений τ_{amp} , и сопротивления сдвигу τ_{fan} в голове бегущей трещины.

В отличие от этих моделей, веерный механизм определяет целый ряд особенностей, характерных для сверхсдвиговых трещин, которые проиллюстрированы на рис. 31:

- низкое сопротивление сдвигу τ_{fan} (соответствующее $\mu \sim 0.1$) в голове бегущей трещины при обычных температурах;
- низкую амплитуду сброса напряжений $\Delta\tau = \tau_0 - \tau_1$, которая может быть даже ниже, чем при стик-слип процессе;
- низкие исходные напряжения τ_0 (ниже фрикционной прочности τ_{fs}) при спонтанном разрушении прочных горных пород;
- типичное распределение величины сдвига d в голове трещины, получаемое в экспериментах;
- типичная вариация скорости сдвига Q в голове трещины, регистрируемая в экспериментах.

Первые три особенности были обсуждены ранее. По поводу низкого сопротивления сдвигу следует подчеркнуть, что оно обеспечивается при низких температурах и объясняет температурный парадокс (см. подробности в [Tarasov, 2023a]).

Модель веера на рис. 31 поясняет как веерный механизм обеспечивает типичное распределение сдвига и скорости сдвига в голове трещины. Рассмотрим трещину, распространяющуюся по волновому принципу (pulse-like rupture), что типично для трещин землетрясений [Heaton, 1990; Perrin et al., 1995; Zheng, Rice 1998; Noda et al., 2009]. Как было показано в предыдущих разделах, приложенные сдвиговые напряжения делают веерную структуру несимметричной. Общее распределение величин сдвига и скорости сдвига вдоль несимметричной веерной структуры определяется распределением локальных перемещений d_i , вызванных разворотом каждой пластинки веерной структуры. На модели видно, что локальные перемещения d_i сразу за кончиком веера относительно большие и увеличиваются с расстоянием от кончика. На каком-то расстоянии они достигают максимума, а затем уменьшаются до нуля,

приближаясь к заднему краю веера. Сумма всех локальных перемещений d_{tot} равна общему перемещению Δ , которое обеспечивается полным разворотом пластинок от исходного до конечного положения (см. рис. 31б).

$$d_{\text{tot}} = \Delta = \sum_{i=1}^n d_i.$$

Во время перемещения веерной структуры, все пластинки вращаются одновременно и перемещение каждой из них происходит за одно и то же время, что обеспечивает соответствующую вариацию скорости сдвига вдоль веерной зоны. Соотношения между сдвигом d , скоростью сдвига Q , усиленным напряжением τ_{amp} (черный график) и сопротивлением сдвигу τ_{fan} (красный график) показаны графически на рис. 31а под моделью. Вариация Q имеет две стадии: на стадии 1 происходит ускорение, а на стадии 2 происходит замедление с плавным переходом к остановке на задней границе веера. Резкое ускорение Q на стадии 1 вызвано большими смещениями d и огромным дисбалансом $\Delta\tau_{\text{dis}}$ между усиленным напряжением τ_{amp} и сопротивлением сдвигу τ_{fan} . Плавное замедление скорости сдвига вплоть до остановки на задней кромке веера, вопреки резкому увеличению сопротивления сдвигу (с τ_{fan} до τ_{fs}), представляет собой еще одно уникальное свойство веерной структуры. Это свойство противоречит существующим теориям, утверждающим сильную зависимость трения от скорости [velocity-weakening models Dieterich, 1979; Ruina, 1983; Scholz, 1998]. Плавное снижение скорости сдвига происходит из-за несимметричности веерной структуры, где в конце задней части веера локальное смещение пластинок d_i плавно снижается вплоть до нуля.

Рассмотренный характер изменения сдвига и скорости сдвига вдоль веерной структуры согласуется с экспериментальными результатами, полученными для сверхсдвиговых трещин. На рисунке 31в представлены кривые, отражающие типичные зависимости величины сдвига и величины скорости сдвига от времени в голове сверхсдвиговых трещин [Lu et al., 2007, 2010]. Зеленые точки на кривых отмечают время начала сдвига, вызванного передней частью головы трещины, а красные точки отмечают время конца сдвига, соответствующего проходу задней кромки головы трещины. Максимальная скорость сдвига, зафиксированная в этом эксперименте, равна $Q = 5.5$ м/с.

Баланс энергии процесса разрушения веерным механизмом

На рисунке 32 проиллюстрирован баланс энергии процесса спонтанного разрушения (на единицу площади разлома), осуществляемого веерным механизмом. Он представлен соотношением площадей на диаграммах «сдвиговые напряжения τ – сдвиг d ». Здесь рассматривается типичный для землетрясений волновой тип распространения трещины (pulse-like), когда при развитии трещины сдвиг осуществляется только в головной ее части, тогда как впереди и сзади головы сдвиг заблокирован. В веерном механизме голова трещины представлена веерной структурой. На рисунке 32а показана модель веера и величина сдвига берегов трещины Δ , которая обеспечивается веером за счет полного разворота плиток из начального в конечное положение.

На рисунке 32б, в изображен баланс энергии разрушения, происходящего при разных уровнях приложенных напряжений τ_0 . На диаграммах сдвиг увеличивается справа налево от точки О до точки S. На рисунке 32б уровень начальных приложенных напряжений τ_0 близок к уровню веерной прочности τ_{fan} . На рисунке 32в уровень τ_0 немного ниже уровня фрикционной статической прочности τ_{fs} . Несмотря на

низкий уровень приложенных напряжений τ_0 по отношению к пределу прочности материала τ_u веерный механизм усиливает эти напряжения на кончике веера до уровня и выше предела прочности.

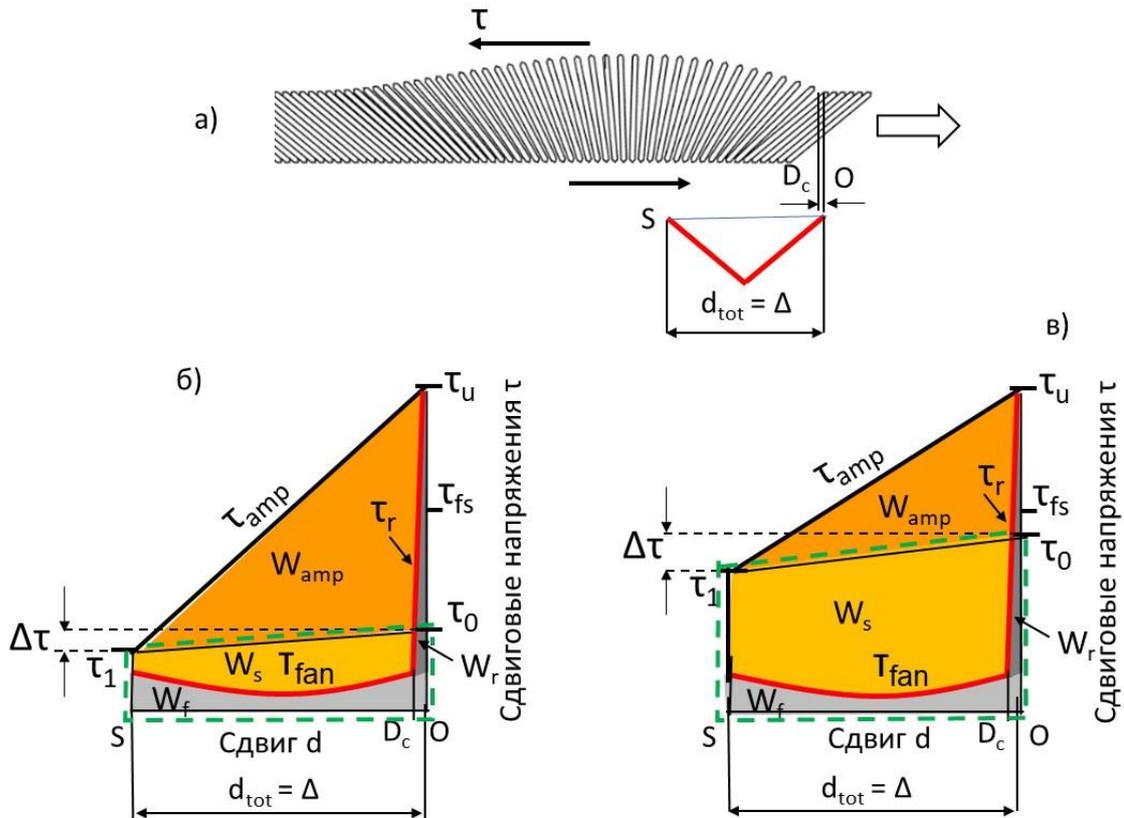


Рис. 32. Баланс энергии процесса спонтанного разрушения (на единицу площади разлома), осуществляемого веерным механизмом. Он представлен соотношением площадей на диаграммах «сдвиговые напряжения τ – сдвиг d ».

Суть разрушения цельного материала (породы) веерным механизмом состоит в периодическом отщеплении передовой пластинки от монолитного тела за счет образования трещины отрыва (см. схему на рис. 32а). Ширина этой трещины может составлять несколько микрон, а соответствующий этому событию сдвиг на схеме показан как $O-D_c$. Далее отщепленная пластинка перемещается путем разворота, создавая сдвиг Δ , равный на схеме отрезку D_c-S . Сопrotивление сдвигу отщепленной пластинки равно уровню τ_{fan} . Аналогично ведут себя все последовательно отрываеваемые пластинки

На диаграммах эта ситуация отражается двумя участками: 1 – кривой разрушения τ_r (breakdown strength), когда прочность падает от τ_u до τ_{fan} при смещении $O-D_c$; 2 – кривой сдвига с постоянным сопротивлением τ_{fan} при смещении D_c-S . Энергетический баланс включает следующие виды энергии:

W – полное изменение внутренней упругой энергии разрушаемого тела (площадь трапеции, ограниченной зеленой пунктирной линией);

W_r – энергия разрушения (темно-серый треугольник);

W_f – энергия сдвига, совершаемая против сил трения в веерной конструкции (светло-серая зона);

W_s – свободная (сейсмическая) энергия (желтая зона);

W_{amp} – концентрированная энергия, усиленная веером (оранжевая зона).

Особенности баланса энергии процесса разрушения веерным механизмом состоят в следующем:

1. Малая потеря энергии, связанной с разрушением и сдвигом $W_r + W_f$. Эта энергия остается примерно постоянной при разрушении в условиях низких сдвиговых напряжений τ_0 (левая диаграмма) и при высоких напряжениях (правая диаграмма).

2. Большая доля свободной энергии W_s , создающей динамику процесса разрушения (скорость трещин, волновые процессы). Эта энергия увеличивается с ростом τ_0 .

3. Наличие сконцентрированной упругой энергии W_{amp} , вызванной усилением сдвиговых напряжений в материале берегов трещины. Этот сгусток энергии двигается совместно с головой трещины, создавая непрерывные условия для мгновенного разрушения породы на кончике веера.

Новые физические принципы сверхзвуковых трещин

На рисунке 33 показана принципиальная разница в балансе энергии при разрушении классическими и веерным механизмами, а также необходимые условия для сверхзвукового распространения трещин. Рисунок 33а показывает классическое представление о балансе энергии. Вверху помещена диаграмма из [Abercrombie, Rice, 2005], а внизу аналогичная диаграмма для анализа. Диаграммы отражают динамическое распространение головы трещины стик-слип механизмом вдоль существующего разлома с фрикционной прочностью τ_{fs} . Многочисленные эксперименты [Lu et al., 2007, 2010] показывают, что сверхсдвиговые трещины могут расти при исходных приложенных напряжениях существенно ниже фрикционной прочности $\tau_0 < \tau_{fs}$. Несмотря на низкие исходные напряжения, разрушение происходит благодаря концентрации напряжений перед кончиком трещины по Гриффитсу [Griffith, 1921], увеличивающих напряжение до уровня τ_{fs} . Разрушение отражается графиком AC, где сопротивление сдвигу падает от уровня τ_{fs} до уровня динамического трения τ_{fd} , при величине сдвига O–D_c. Далее идет динамический сдвиг на дистанции D_c–S с трением τ_{fd} . Сдвиг прекращается, когда уровень приложенного напряжения снижается до уровня динамического трения $\tau_1 = \tau_{fd}$.

Согласно классическим теориям [Griffith, 1921; Freund, 1998; Broberg, 1999; Needleman, 1999], развитие трещин обеспечивается внутренней энергией тела, которая выделяется при его разрушении и передается через среду в область кончика трещины. На диаграмме полное изменение внутренней энергии соответствует площади трапеции, ограниченной зеленой пунктирной линией. Эта энергия частично поглощается на разрушение и трение $W_r + W_f$ и выделяется в виде свободной энергии W_s , переходящей в другие виды энергии.

Необходимо подчеркнуть, что спонтанное разрушение возможно тогда, когда уровень приложенных напряжений превосходит или равен уровню сопротивления. На диаграмме приложенные напряжения отражаются линией τ_0 – τ_1 . Это означает, что на начальной стадии AB условие спонтанного разрушения не удовлетворяется, в отличие от последующей стадии BE. Согласно классическим теориям, для разрушения у кончика трещины, часть выделившейся внутренней энергии W_s , передается через среду в виде упруго-динамических волн. Эти волны распространяются с максимальной скоростью равной скорости продольных упругих волн V_p . Отсюда следует классическое ограничение скорости распространения трещин сдвига $V < V_p$ [Freund, 1998; Needleman, 1999; Rice, 2001; Rosakis et al., 2007].

Веерный механизм снимает эти ограничения за счет следующих феноменальных свойств. Во-первых, он усиливает низкие приложенные напряжения в веерной зоне и на кончике трещины выше уровня сопротивления сдвигу, таким образом, создавая условия дисбаланса, необходимые для

спонтанного разрушения. Во-вторых, в зоне повышенных напряжений, создаваемых веером в материале берегов трещины внутри веера τ_{amp} и впереди веера τ_{con} , аккумулируется упругая энергия $W_{amp} + W_{con}$, которая находится в непосредственной близости к кончику трещины и может мгновенно использоваться для образования трещин отрыва. Таким образом, исключается потребность в передаче энергии из периферийной зоны. Объем расходуемой энергии на образование трещин отрыва из общего объема $W_{amp} + W_{con}$ очень мал и веер постоянно компенсирует ее из W_s , поддерживая уровень аккумулированной энергии вокруг кончика трещины неизменным. Недавние эксперименты показали возможность развития сверхзвуковых трещин сдвига. На рисунке 33в показаны волны шоковых напряжений Маха, образованных на базе поперечных и продольных упругих волн V_s и V_p , исходящих из кончика сверхзвуковой трещины [Gori et al., 2018].

Сравнение двух диаграмм на рис. 33а, б позволяет выделить еще некоторые преимущества веерного механизма. Веерный механизм обеспечивает значительно меньшую энергию разрушения W_r , меньший сброс напряжений $\Delta\tau = \tau_0 - \tau_1$ и большее выделение свободной энергии W_s .

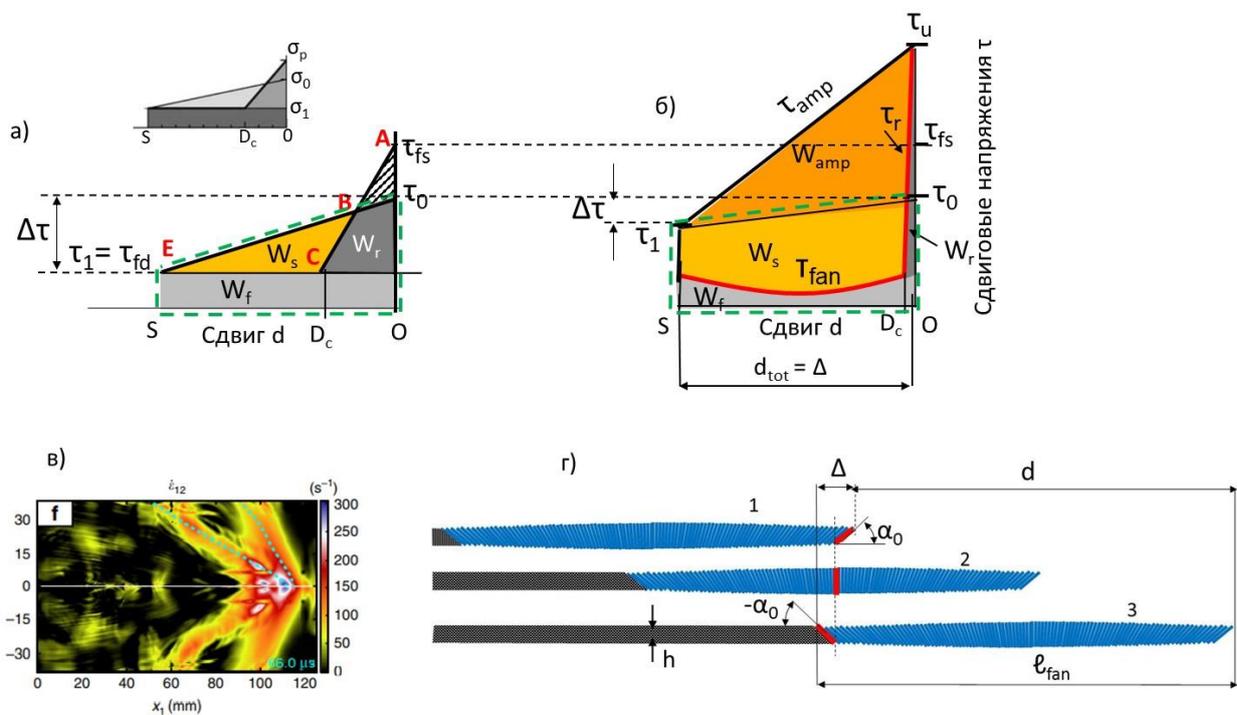


Рис. 33. а и б – Сравнение баланса энергии спонтанных трещин сдвига, управляемых классическим и веерным механизмами разрушения, в – экспериментальный результат, демонстрирующий сверхзвуковую скорость роста сдвиговой трещины. Шоковые волны Маха, соответствующие сдвиговым и продольным упругим волнам, показаны красно-желтыми цветами [Gori et al., 2018], г – модель связи между скоростью сдвига Q и скоростью роста трещины V , создаваемой веерным механизмом.

Рисунок 33г демонстрирует как веерный механизм контролирует связь между скоростью V сверхсдвиговых и сверхзвуковых трещин и скоростью сдвига Q в голове трещины. На рисунке 33г показаны три стадии развития трещины, которые смещены по вертикали. Трещина распространяется за счет образования структурных пластинок на кончике веера и последующего их разворота. Разворот пластинок обеспечивает сдвиг берегов трещины. Фронтальная пластинка на стадии 1 (показана красным цветом) становится замыкающей на стадии 3. Дистанция Δ , связанная с вращением пластинки, определяет

величину относительного сдвига берегов трещины. За время t , за которое произошло смещение Δ , кончик трещины пробежал расстояние d . Согласно данной модели, отношение скорости трещины V к скорости сдвига Q определяется отношением d/Δ . Модель на рис. 33г включает около 100 пластинок. Оценки показывают, что веерная структура натуральных трещин состоит из нескольких тысяч пластинок. В этом случае можно принять, что $d \approx l_{fan}$. Имея ввиду, что $V = l_{fan} / t$ и $Q = \Delta/t$, мы получим соотношение между скоростями трещины и сдвига:

$$V/Q \approx l_{fan}/\Delta. \quad (7)$$

Схема на рис. 33г и уравнение (7) показывают, что относительно медленное совокупное вращение плиток в веерной структуре вызывает очень быстрый рост трещин. Например, при скорости сдвига $Q = 10$ м/с и соотношении параметров веерной головы трещины $l_{fan} / \Delta = 1000$, трещина будет распространяться со сверхзвуковой скоростью $V = 10$ км/с. Здесь следует подчеркнуть, что при сверхзвуковой скорости трещин, относительно медленное вращение плиток позволяет веерной структуре поддерживать все феноменальные силовые и энергетические характеристики в веерной зоне, которые обсуждались на рис. 33.

Активизация веерного механизма

Веерный механизм приобретает все свои феноменальные свойства в полной мере после того, как структура веера полностью сформируется. Для создания начальной веерной структуры необходимо создать локальные высокие напряжения, которые вызывают процесс трещинообразования. Рисунок 34 иллюстрирует такую ситуацию на примере физической модели, где приведены пять стадий развития трещины сдвига.

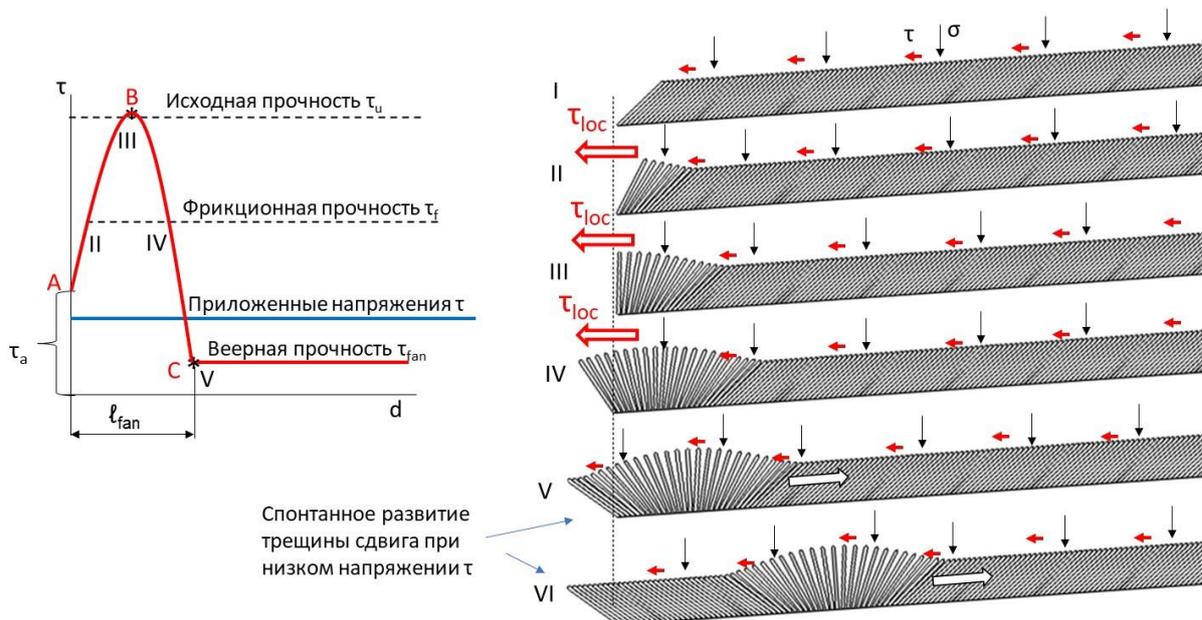


Рис. 34. Условия спонтанного развития веерной структуры.

В исходном состоянии (стадия I) модель нагружена нормальными σ и сдвиговыми τ напряжениями. Приложенные вдоль всей модели сдвиговые напряжения существенно ниже фрикционной прочности $\tau < \tau_f$, как показано на графике. При приложении локального напряжения τ_{loc} (стадия II) начинается процесс

образования трещин отрыва, отщепления структурных пластинок, их разворота и формирования начальной веерной структуры. При формировании первой половины веера сопротивление сдвигу увеличивается из-за действия нормальных напряжений на растущее число пластинок. Образование первой половины веера отражается частью графика АВ, где В соответствует достижению предела прочности τ_u . Затем сопротивление веера снижается от предела прочности τ_u до веерной прочности τ_{fan} (от точки В до точки С на графике). Вместе с ним снижается и уровень локальных напряжений, необходимых для создания начального веера. Когда сопротивление веера становится ниже уровня приложенных напряжений τ , развитие трещины сдвига приобретает спонтанный характер, несмотря на низкий уровень приложенных напряжений $\tau < \tau_f$.

Необходимо отметить, что при испытаниях образцов породы в лаборатории нет возможности создать локальное напряжение в образце для формирования начального веера. Поэтому образец нагружается целиком до предела прочности, а сброс давления (стресс друп) определяется как разность между пределом прочности и остаточной (фрикционной) прочностью $\Delta = \tau_u - \tau_f$. В отличие от лабораторных условий, формирование начальной веерной структуры *in situ* происходит по другой схеме, которая будет обсуждаться далее.

Переменная эффективность веерного механизма при высоких давлениях σ_3

Закончим теоретическую часть обсуждения феноменальных свойств веерного механизма заключением о том, что веерный механизм активизируется в определенном диапазоне боковых давлений σ_3 и работает там с переменной эффективностью. Поскольку в данной статье выдвигается тезис о том, что разрушение цельных пород является преимущественным механизмом в создании землетрясений по сравнению с динамическим проскальзыванием по существующим разломам, то под эффективностью веерного механизма понимается насколько он делает прочность цельных пород ниже фрикционной прочности разломов: $\Psi = \tau_f/\tau_{fan}$. Когда $\Psi = \tau_f/\tau_{fan} > 1$, то разрушение цельных пород является предпочтительным по сравнению с динамическим проскальзыванием по существующему разлому.

Рисунок 35а (копия рис. 11) напоминает, что в разных диапазонах давлений σ_3 действуют разные механизмы разрушения. Веерный механизм работает при высоких давлениях в диапазоне $\sigma_{3fan(min)} \div \sigma_{3fan(max)}$. Максимальная эффективность проявляется в средней части этого диапазона и уменьшается при меньших и больших давлениях к границам этого диапазона.

Рисунок 35б поясняет причины такой вариации эффективности. Здесь горизонтальная ось представляет диапазон давления σ_3 , в котором разрушение происходит в виде трещины сдвига. По вертикали отложены два параметра: веерная эффективность Ψ и соотношение геометрических характеристик структурных пластинок g/w (длины и ширины), которое определяет эффективность работы пластинок как шарниров между берегами трещины (см. уравнение 5). График g/w показывает, что при относительно низких давлениях (в диапазоне $\sigma_{3shear} \div \sigma_{3fan(min)}$) трещины отрыва образуют длинные и тонкие пластинки с высоким g/w . Такие пластинки ломаются при вращении, создавая трение в голове трещины сдвига. Эти условия характерны для классических механизмов разрушения. С увеличением σ_3 коэффициент g/w снижается, что увеличивает устойчивость пластинок при вращении. В диапазоне $\sigma_{3fan(min)} \div \sigma_{3fan(max)}$ пластинки приобретают возможность работать как шарниры. Важно отметить, что в начальном диапазоне давлений $\sigma_{3fan(min)} \div \sigma_{3fan(opt)}$ эффективность их работы увеличивается с ростом σ_3 за счет увеличения устойчивости пластинок. Достижение Ψ_{opt} происходит примерно при $g/w = 10$. Однако в

следующем диапазоне давлений $\sigma_{3fan(opt)} \div \sigma_{3fan(max)}$, несмотря на то, что пластинки ведут себя устойчиво, дальнейшее снижение r/w ведет к снижению эффективности работы пластинок как шарниров (согласно уравнению 5), а следовательно, и к уменьшению эффективности веерного механизма. При давлениях $\sigma_3 > \sigma_{3fan(max)}$, когда $r/w = 1$, веерный механизм перестает работать и трещины сдвига образуются по законам фрикционных механизмов.

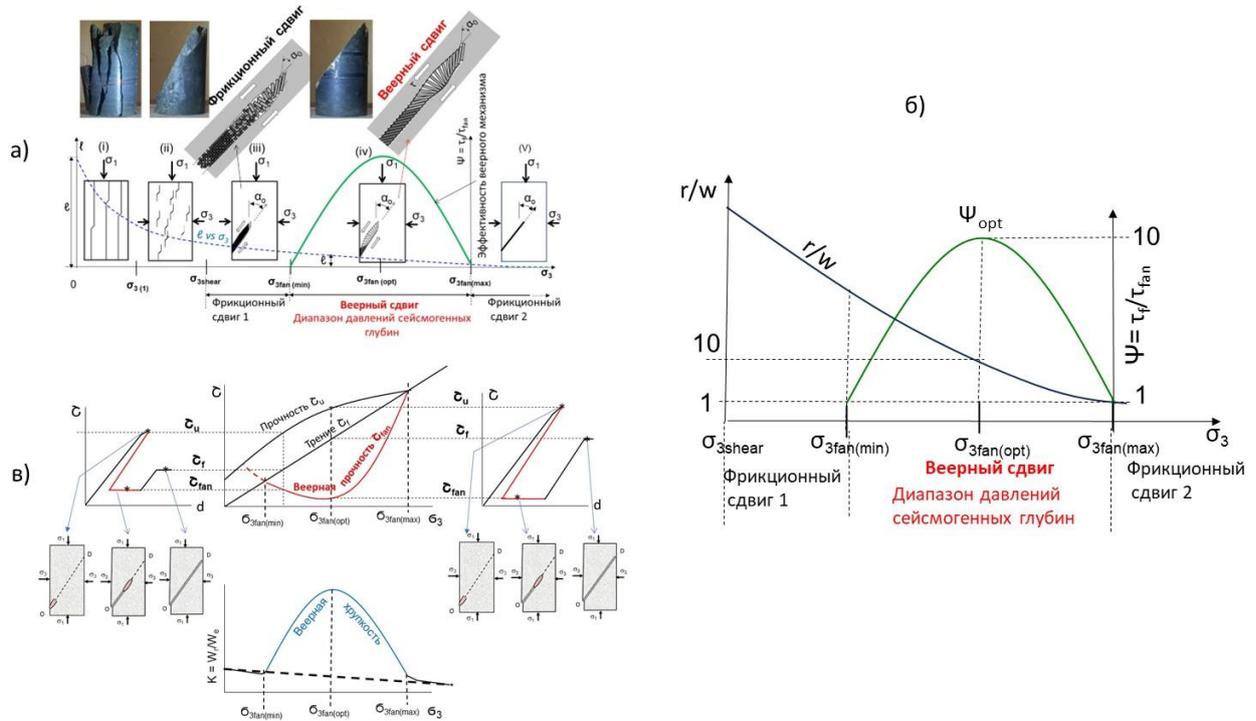


Рис. 35. Иллюстрация причин изменения эффективности работы веерного механизма ψ в прочных горных породах при высоких боковых давлениях σ_3 .

Существование веерного механизма, работающего в некотором диапазоне боковых давлений (разном для разных пород), определяет особые свойства этих пород, которые проявляются в уменьшении прочности и увеличении хрупкости. Для получения полных паспортов прочности и хрупкости пород, показанных на рис. 35в, требуются специальные эксперименты с регистрацией запредельных характеристик.

Необходимо подчеркнуть, что степень эффективности веерного механизма $\psi = \tau_f/\tau_{fan}$, так же, как и величина диапазона боковых давлений σ_3 , в котором работает веерный механизм, зависят от прочности пород. Эффективность работы веерного механизма определяется устойчивостью работы структурных плиток, которая повышается с ростом прочности материала, из которого они формируются. Как отмечалось на рис. 7 и 16, максимальная эффективность веерного механизма и максимальный диапазон σ_3 проявляются в прочных породах с прочностью на одноосное сжатие UCS > 250 МПа. У более слабых пород эти показатели снижаются, как условно показано на рис. 36. Рисунок 36а иллюстрирует возможную вариацию максимальной (или оптимальной) эффективности ψ_{opt} в зависимости от прочности пород (UCS). Здесь границы между прочными, средней прочности и слабыми породами имеют условный характер и должны определяться экспериментально. Рисунок 36б показывает три кривые, отражающие вариацию эффективности ψ веерного механизма и рабочий диапазон давлений σ_3 для пород разной прочности.

На данной стадии исследований можно предположить, что чем прочнее порода, тем выше эффективность ψ_{opt} и шире диапазон σ_3 работы веерного механизма. В слабых породах веерный механизм не работает.

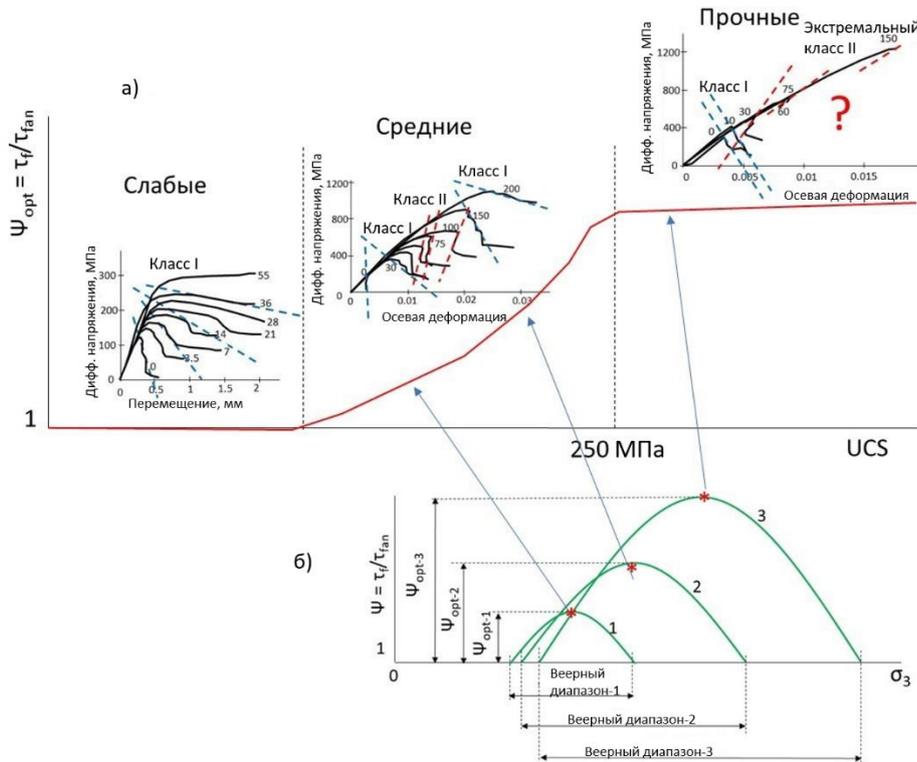


Рис. 36. а – Иллюстрация изменения максимальной (или оптимальной) эффективности работы веерного механизма ψ_{opt} в зависимости от прочности пород (UCS), б – соотношение между оптимальной эффективностью веерного механизма и диапазоном боковых давлений, в котором он работает, в зависимости от прочности пород.

ПРОЯВЛЕНИЯ ВЕЕРНОГО МЕХАНИЗМА В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

Границы сейсмогенного слоя в земной коре и вариация активности землетрясений, определяемые веерным механизмом

Анализ свойств горных пород при высоких давлениях σ_3 и особенностей веерного механизма позволяет предположить следующее распределение прочности и хрупкости горных пород с глубиной, как показано на рис. 37. Зеленый график на рис. 37а показывает вариацию активности (эффективности) веерного механизма ψ , которая определяет соответствующую вариацию веерной прочности τ_{fan} (рис. 37б) и хрупкости K (рис. 37в) цельных прочных пород. Зона активности веерного механизма определяет границы сейсмогенного слоя, в котором веерный механизм имеет преимущество в создании динамических явлений по сравнению со стик-слип механизмом, т.к. здесь веерная прочность τ_{fan} пород ниже фрикционной прочности τ_f . За границами этой зоны фрикционная прочность представляет минимальную прочность пород и может быть причиной землетрясений на базе стик-слип механизма.

Нужно пояснить, что долговременная прочность земной коры определяется фрикционной прочностью, но в случае зарождения веерной структуры при любом уровне напряжений в серой зоне диаграммы, веерный механизм создаст динамическую трещину, которая может вызвать землетрясение. Частота (число) землетрясений на разных уровнях сейсмогенного слоя определяется характеристиками

прочности и хрупкости пород – чем ниже прочность и выше хрупкость, тем больше вероятность возникновения землетрясений. Максимум активности землетрясений находится на глубинах, соответствующих минимальной прочности и максимальной хрупкости.

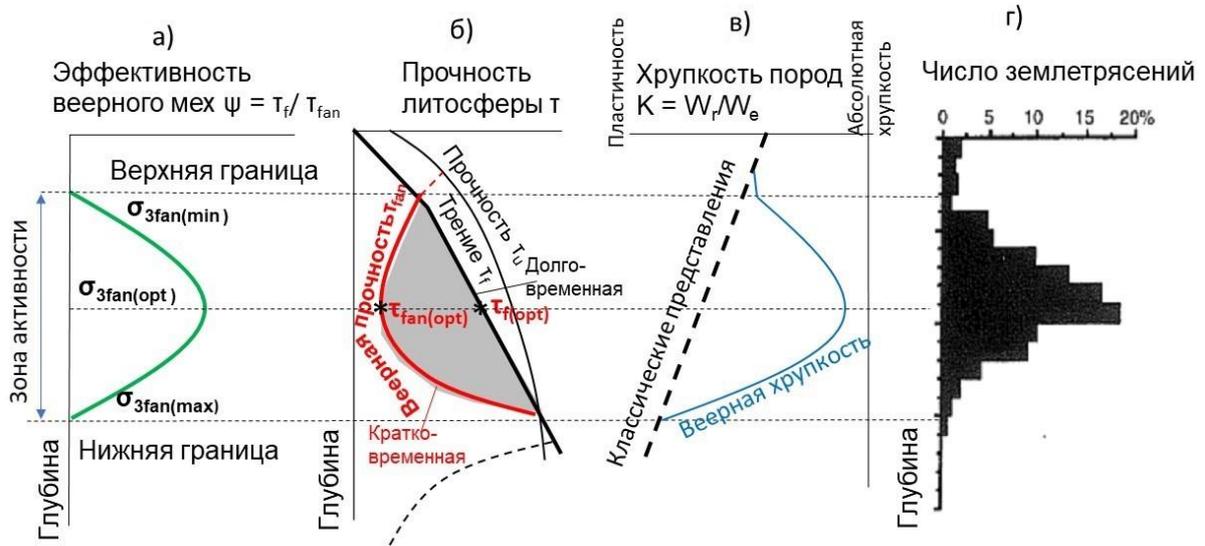


Рис. 37. а – Границы сейсмогенного слоя в земной коре определяются границами активности веерного механизма, б, в – в этих границах веерная прочность цельных пород τ_{fan} ниже фрикционной прочности τ_f существующих разломов и веерная хрупкость цельных пород K выше классической хрупкости по разломам, г – распределение по глубине веерной прочности и хрупкости определяет соответственное распределение по глубине активности землетрясений.

На базе веерного механизма можно объяснить также наличие нескольких зон активности землетрясений по глубине. На рисунках 16 и 36 обсуждался вопрос об активности веерного механизма в зависимости от прочности пород: чем прочнее порода, тем более активен веерный механизм. Эта зависимость понятна, т. к. структурные пластинки, образованные из прочных пород, более устойчивы при развороте и лучше работают как шарниры между берегами трещины. На рисунке 16 менее прочный кварцит показывает меньшее увеличение хрупкости в меньшем диапазоне боковых давлений σ_3 , по сравнению с прочными гранитом и долеритом.

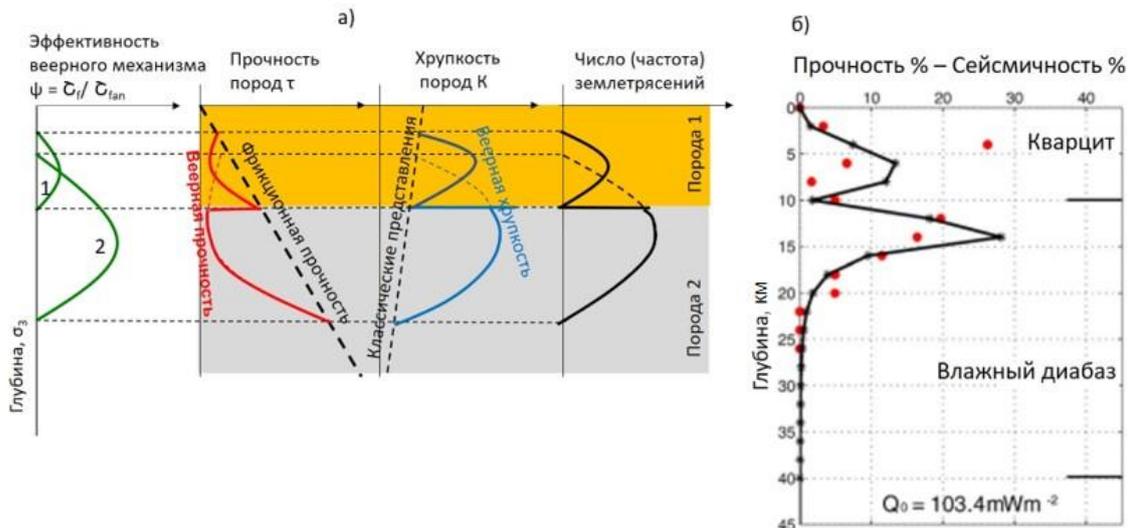


Рис. 38. Вариация эффективности веерного механизма, веерной прочности, хрупкости и соответствующей активности (числа) землетрясений с глубиной для земной коры, состоящей из двух слоев пород разной прочности.

На рисунке 38 схематично изображена структура земной коры, состоящей из двух слоев горных пород. Верхний слой представлен относительно слабой породой 1, а нижний слой более прочной породой 2. Вариация эффективности веерного механизма с глубиной для обеих пород показана зелеными кривыми. Порода 1 проявляет меньшую эффективность и в меньшем диапазоне давлений σ_3 (или глубин) по сравнению с породой 2. Соответствующие вариации веерной прочности и веерной хрупкости обеих пород показаны красными и синими кривыми.

Важно отметить, что толщина слоя породы 1 оказалась достаточной, чтобы вместить полностью вариацию веерной эффективности. В серединной области этого слоя достигается минимум прочности и максимум хрупкости, а в нижней части слоя веерный механизм перестает работать. Поскольку сочетание этих свойств определяет активность землетрясений, то в серединной части этого слоя наблюдается максимальное число землетрясений, а в нижней части слоя число землетрясений падает. Черные кривые отражают эту ситуацию.

Слой породы 2 начинается на глубине, где давления σ_3 достаточно высоки, чтобы сразу вызвать высокую эффективность веерного механизма и, соответственно, высокую активность землетрясений в данной породе. С ростом глубины активность землетрясений сначала растет, а затем падает в соответствии с активностью веерного механизма. Рассмотренное на данной схеме поведение землетрясений объясняет реальную ситуацию, показанную на рис. 38б [Albaric et al., 2009]. Здесь верхний слой представлен относительно слабым кварцитом, а нижний слой прочным диабазом.

Веерный механизм как самый опасный механизм разрушения пород на сейсмогенных глубинах земной коры

Карта землетрясений на рис. 1 показывает, что абсолютное большинство землетрясений в земной коре образуется вне существующих глобальных разломов между тектоническими плитами. Зоны сейсмической активности по площади могут быть очень широкими, а по глубине могут достигать 40 км. Рисунок 39 поясняет данную особенность землетрясений с точки зрения веерного механизма. На рисунке 39а показаны диаграммы, отражающие распределение прочностных свойств горных пород с глубиной (или σ_3), как обсуждалось на рис. 38. Серая зона на диаграмме соответствует видам напряженного состояния в массиве, при которых может произойти землетрясение, вызванное веерным механизмом. Здесь вид напряженного состояния характеризуется уровнем сдвиговых напряжений τ и уровнем минимального главного напряжения σ_3 . Вся серая зона находится в пределах глубин сейсмогенного слоя. Рассмотрим ситуацию в точке R на диаграмме, для которой $\tau = \tau_R$, а $\sigma_3 = \sigma_{3(R)}$.

На рисунке 38б показан фрагмент горного массива в районе точки R на четырех стадиях (0–3) формирования землетрясений. На стадии 0 массив включает один существующий разлом. Для каждой стадии графики внизу показывают характеристики приложенных сдвиговых напряжений и прочности массива. Здесь, $\tau_{u(R)}$ – прочность цельной породы; $\tau_{f(R)}$ – фрикционная прочность разлома; $\tau_{fan(R)}$ – веерная прочность и $\tau_{0(R)}$ – начальное сдвиговое напряжение. Поскольку на всех стадиях приложенное сдвиговое напряжение меньше фрикционной прочности, то с точки зрения стик-слип механизма ситуация является устойчивой.

Однако динамические трещины сдвига могут образовываться в цельных породах, примыкающих к существующему разлому. Это происходит следующим образом. Существующие разломы являются источниками повышенных локальных напряжений. Например, повышенные напряжения могут

образовываться в цельных породах вблизи уступа, показанного на рис. 38б (стадия 0). Когда концентрация напряжений приближается к уровню прочности $\tau_{u(R)}$, то начинается процесс образования локализованных трещин отрыва, формирующих веерную структуру. Как было показано на рис. 21а, одновременно могут образовываться двойные веерные структуры, способные создавать спонтанные трещины, развивающиеся в двух направлениях. Полностью сформированный веер имеет сопротивление сдвигу ниже, чем приложенные напряжения ко всему массиву $\tau_{fan(R)} < \tau_{0(R)}$, поэтому он создает спонтанную трещину (I), распространяющуюся через весь слабо нагруженный массив (стадия 1).

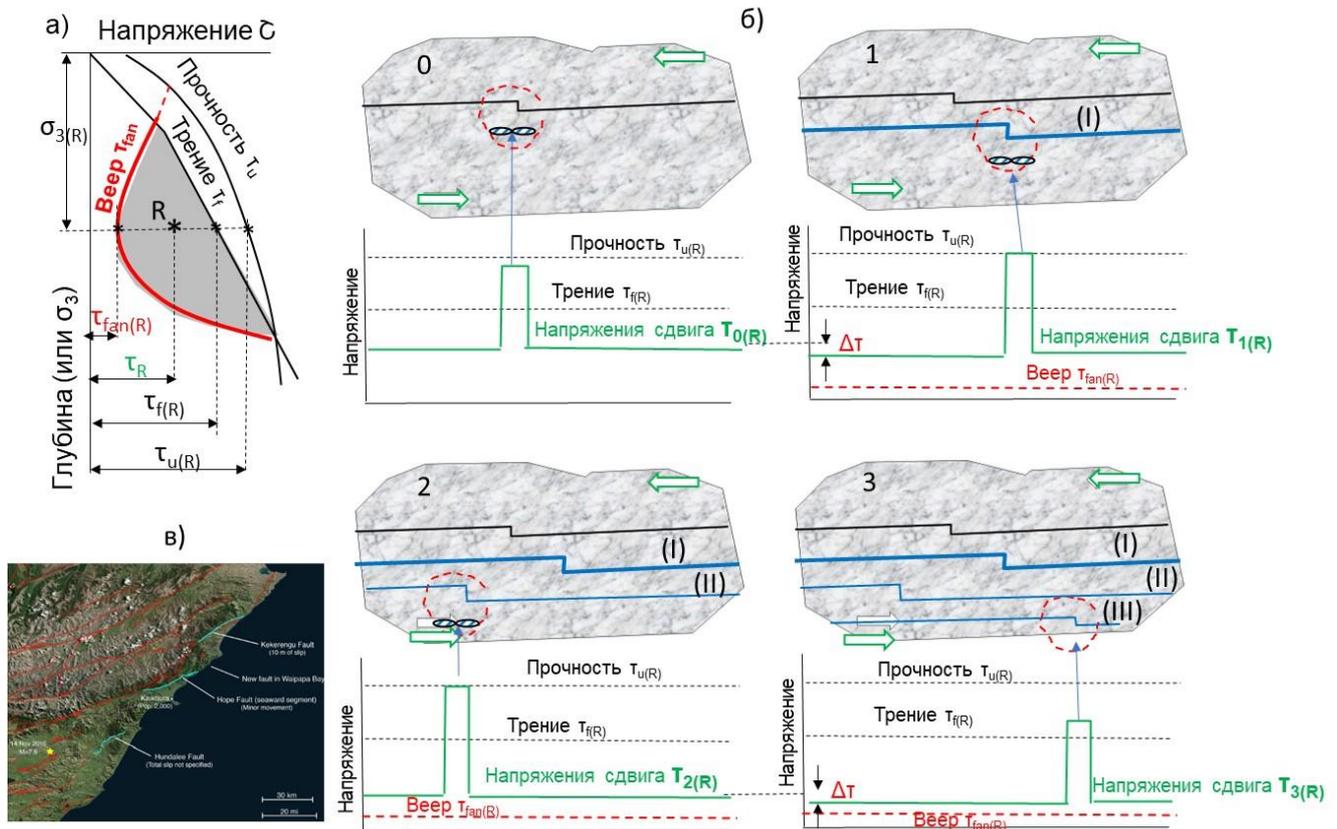


Рис. 39. Принцип создания новых динамических разломов веерным механизмом в цельных породах при напряжениях сдвига ниже фрикционной прочности существующих разломов.

В результате разрушения уровень приложенных напряжений снижается, обеспечивая соответствующий сброс напряжений $\Delta\tau = \tau_{0(R)} - \tau_{1(R)}$. Поскольку всякий новый разлом является также концентратором напряжений, то, по тому же принципу, может организоваться следующая трещина (II). И так далее. Этот процесс может продолжаться до тех пор, пока приложенные напряжения не снизятся до безопасного уровня, приблизившись к веерной прочности. Новые разломы могут образовываться сразу за первым разломом в виде афтершоков или со временем по мере накопления напряжений. Рисунок 39в показывает целую череду разломов, которые вызвали сильные землетрясения в Новой Зеландии (<https://temblor.net/>) в разные времена. Все землетрясения были связаны с формированием новых разломов в цельных породах вместо скольжения по уже существующему.

Рассмотренный механизм землетрясений объясняет природу основных парадоксов землетрясений:

1. Образование новых разломов в прочных цельных породах при низких сдвиговых напряжениях, которые могут быть на порядок ниже фрикционной прочности.

2. Разрушение цельных пород сопровождается малым сбросом напряжений (стресс дроп) по сравнению с большим сбросом при разрушении в лаборатории.

3. Несмотря на то что существующие разломы представляют слабейшие элементы в структуре массива, разрушение цельных пород является предпочтительным из-за сильного ослабления цельных пород веерным механизмом.

4. Веерный механизм может создавать целые кластеры новых разломов, вызывая соответствующие землетрясения.

Учитывая названные особенности веерного механизма и тот факт, что баланс энергии веерного механизма имеет принципиально важные преимущества в сравнении с балансом энергии стик-слип механизма (см. рис. 32 и 33), можно заключить, что веерный механизм является самым опасным механизмом разрушения на сейсмогенных глубинах земной коры. Он создает подавляющее большинство землетрясений на этих глубинах.

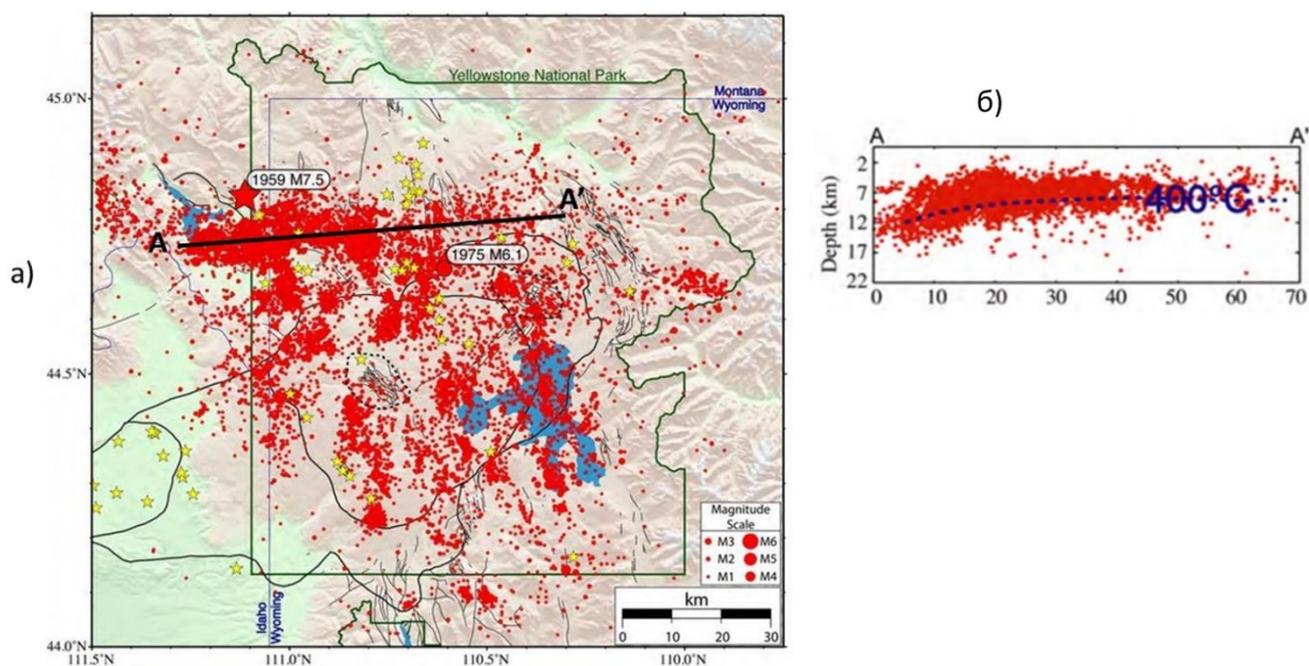


Рис. 40. Карты распределения землетрясений в районе Йеллоустоунского вулкана в плоскости (а) и в разрезе (б) вдоль линии А–А [Smith et al., 2009].

Можно предположить, что веерный механизм является также основным механизмом, вызывающим обильные землетрясения в вулканических районах. Между вулканами и землетрясениями происходит тесное взаимодействие [Smith et al., 2009; Fouch, 2012; Leonard, Liu, 2016]. Вулканы активизируют землетрясения, а землетрясения активизируют вулканы. Вопрос состоит в том, какой механизм землетрясений действует на базе вулканов. Карты распределения землетрясений в районе Йеллоустоунского вулкана на рис. 40 [Smith et al., 2009] показывают, что землетрясения активизируются на сейсмогенных глубинах, типичных для работы веерного механизма. В статье [Tarasov, 2023b] предложена гипотетическая модель создания магмы при землетрясениях, вызванных сверхсдвиговыми и сверхзвучковыми разломами на базе веерного механизма.

Техногенные землетрясения, вызываемые веерным механизмом

Техногенные землетрясения и подземные динамические явления (например, глубинные горные удары) являются результатом человеческой деятельности, вызывающей изменение напряженного состояния в земной коре. Техногенная сейсмичность связана с различными индустриальными процессами, например: горными работами, строительством плотин, масштабных сооружений, подземных газовых хранилищ, извлечением геотермальной энергии, производством гидроразрывов [McGarr et al., 2002; Gibowicz, 2009; Gaucher et al., 2015]. Согласно существующим концептам, техногенная сейсмичность может быть вызвана различными механизмами, например: реактивацией существующих разломов, изменением порового давления, воздействием температуры, геохимическими реакциями и др. Исследования в этих направлениях активно развиваются.

Веерный механизм, как самый опасный механизм разрушения пород на сейсмогенных глубинах, может также вызывать техногенные динамические процессы. Рисунок 41 объясняет возможную роль веерного механизма при создании глубинного землетрясения на базе существующего разлома от воздействия некоторого источника дополнительных напряжений (массивного сооружения), находящегося на поверхности земли. Из-за огромного расстояния от источника дополнительных напряжений до разлома, прирост напряжений на нем составляет небольшую величину. С точки зрения современных представлений для того, чтобы вызвать потерю устойчивости на разломе он должен находиться в напряженном состоянии, близком к предельному, соответствующему фрикционной прочности τ_{fs} . В отличие от этого подхода веерный механизм может вызвать землетрясение при относительно низких напряжениях на разломе.

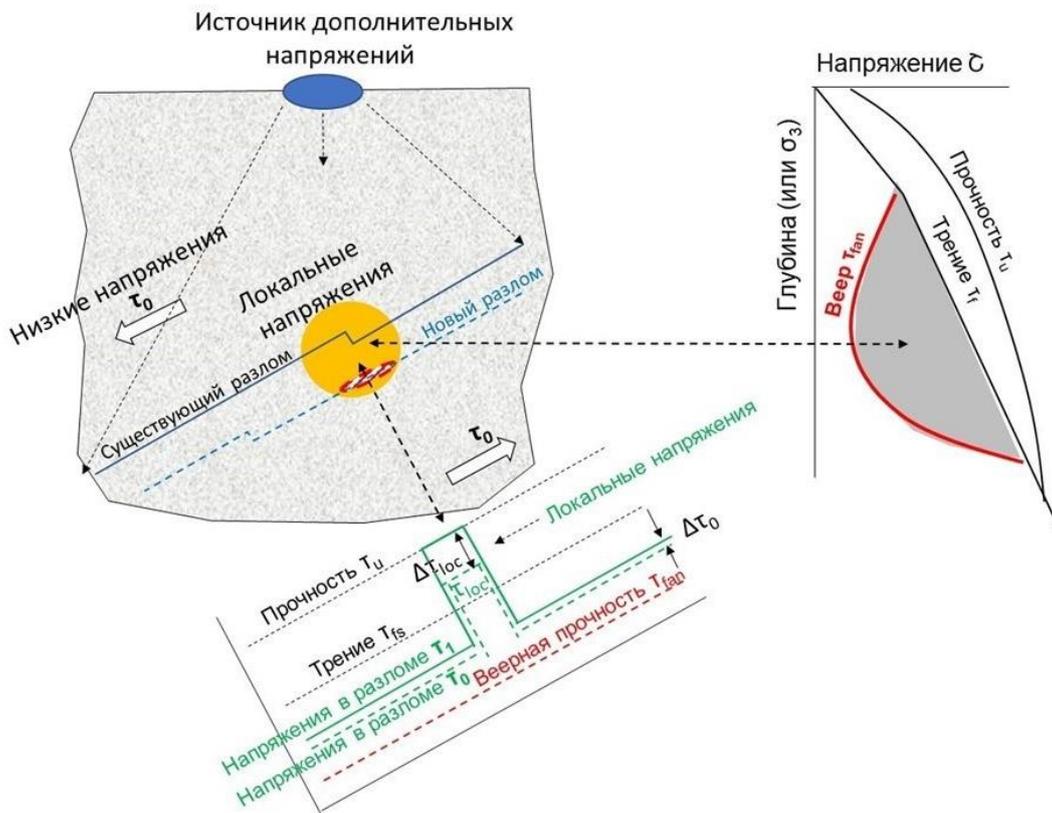


Рис. 41. Объяснение причины техногенного землетрясения на большой глубине, вызванного строительством массивного сооружения на поверхности, с точки зрения веерного механизма.

Прежде всего нужно отметить, что разлом находится на глубине, соответствующей зоне активности веерного механизма. Это иллюстрируется диаграммой «напряжение–глубина» справа на рис. 41. График внизу показывает, что начальное сдвиговое напряжение в массиве и на разломе τ_0 до строительства сооружения существенно ниже фрикционной прочности τ_{fs} . При этом локальное напряжение τ_{loc} в зоне концентрации ниже предела прочности породы τ_u . После строительства сооружения общее напряжение в разломе поднялось на малую величину $\Delta\tau_0$, в отличие от большого прироста локальных напряжений $\Delta\tau_{loc}$ в зоне концентрации. Высокие локальные напряжения, достигшие предела прочности пород, вызовут процесс трещинообразования и формирования веерной структуры. Поскольку сопротивление сдвигу полного веера τ_{fan} ниже уровня приложенных напряжений τ_1 , то произойдет спонтанный рост новой динамической трещины и, как следствие, землетрясение.

Создание первого разлома может вызвать формирование последующих разломов. Suckale (2009) отметил, что почти все исследования наведенной сейсмичности на месторождениях углеводородов подтвердили, что землетрясения имеют выраженную тенденцию к образованию кластеров или роев (clusters or swarms). Заметим, что такой характер сейсмичности является типичным для веерного механизма.

Разломы с высокими фильтрационно-емкостными свойствами

Структура трещин, создаваемых веерным механизмом, имеет еще одну важную особенность. Она обладает высокими емкостными и фильтрационными свойствами. Пустотные пространства образуются между структурными плитками при их вращении. Веер может оставлять после себя плиточную структуру с разными углами разворота плиток в зависимости от величины сдвига берегов трещины. На рисунке 42а показаны три разлома с плиточной структурой, наклоненной к плоскости разлома под углами $\alpha_t = 70^\circ, 95^\circ, 125^\circ$. Здесь приняты следующие обозначения: Δ_{fan} – это размер сдвига берегов трещины, сопровождающегося полным разворотом плиток от α_0 до $-\alpha_0$; d_{fault} – это размер сдвига при частичном развороте плиток. Размер сдвига определяется количеством энергии, накопленной в материале перед разрушением. Фотографии реальных разломов с плиточной структурой, наклоненной под такими же углами, показаны на рис. 42а.

Схема на рис. 42б поясняет особенности образования пустотного пространства. Она показывает, как разворот плиток меняет поперечное сечение межплиточного пространства. На начальной стадии, трещины отрыва и плитки наклонены под углом α_0 и структура очень компактная. Величина начального угла α_0 зависит от вида напряженного состояния и может быть в пределах $\alpha_0 = 30^\circ \div 40^\circ$ (Hogii, Nemat-Nasser, 1985; Reches, Lockner, 1994). При сдвиге берегов трещины все плитки подвергаются развороту, образуя пустотное пространство. Отношение z между площадью сечения пустотного пространства и площадью сечения структуры в начальной момент ее образования может быть определено из геометрических характеристик, показанных на рис. 42б. Здесь s – расстояние между соседними плитками; w – ширина плиток. Отсюда, $z = (s - w) / s = 1 - \sin \alpha_0$.

Из этого соотношения находим, что наибольшее пустотное пространство может быть образовано при развороте плиток с начальным углом $\alpha_0 = 30^\circ$ до угла $\alpha_t = 90^\circ$, которое характеризуется величиной $z = 0.5$. Структура с такой характеристикой обладает высокими емкостными и фильтрационными свойствами. При других сочетаниях данных углов эти свойства структуры сохраняются, но проявляются в меньших

значениях. Принимая во внимание тот факт, что веерный механизм может образовывать целые кластеры новых разломов в границах сейсмогенного слоя, такие зоны в земной коре могут служить накопителями и хранителями жидких и газообразных полезных ископаемых.

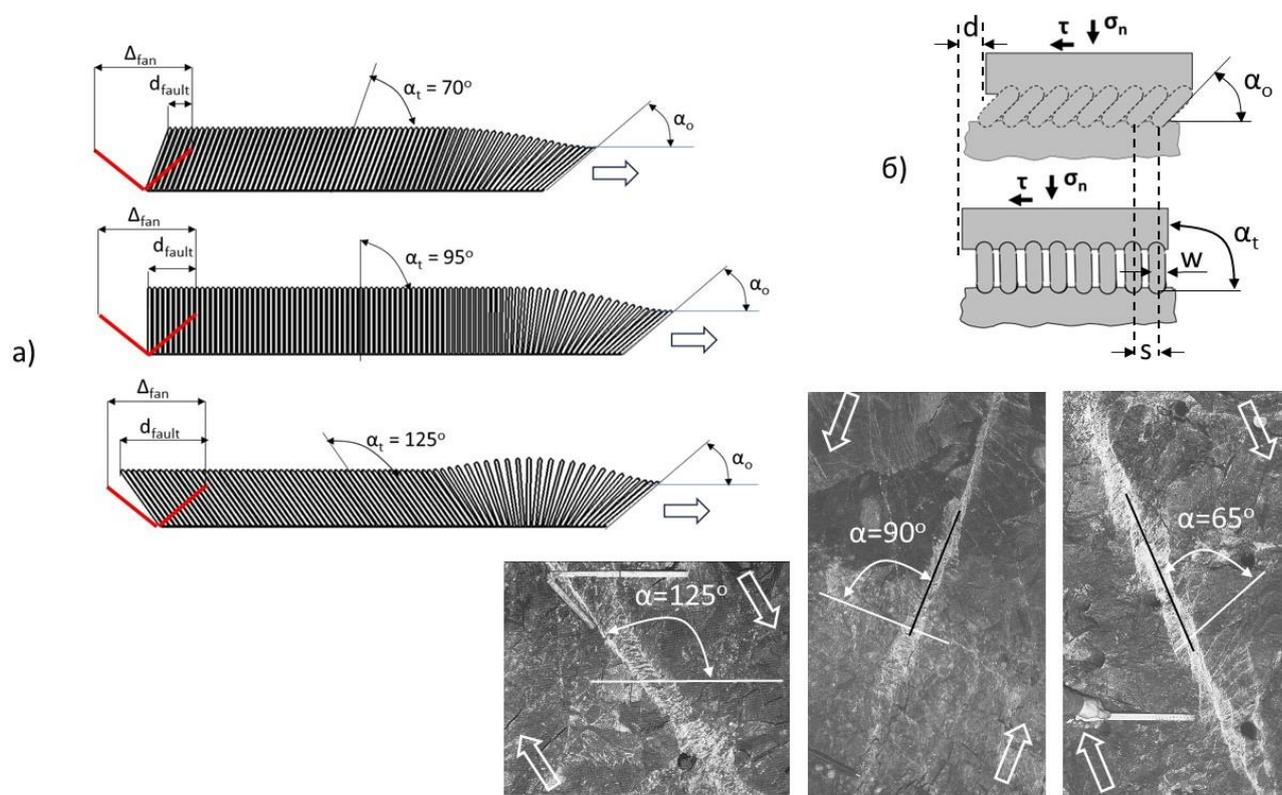


Рис. 42. Принцип образования пустотного пространства в разломах, созданных на базе веерного механизма.

Веерный механизм в сегментированных разломах

В предыдущих разделах мы обсуждали принципы работы веерного механизма в простейших трещинах сдвига, которые распространяются как непрерывные единообразные формирования. В данном разделе будет рассмотрена роль веерного механизма в развитии сложных разломов, представляющих собой сегментированные и мультииерархические композиции.

Для начала напомним основные принципы эволюции сложных трещин сдвига, описанных в работе [Otsuki, Dilov, 2005], по результатам экспериментов, проведенных на образцах горных пород при высоких боковых давлениях $\sigma_3 = 100$ МПа. Эти результаты представлены на рис. 43а. Здесь приведены фотографии четырех стадий развития сегментированной трещины, которая растет слева направо. Трещина развивается за счет дистанционного запуска новых сегментов, показанных белыми линиями. Новые сегменты запускаются за счет повышенных напряжений, бегущих впереди трещины, и распространяются в двух направлениях – навстречу предыдущему сегменту и от него. При встрече соседних сегментов они образуют ступень и перекрытую зону компрессионного типа. Otsuki, Dilov [2005] отмечают следующие особенности процесса разрушения:

1. Трещина развивается как мультииерархическая сегментированная формация.
2. Сегментирование, как механизм развития трещины, действует на всех иерархических уровнях.

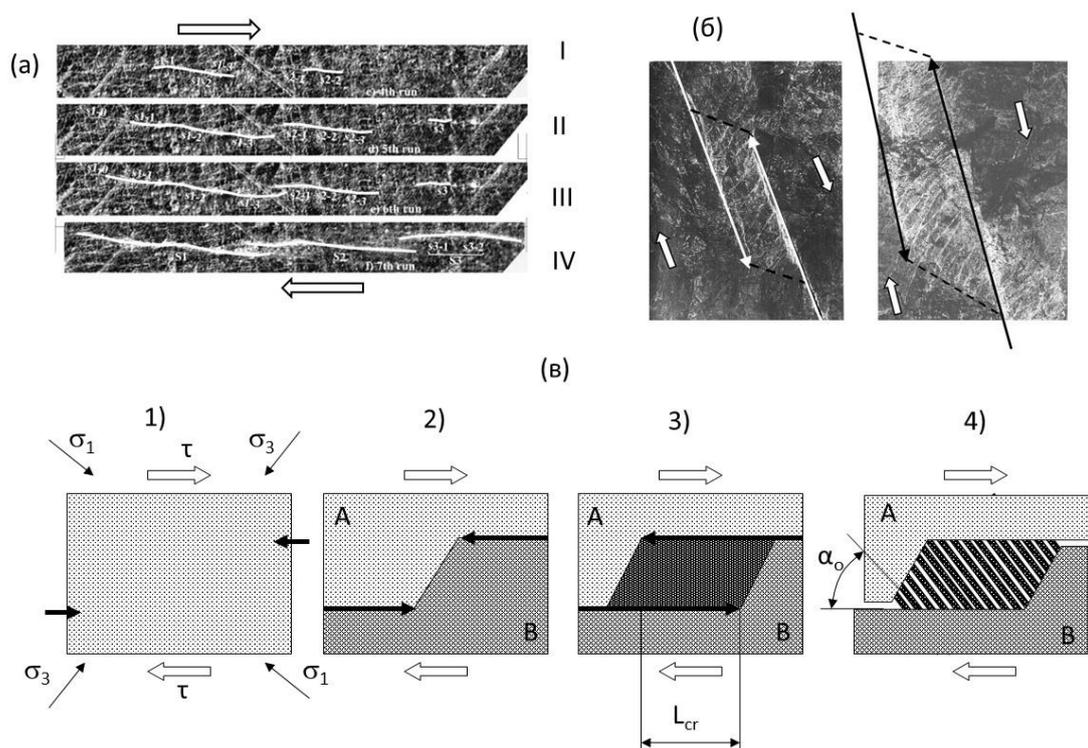


Рис. 43. Принцип образования плиточной структуры в сегментированных разломах. Фотографии взяты из [Ortlepp, 1997; Otsuki, Dilov, 2005].

3. Сегментирование является результатом дистанционного запуска (triggering) нового сегмента.
4. Предыдущий и последующий сегменты развиваются навстречу друг другу и образуют при встрече ступень в виде перекрытой зоны (jog).
5. Ступени компрессионного типа являются типичными для высоких давлений σ_3 .
6. Когда несколько сегментов данного иерархического уровня объединяются, то они начинают вести себя как единый сегмент более высокого иерархического уровня.
7. Сегмент более высокого уровня может запустить новый сегмент на большей дистанции.
8. Новый запущенный сегмент стартует как сегмент первого иерархического уровня и далее развивается по описанному выше сценарию.

Поведение породы в компрессионных зонах зависит от прочности пород и от уровня минимального главного напряжения σ_3 . У слабых пород эта зона подвергается бесформенному смятию. Поведение прочных пород проиллюстрировано на рис. 43б и в. На фотографиях рис. 43б видна структура компрессионных ступеней, образованных в результате встречи двух сегментов [Ortlepp, 1997]. Эта структура состоит из эшелона пластинок, разделенных трещинами отрыва, и подобна структуре, рассмотренной ранее для простейших трещин сдвига. Однако механизм образования данной структуры иной, как показано на рис. 43в [Tarasov, Ortlepp, 2007].

На схеме изображены четыре стадии встречи сегментов. На стадии 1 показаны направления действия главных и сдвиговых напряжений σ_1 , σ_3 и τ , а также фрагментыдвигающихся навстречу друг другу сегментов. На стадии 2 порода, включающая приближающиеся сегменты, разделяется на два блока А и В, которые сдвиговыми напряжениями прижимаются друг к другу [Segal, Pollard, 1980]. Высокая сила прижатия обеспечивается благодаря тому, что сопротивление сдвигу вдоль сегментов снижено до

значения фрикционной прочности. При дальнейшем росте сегментов такому же высокому сжатию подвергается вся зона перекрытия (стадия 3). Когда достигается критическая длина этой зоны L_{cr} , порода внутри нее разделяется трещинами отрыва на эшелон пластинок, которые могут поворачиваться, обеспечивая сдвиг между блоками. После этого рост сегментов прекращается. Направление трещин отрыва в момент их формирования совпадает с направлением действия максимального главного напряжения σ_1 . По отношению к плоскости сдвига начальный угол трещин отрыва составляет $\alpha_0 \approx (30^\circ \div 40^\circ)$ по аналогии с обсужденным ранее веерным механизмом.

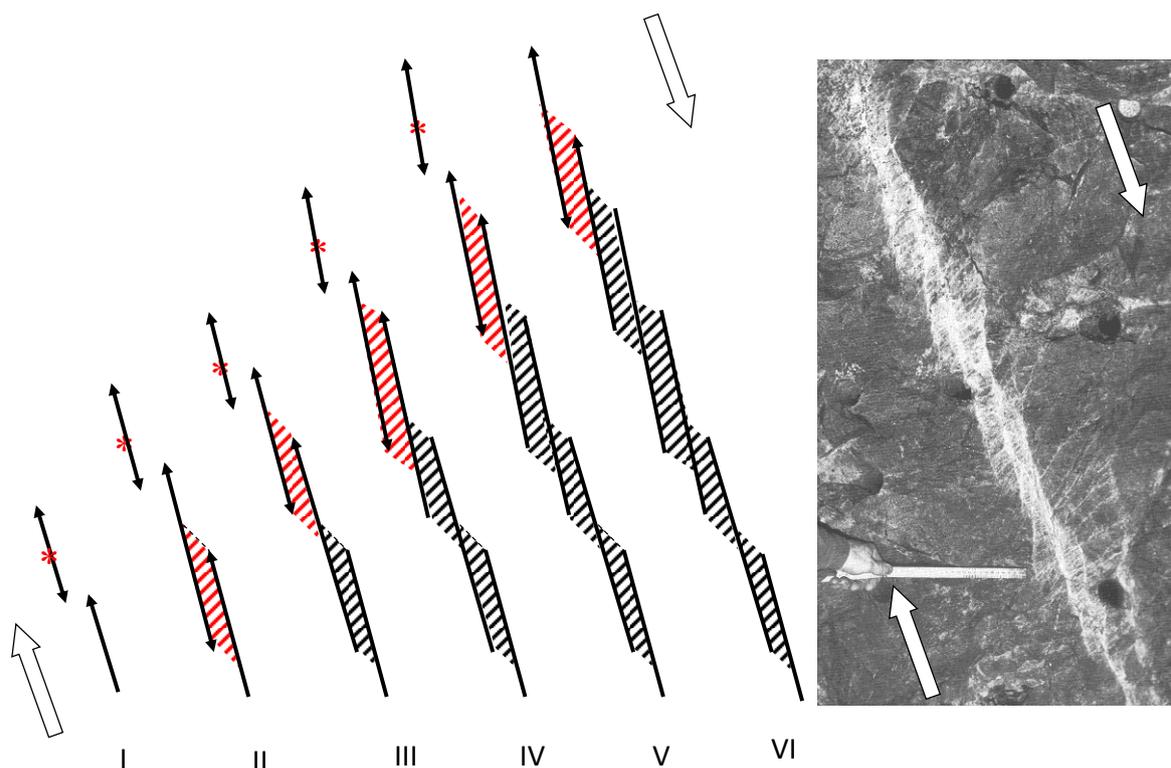


Рис. 44. Принцип формирования каскадных разломов с повышенными фильтрационными и емкостными свойствами. Фотография из [Ortlepp, 1997].

На базе рассмотренного механизма создания пластинчатых блоков, многосегментные трещины могут образовывать многокаскадный разлом более высокого иерархического уровня с пластинчатой внутренней структурой, обладающей повышенными фильтрационно-емкостными свойствами. Фотография такого разлома и принципиальная схема его роста в шести стадиях показаны на рис. 44. Разлом растет снизу вверх. На стадии 1 начальная трещина первого иерархического уровня запускает впереди себя новую трещину, представляющую собой новый сегмент. При встрече на стадии II эти сегменты образуют компрессионную зону, которая разделяется на пластинки на критической стадии развития. Следующий запущенный сегмент при встрече на стадии III создает очередной блок структурных пластинок и т. д. В результате получается разлом более высокого иерархического уровня, состоящий из каскада блоков структурных пластинок.

Важной особенностью развития мультииерархических динамических трещин является то, что они на всех уровнях управляются веерным механизмом. Рисунок 45 поясняет эту ситуацию. На рисунке 45а показаны три иерархических уровня развития разлома по схеме, обнаруженной в экспериментах [Otsuki,

Dilov, 2005]. Первый уровень представлен трещинами, управляемыми простейшей веерной структурой, которая детально обсуждалась выше. В результате процесса сегментирования создается трещина сдвига второго иерархического уровня, где веер формируется на базе пластинчатых блоков, включенных в структуру трещины. Угол наклона пластинок в голове этой трещины меняется от α_0 до $-\alpha_0$, создавая веер каскадного типа (показан красным цветом). На третьем иерархическом уровне соблюдается тот же принцип. Необходимо подчеркнуть, что каскадный веер обладает теми же феноменальными свойствами, что и проанализированные ранее свойства простейшего веера.

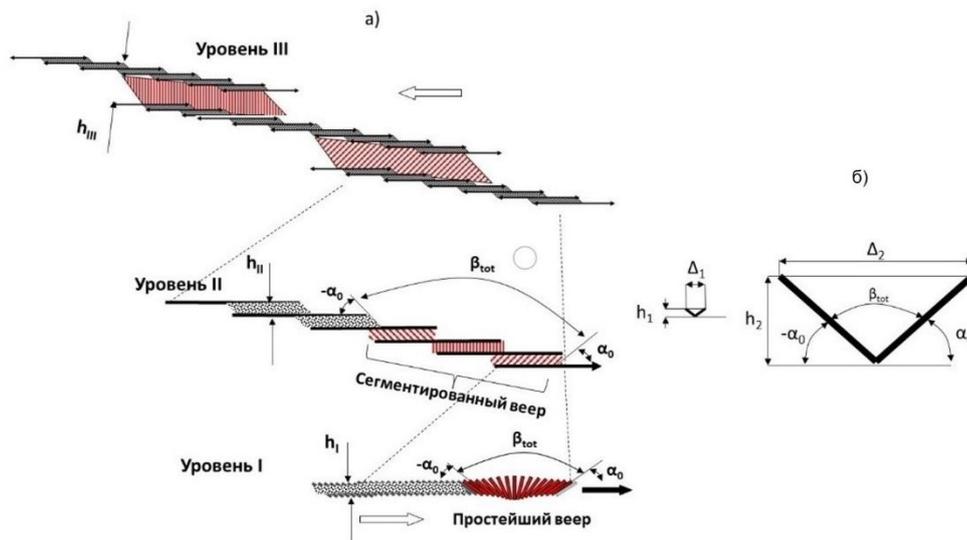


Рис. 45. Принцип образования веерной структуры в сегментированных разломах.

Следует заметить, что полный веер может быть сформирован при условии достаточной величины сдвига Δ между берегами трещины. На рисунке 45б показано, что эта величина зависит от толщины трещины h . Для тонкой трещины толщиной h_1 достаточно малого сдвига Δ_1 , а для толстой трещины h_2 необходим большой сдвиг Δ_2 . Поэтому тонкие трещины с большей вероятностью управляются полным веером по сравнению с толстыми трещинами, где неполный веер может оставлять пластинчатую структуру, расположенную под большим углом σ_t . Чем ближе этот угол к 90° , тем выше фильтрационные и емкостные свойства разлома. Кроме того, абсолютная величина пустотного пространства в пластинчатой структуре, расположенной под углом 90° , выше у толстого разлома по сравнению с тонким.

Веерный механизм вместо гидроразрыва для создания трещин с большой проницаемостью

До сих пор мы рассматривали веерный механизм как самый опасный механизм разрушения, действующий на сейсмогенных глубинах земной коры и создающий подавляющее большинство землетрясений. Землетрясения – это опасные природные явления, которые принесли множество бед человечеству. Но веерный механизм может сослужить и полезную службу, если научиться управлять им. Зная природу этого механизма можно, например, предсказывать и предотвращать техногенные динамические явления в разных ситуациях. Другой аспект применения веерного механизма состоит в том, что он может быть активизирован искусственно для различных целей. В данном разделе мы обсудим возможность использования веерного механизма вместо гидроразрыва для создания трещин с высокой проницаемостью.

Гидроразрыв в настоящее время широко применяется для создания высокопроводимой трещины в целевом пласте для обеспечения притока добываемого флюида (газа, нефти, воды, конденсата) к забоям скважины. Методика гидроразрыва, положительные и отрицательные стороны его применения хорошо известны [Христианович, 1960; Korpos et al., 2014]. Здесь мы отметим только некоторые особенности этого метода, которые исключаются при создании трещин веерным механизмом.

Сущность метода гидравлического разрыва пласта заключается в том, что на забое скважины путем закачки вязкой жидкости (содержащей химические реагенты, песок или другие проппанты) создаются высокие давления, превышающие в 1.5–2 раза пластовое давление, в результате чего пласт расслаивается и в нем образуются трещины. Гидравлический разрыв пласта проводится при давлениях, достигающих до 100 МПа, с большим расходом жидкости и энергии при использовании сложной и многообразной техники. Трещина растет только при создании в ней гидравлического давления. Использование проппантов необходимо для удержания трещины открытой после сброса гидравлического давления. После гидроразрывов остаются реагенты, что наносит значительный ущерб окружающей среде.

Феноменальная особенность веерного механизма состоит в том, что после создания первичной веерной структуры (этот вопрос рассмотрен дальше) трещина распространяется в цельной породе спонтанно за счет внутренней энергии, содержащейся в разрушаемой породе. Естественные сдвиговые напряжения в разрушаемом пласте, достаточные для развития трещины, могут быть на порядок ниже фрикционной прочности на данной глубине. Образующаяся трещина обладает невозвратными высокими фильтрационными свойствами без добавки проппантов.

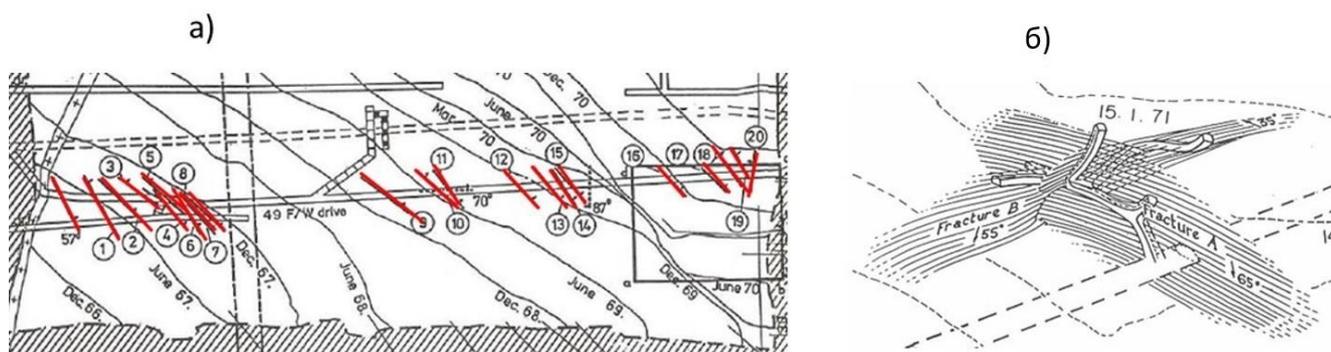


Рис. 46. а – Красными линиями показаны динамические разломы в цельных породах, которые образовывались при продвижении горных работ, б – общий вид таких динамических разломов.

Иллюстрация того, что динамические трещины сдвига, управляемые веерным механизмом, могут быть неминуемо активизированы при создании соответствующих условий, приведена на рис. 46а. Здесь показана схема глубокой выработки в Южной Африке, где глубинные горные удары, вызванные развитием спонтанных трещин сдвига (shear rupture rockburst), являются типичным явлением. Красные линии здесь обозначают такие трещины, которые возникают по мере продвижения горных работ. Общий вид этих трещин показан на рис. 46б.

Теперь обсудим вопрос о том, как можно активизировать такие трещины искусственно. Здесь следует взять на вооружение опыт активизации спонтанных сверхсдвиговых и сверхзвуковых трещин в лабораторных экспериментах [Griffith et al., 2009; Ngo et al., 2012]. Эксперименты проводились на образцах хрупких материалов, включающих плоскость раздела, которая была склеена хрупким клеем, сходным по

свойствам с основным материалом, но немного слабее (рис. 47а). В образце посередине плоскости раздела сверлилось сквозное отверстие малого диаметра и вставлялся медный стержень диаметром 1 μm (показано красным). После создания сдвиговых напряжений τ путем приложения нагрузки P , на медный стержень подавалось высокое электрическое напряжение, которое вызывало взрыв стержня. Этот взрыв активизировал спонтанную трещину, которая распространялась от скважины в обе стороны с экстремальными скоростями даже при аномально низких сдвиговых напряжениях.

Изучение поверхностей разрушения показал, что они испещрены параллельными трещинами отрыва через всю плоскость, как показано на рис. 47б. Анализ подобных экспериментов приводит к однозначному выводу, что разрушение данных образцов осуществлялось веерным механизмом. Принципиальная схема работы веерного механизма в таких условиях показана на рис. 47в.

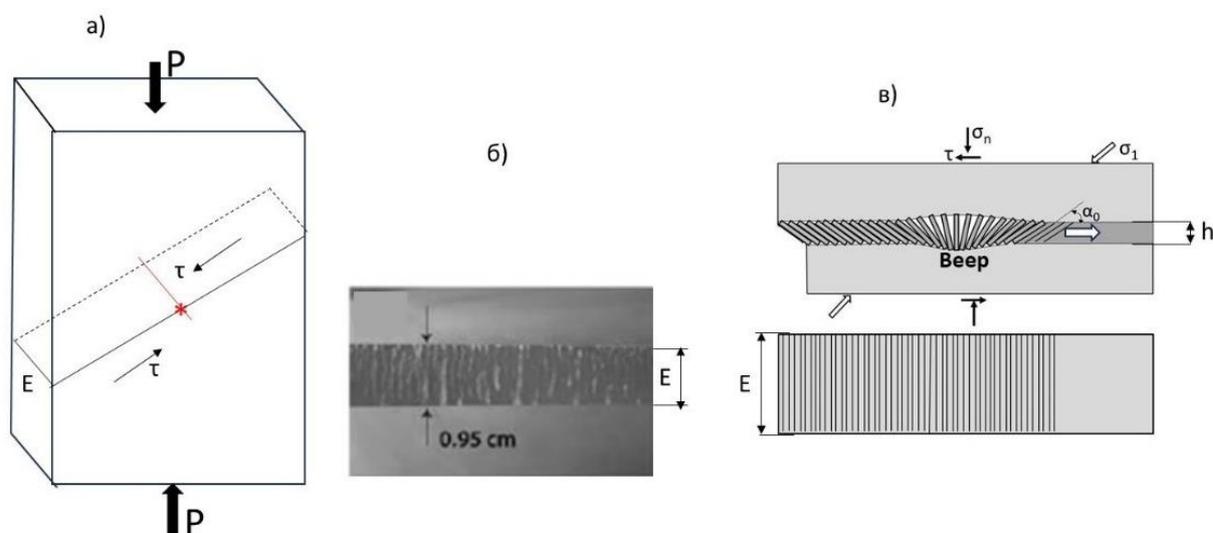


Рис. 47. Принцип активизации спонтанных экстремальных трещин сдвига, управляемых веерным механизмом, в лабораторных условиях.

Можно предположить, что подобный метод активизации веерного механизма на больших глубинах в пределах сейсмогенного слоя также возможен путем взрыва на изолированном нижнем участке скважины, как показано на рис. 48а. Одновременные взрывы на нескольких скважинах могут оказаться более предпочтительными для некоторых целей.

Использование веерного механизма для создания высокопроводных трещин сдвига на больших глубинах может оказаться **незаменимым** при строительстве петротеплоэлектростанций (ПетроТЭС). Дело в том, что для таких станций вода, подаваемая через нагнетательную скважину в подземный коллектор, должна возвращаться на поверхность через эксплуатационную скважину в виде пара (см. схему на рис. 48б). Необходимые для этого температуры в 250–280 $^{\circ}\text{C}$ обычно находятся на глубинах около 10 км [Гнатусь, Хуторской, 2010]. Создание коллектора в прочных породах, находящихся на этих глубинах, методом гидроразрыва весьма проблематично. Для этого понадобится очень высокое гидравлическое давление вплоть до 300 МПа. Веерный же механизм на этих глубинах работает с высокой эффективностью в прочнейших породах и может создавать необходимые разломы (коллекторы) с минимальными затратами.

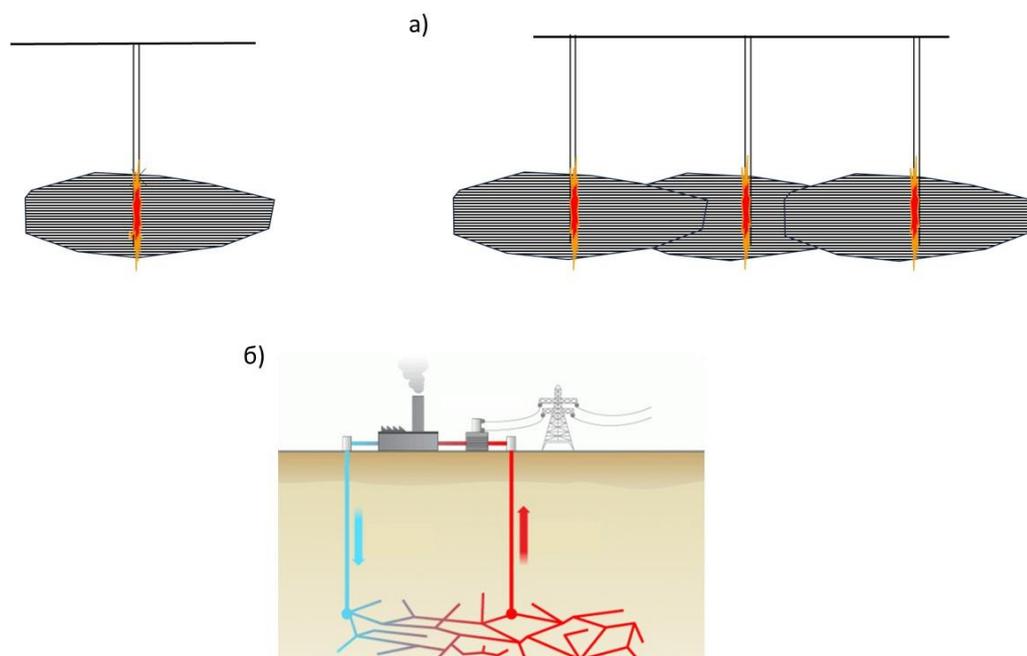


Рис. 48. Возможные схемы создания коллекторов на больших глубинах путем активизации веерного механизма локальными взрывами. Эти коллекторы могут быть использованы для создания петротеплоэлектростанций и для увеличения нефтеотдачи трудноизвлекаемых запасов.

Для освоения метода создания разломов на базе веерного механизма необходимы специальные исследования, включающие лабораторные и натурные эксперименты, в том числе создание испытательных машин нового поколения, которые обсуждались на рис. 8. После разработки экономичных технологий по созданию глубоких скважин и высокопроводных глубинных разломов (коллекторов), появится реальная возможность реализовать в широком масштабе давние задумки российских и зарубежных ученых об извлечении тепловой энергии, практически неисчерпаемых петротермальных ресурсов Земли [Дядькин, 1974, 1989; Lund, Freeston, 2000; Гнатусь, Хуторской, 2010]. На Всемирных геотермальных конгрессах, состоявшихся в 2000 г. в Японии и в 2005 г. в Турции, отмечалось, что использование тепла Земли станет одним из магистральных направлений в энергетике третьего тысячелетия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что общепринятое сегодня понимание основного механизма землетрясений, как динамического сдвига по существующим разломам, является необоснованным. Это понимание базируется на убеждении, что существующие разломы представляют слабые элементы структуры земной коры. В статье приведены экспериментальные результаты, которые демонстрируют, что цельные прочные породы при высоких давлениях, соответствующих сейсмогенным глубинам, могут разрушаться ранее неизвестным веерным механизмом при сдвиговых напряжениях существенно меньших фрикционной прочности существующих разломов. Этот же механизм делает прочные породы суперхрупкими на сейсмогенных глубинах.

Проанализированы физические основы работы веерного механизма и показано, что он обладает целым рядом феноменальных свойств, например:

- сопротивлением сдвига близким к нулю;

– является мощным усилителем низких приложенных сдвиговых напряжений до значений, превышающих исходную прочность пород;

– создает условие самодисбаланса, что вызывает спонтанное разрушение даже при низких приложенных напряжениях;

– обеспечивает баланс энергии разрушения, позволяющий достигать сверхзвуковые скорости роста трещин;

– создает разломы с высокими фильтрационно-емкостными свойствами.

Такие особенности веерного механизма делают его самым опасным механизмом разрушения в земной коре и создателем подавляющего большинства землетрясений. В статье показано, что веерный механизм может быть использован в практических целях, например, для создания коллекторов высокой проницаемости на больших глубинах для петротеплоэлектростанций и для увеличения нефтеотдачи трудноизвлекаемых запасов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Гнатусь Н.А., Хуторской М.Д. Перспективы извлечения и использования тепла «сухих горных пород» – петротермальная энергетика России // Вестник РУДН, серия Экология и безопасность жизнедеятельности. 2010. № 4. С. 29–40.

Дядькин Ю.Д. Теплообмен в глубоких скважинах и зонах фильтрации при извлечении тепла сухих горных пород. Л.: Наука, 1974. 38 с.

Дядькин Ю.Д. Разработка геотермальных месторождений. М.: Недра, 1989. 228 с.

Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2015. 328 с.

Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.

Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 279 с.

Попков В.И. Разломы земной коры: не только каналы миграции, но и зоны аккумуляции нефти и газа // Геология, география и глобальная энергия. 2012. № 3 (46). С. 23–28.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.

Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М.: Недра, 1985. 271 с.

Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб.: Наука, 2001. 343 с.

Христианович С.А. Исследования механизма гидравлического разрыва пласта // Труды Института геологии и разработки горючих ископаемых. Т. 2: Материалы по разработке нефтяных и газовых месторождений. М., 1960. С. 159–165.

Abercrombie R.E., Rice J.R. Can observations of earthquake scaling constrain slip weakening? // Geophysical Journal International. 2005. Vol. 162. P. 406–424. doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02579.x.

Albaric J., Déverchère J., Petit C., Perrot J., Le Gall B. Crustal rheology and depth distribution of earthquakes: Insights from the central and southern East African Rift System // Tectonophysics. 2009. Vol. 468. P. 28–41. doi:10.1016/j.tecto.2008.05.021.

Archuleta R.J. A faulting model for the 1979 Imperial Valley earthquake // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1984. Vol. 89. P. 4559–4585. doi:10.1029/JB089iB06p04559.

- Ben-David O., Rubinstein S.M., Fineberg J.** Slip-stick and the evolution of frictional strength // *Nature*. 2010. Vol. 463. P. 76–79. doi:10.1038/nature08676.
- Bizzarri A., Spudich P.** Effects of supershear rupture speed on the high-frequency content of S waves investigated using spontaneous dynamic rupture models and isochrone theory // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2008. Vol. 113. B05304. doi:10.1029/2007JB005146.
- Bouchon M., Bouin M., Karabulut H., Toksoz M.N., Dietrich M., Rosakis A.J.** How fast is rupture during an earthquake? New insights from the 1999 Turkey earthquake // *Geophysical Research Letters*. 2001. Vol. 28. P. 2723–2726. doi:10.1029/2001GL013112.
- Broberg K.B.** Cracks and fracture. Academic Press, San Diego, 1999. doi:10.1016/B978-0-12-134130-5.X5000-4.
- Brown S.R.** Frictional heating on faults: Stable sliding versus stick slip // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1998. Vol. 103. P. 7413–7420. doi:10.1029/98JB00200.
- Brace W.F., Byerlee J.D.** Stick-slip as a mechanism for earthquakes // *Science*. 1966. Vol. 153. P. 990–992. doi:10.1126/science.153.3739.990.
- Brace W.F., Kohlstedt D.** Limits on lithospheric stress imposed by laboratory experiments // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1980. Vol. 85. P. 6248–6252. doi:10.1029/JB085iB11p06248.
- Brodsky E.E., Kanamori H.** Elastohydrodynamic lubrication of faults // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2000. Vol. 106. P. 16357–16374. doi:10.1029/2001JB000430.
- Byerlee J.D.** Friction of rocks // *Pure and Applied Geophysics*. 1978. Vol. 116. P. 615–626. doi:10.1007/BF00876528.
- Cook N.G.W.** The failure of rock // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. 1965. Vol. 2. P. 389–403. doi:10.1016/0148-9062(65)90004-5.
- Déverchère J., Petit C., Gileva N., Radziminovitch N., Melnikova V., San'kov V.** Depth distribution of earthquakes in the Baikal rift system and its implications for the rheology of the lithosphere // *Geophysical Journal International*. 2001. Vol. 146. P. 714–730. doi:10.1046/j.0956-540x.2001.1484.484.x.
- Dieterich J.H.** Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1979. Vol. 84. P. 2161–2168. doi:10.1029/JB084iB05p02161.
- Ellsworth W., Chiaraluce L.** Supershear during nucleation of the 2009 M 6.3 L'Aquila, Italy Earthquake // *Eos Transactions. AGU*. 2009. Vol. 90 (52). Abstract U13B–0068.
- Fouch M.J.** The Yellowstone hotspot: plume or not? // *Geology*. 2012. Vol. 40. P. 479–480. doi:10.1130/focus052012.1.
- Freund L.B.** Dynamic fracture mechanics. Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
- Gaucher E., Schoenball M., Heidbach O., Zang A., Fokker P.A., van Wees J.-D., Kohl T.** Induced seismicity in geothermal reservoirs: a review of forecasting approaches // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 52. P. 1473–1490. doi:10.1016/j.rser.2015.08.026.
- Gibowicz S.J.** Seismicity induced by mining: recent research // *Advances in Geophysics*. 2009. Vol. 51. P. 1–53. doi:10.1016/S0065-2687(09)05106-1.
- Gori M., Rubino V., Rosakis A.J., Lapusta N.** Pressure shock fronts formed by ultra-fast shear cracks in viscoelastic materials // *Nature Communications*. 2018. Vol. 9. 4754. doi:10.1038/s41467-018-07139-4.
- Griffith A.A.** The phenomena of rupture and flow in solids // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*. 1921. Vol. 221. P. 163–198. doi:10.1098/rsta.1921.0006.

- Griffith W.A., Rosakis A., Pollard D.D., Ko C.W.** Dynamic rupture experiments elucidate tensile crack development during propagating earthquake ruptures // *Geology*. 2009. Vol. 37. P. 795–798. doi:10.1130/G30064A.1.
- Heaton T.H.** Evidence for and implications of self-healing pulses of slip in earthquake rupture // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1990. Vol. 64. P. 1–20. doi:10.1016/0031-9201(90)90002-F.
- Horii H., Nemat-Nasser S.** Compression-induced micro-crack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1985. Vol. 90. P. 3105–3125. doi:10.1029/JB090iB04p03105.
- King G.C.P., Sammis C.G.** The mechanisms of finite brittle strain // *Pure and Applied Geophysics*. 1992. Vol. 138. P. 611–640. doi:10.1007/BF00876341.
- Kirby S.** Tectonic stress in the lithosphere: Constraints provided by the experimental deformation of rock // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1980. Vol. 85. P. 6353–6363. doi:10.1029/JB085iB11p06353.
- Kirby S.H., Raleigh C.B.** Mechanisms of high-temperature, solid-state flow in minerals and ceramics and their bearing on the creep behaviour of the mantle // *Tectonophysics*. 1973. Vol. 19. P. 165–194. doi:10.1016/0040-1951(73)90038-3.
- Kohlstedt D.L., Evans B., Mackwell S.J.** Strength of the lithosphere: constraints imposed by laboratory experiments // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1995. Vol. 100. P. 17589–17602. doi:10.1029/95JB01460.
- Koplos J., Tuccillo M.E., Ranalli B.** Hydraulic fracturing overview: How, where, and its role in oil and gas // *Journal American Water Works Association*. 2014. Vol. 106. P. 38–56. doi:10.5942/jawwa.2014.106.0153.
- Lachenbruch A.H.** Frictional heating, fluid pressure, and the resistance to fault motion // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1980. Vol. 85. P. 6097–6112. doi:10.1029/JB085iB11p06097.
- Lachenbruch A.H., Sass J.H.** Heat flow and energetic of the San Andreas fault zone // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1980. Vol. 85. P. 6185–6222. doi:10.1029/JB085iB11p06185.
- Leonard T., Liu L.** The role of a mantle plume in the formation of Yellowstone volcanism // *Geophysical Research Letters*. 2016. Vol. 43. P. 1132–1139. doi:10.1002/2015GL067131.
- Lu X., Lapusta N., Rosakis A.J.** Pulse-like and crack-like ruptures in experiments mimicking crustal earthquakes // *Proceedings of the National Academy of Science USA*. 2007. Vol. 104. P. 18931–18936. doi:10.1073/pnas.070426810.
- Lu X., Rosakis A.J., Lapusta N.** Rupture modes in laboratory earthquakes: Effect of fault prestress and nucleation condition. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2010. Vol. 115. B12302. doi:10.1029/2009JB006833.
- Lund J.W., Freeston D.H.** World-wide direct uses of geothermal energy 2000 // *Geothermics*. 2000. Vol. 30. P. 29–68. doi:10.1016/S0375-6505(00)00044-4.
- Maggi A., Jackson J.A., McKenzie D., Priestley K.** Earthquake focal depths, effective elastic thickness, and the strength of the continental lithosphere // *Geology*. 2000. Vol. 28. P. 495–498. doi:10.1130/0091-7613(2000)28<495:EFDEET>2.0.CO;2.
- McGarr A., Simpson D., Seeber L.** Case histories of induced and triggered seismicity // *International Geophysics*. 2002. Vol. 81, Part A. P. 647–661. doi:10.1016/S0074-6142(02)80243-1.
- McGarr A., Pollard D., Gay N.C., Ortlepp W.D.** Observations and analysis of structures in exhumed mine-induced faults // *U.S. Geological Survey Open File Report*. 1979. No. 79–1239. P.101–120.

- McKenzie D., Brune J.** Melting on fault planes during large earthquakes // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1972. Vol. 29. P. 65–78. doi:10.1111/j.1365-246X.1972.tb06152.x.
- Melosh H.J.** Dynamical weakening of faults by acoustic fluidization // *Nature*. 1996. Vol. 379. P. 601–606. doi:10.1038/379601a0.
- Needleman A.** An analysis of intersonic crack growth under shear loading // *Journal of Applied Mechanics*. 1999. Vol. 66. P. 847–857. doi:10.1115/1.2791788.
- Ngo D., Huang Y., Rosakis A., Griffith W.A., Pollard D.** Off-fault tensile cracks: A link between geological fault observations, lab experiments, and dynamic rupture models // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2012. Vol. 117. B01307. doi:10.1029/2011JB008577.
- Noda H., Dunham E.M., Rice J.R.** Earthquake ruptures with thermal weakening and the operation of major faults at low overall stress levels // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2009. Vol. 114. B07302. doi:10.1029/2008JB006143.
- Ohnaka M., Shen L.-F.** Scaling of the shear rupture process from nucleation to dynamic propagation: Implications of geometric irregularity of the rupturing surface // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1999. Vol. 104 (B1). P. 817–844. doi:10.1029/1998JB900007.
- Ortlepp W.D.** Rock fracture and rockbursts. The South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 1997. 98 p.
- Ortlepp W.D., Armstrong R., Ryder J.A., O'Connor D.** Fundamental study of micro-fracturing on the slip surface of mine-induced dynamic brittle shear zones // *Proceedings of the 6th International symposium on Rockburst and Seismicity in Mines / Potvin Y., Hudyma M. (Eds.). Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2005. P. 229–237. doi:10.36487/ACG_repo/574_20.*
- Otsuki K., Dilov T.** Evolution of hierarchical self-similar geometry of experimental fault zones: Implications for seismic nucleation and earthquake size // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2005. Vol. 110. B03303. doi:10.1029/2004JB003359.
- Peng S., Johnson A.M.** Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract*. 1972. Vol. 9. P. 37–86. doi:10.1016/0148-9062(72)90050-2.
- Perrin G., Rice J.R., Zheng G.** Self-healing slip pulse on a frictional surface // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1995. Vol. 43. P. 1461–1495. doi:10.1016/0022-5096(95)00036-I.
- Reches Z., Lockner D.A.** Nucleation and growth of faults in brittle rocks // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1994. Vol. 99. P. 18159–18173. doi:10.1029/94JB00115.
- Rice J.R.** *New perspectives on crack and fault dynamics*. Springer, Dordrecht, 2001. doi:10.1007/0-306-46956-1_1.
- Rice J.R.** Heating and weakening of faults during earthquake slip // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2006. Vol. 111. B05311. doi:10.1029/2005JB004006.
- Rosakis A.J., Xia K., Lykotrafitis G., Kanamori H.** Dynamic shear rupture in frictional interfaces: speeds, directionality, and modes // *Treatise on Geophysics / Schubert G. (Ed.). Elsevier, Amsterdam, 2007. Vol. 4. P. 183–213. doi:10.1016/B978-0-444-53802-4.00072-5.*
- Rubino V., Rosakis A.J., Lapusta N.** Understanding dynamic friction through spontaneously evolving laboratory earthquakes // *Nature Communications*. 2017. Vol. 8. 15991. doi:10.1038/ncomms15991.

- Rubinstein S.M., Cohen G., Fineberg J.** Detachment fronts and the onset of dynamic friction // *Nature*. 2004. Vol. 430. P. 1005–1009. doi:10.1038/nature02830.
- Ruina A.** Slip instability and state variable friction laws // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1983. Vol. 88. P. 10359–10370. doi:10.1029/JB088iB12p10359.
- Segall P., Pollard D.D.** The mechanics of discontinuous faults // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1980. Vol. 85. P. 4337–4250. doi:10.1029/JB085iB08p04337.
- Scholz C.H.** Earthquakes and friction laws // *Nature*. 1998. Vol. 391. P. 37–42. doi:10.1038/34097.
- Scholz C.H.** The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- Sibson R.H.** Interactions between temperature and fluid pressure during earthquake faulting—A mechanism for partial or total stress relief // *Nature*. 1973. Vol. 243. P. 66–68. doi:10.1038/physci243066a0.
- Silva V., Yepes-Estrada C., Weatherill G.** Part Three: Hazard specific risk assessment – earthquake. In book: Words into action guidelines national disaster risk assessment // *Words into Action Guidelines National Disaster Risk Assessment / Safaie S. (Ed.)*. United Nations International Strategy for Disaster Risk Reduction, Geneva, Switzerland, 2017.
- Smith R.B., Jordan M., Steinberger B., Puskas C.M., Farrell J., Waite G.P., Husen S., Chang W.-L., O'Connell R.** Geodynamics of the Yellowstone hotspot and mantle plume: Seismic and GPS imaging, kinematics, and mantle flow // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2009. Vol. 188. P. 26–56. doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.08.020.
- Suckale J.** Induced seismicity in hydrocarbon fields // *Advances in Geophysics*. 2009. Vol. 51. P. 55–106. doi:10.1016/S0065-2687(09)05107-3.
- Tarasov B.G.** Intersonic shear rupture mechanism // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. 2008. Vol. 45. P. 914–928. doi:10.1016/j.ijrmms.2007.10.002.
- Tarasov B.G.** Superbrittleness of rocks at high confining pressure // *Deep Mining 2010: Proceedings of the Fifth International Seminar on Deep and High Stress Mining*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2010. P. 119–133. doi:10.36487/ACG_repo/1074_08.
- Tarasov B.G.** Universal scale of brittleness for rocks failed at compression // *Proceedings of the 13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*. Melbourne, Australia, 2011. Vol. 2. P. 669–673.
- Tarasov B.G.** Depth distribution of lithospheric strength determined by the self-unbalancing shear rupture mechanism // *Proceedings of the ISRM International Symposium – Eurock 2013*. Wroclaw, Poland, 2013. P.165–170. doi:10.1201/b15683-25.
- Tarasov B.G.** Hitherto unknown shear rupture mechanism as a source of instability in intact hard rocks at highly confined compression // *Tectonophysics*. 2014. Vol. 621. P. 69–84. doi:10.1016/j.tecto.2014.02.004.
- Tarasov B.G.** Shear fractures of extreme dynamics // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016. Vol. 49. P. 3999–4021. doi:10.1007/s00603-016-1069-y.
- Tarasov B.G.** Shear ruptures of extreme dynamics in laboratory and natural conditions // *Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth Conference on Deep and High Stress Mining*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2017. P. 3–50. doi:10.36487/ACG_rep/1704_0.1_Tarasov.
- Tarasov B.G.** Dramatic weakening and embrittlement of intact hard rocks in the earth's crust at seismic depths as a cause of shallow earthquakes // *Earth crust / Nawaz M., Sattar F., Kundu S.N. (Eds.)*. IntechOpen, 2019. doi:10.5772/intechopen.85413.

- Tarasov B.G.** New physics of supersonic ruptures // Deep Underground Science and Engineering. 2023a. Vol. 2. P. 207–244. doi:10.1002/dug2.12050.
- Tarasov B.G.** Fan-hinged shear instead of frictional stick-slip as the main and most dangerous mechanism of natural, induced and volcanic earthquakes in the earth's crust // Deep Underground Science and Engineering. 2023b. Vol. 2. P. 305–336. doi:10.1002/dug2.12052.
- Tarasov B.G., Ortlepp W.D.** Shock loading-unloading mechanism in rockburst shear fractures in quartzite causing genesis of polyhedral sub-particles in the fault gouge // Proceeding of the Fourth International Seminar on Deep and High Stress Mining, Australia, 2007. P. 183–192. doi:10.36487/ACG_repo/711_12.
- Tarasov B.G., Randolph M.F.** Frictionless shear at great depth and other paradoxes of hard rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. 2008. Vol. 45. P. 316–328. doi:10.1016/j.ijrmms.2007.06.001.
- Tarasov B.G., Randolph M.F.** Superbrittleness of rocks and earthquake activity // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. 2011. Vol. 48. P. 888–898. doi:10.1016/j.ijrmms.2011.06.013.
- Tarasov B.G., Guzev M.A.** New insight into the nature of size dependence and the lower limit of rock strength // Proceeding of the 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines. St. Petersburg, Moscow, 2013. Vol. 1. P. 31–40.
- Tarasov B.G., Potvin Y.** Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. 2013. Vol. 59. P. 57–69. doi:10.1016/j.ijrmms.2012.12.011.
- Tarasov B.G., Randolph M.F.** Improved concept of lithospheric strength and earthquake activity at shallow depths based upon the fan-head dynamic shear rupture mechanism // Tectonophysics. 2016. Vol. 667. P. 124–143. doi:10.1016/j.tecto.2015.11.016.
- Tarasov B.G., Sadovskii V.M.** Modeling of fan formation in a shear rupture head on the basis of singular solutions of plane elasticity // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1773. P. 080006-1–080006-7. doi:10.1063/1.4964990.
- Tarasov B.G., Stacey T.R.** Features of the energy balance and fragmentation mechanisms at spontaneous failure of class I and class II rock // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2017. Vol. 50. P. 2563–2584 doi:10.1007/s00603-017-1251-x.
- Tarasov B.G., Sadovskii V.M., Sadovskaya O.B.** Analysis of fan waves in a laboratory model simulating the propagation of shear ruptures in rocks // Computational Mechanics of Solids. 2016. Vol. 9 (1). P. 38–51. doi:10.7242/1999-6691/2016.9.1.4.
- Tarasov B.G., Guzev M.A., Sadovskii V.M., Cassidy M.J.** Modelling the mechanical structure of extreme shear ruptures with friction approaching zero generated in brittle materials // International Journal of Fracture. 2017. Vol. 207. P. 87–97. doi:10.1007/s10704-017-0223-1.
- Xia K., Rosakis A.J., Kanamori H.** Laboratory earthquakes: the sub-Raleigh-to supershear rupture transition // Science. 2004. Vol. 303. P. 1859–1861. doi:10.1126/science.1094022.
- Zheng G., Rice J.R.** Conditions under which velocity-weakening friction allows a self-healing versus a crack-like mode of rupture // Bulletin of the Seismological Society of America. 1998. Vol. 88. P. 1466–1483. doi:10.1785/BSSA0880061466.

REFERENCES

- Abercrombie R.E., Rice J.R.** Can observations of earthquake scaling constrain slip weakening? // Geophysical Journal International. 2005. Vol. 162. P. 406–424. doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02579.x.

- Albaric J., Déverchère J., Petit C., Perrot J., Le Gall B.** Crustal rheology and depth distribution of earthquakes: Insights from the central and southern East African Rift System // *Tectonophysics*. 2009. Vol. 468. P. 28–41. doi:10.1016/j.tecto.2008.05.021.
- Archuleta R.J.** A faulting model for the 1979 Imperial Valley earthquake // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1984. Vol. 89. P. 4559–4585. doi:10.1029/JB089iB06p04559.
- Ben-David O., Rubinstein S.M., Fineberg J.** Slip-stick and the evolution of frictional strength // *Nature*. 2010. Vol. 463. P. 76–79. doi:10.1038/nature08676.
- Bizzarri A., Spudich P.** Effects of supershear rupture speed on the high-frequency content of S waves investigated using spontaneous dynamic rupture models and isochrone theory // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2008. Vol. 113. B05304. doi:10.1029/2007JB005146.
- Bouchon M., Bouin M., Karabulut H., Toksoz M.N., Dietrich M., Rosakis A.J.** How fast is rupture during an earthquake? New insights from the 1999 Turkey earthquake // *Geophysical Research Letters*. 2001. Vol. 28. P. 2723–2726. doi:10.1029/2001GL013112.
- Brace W.F., Byerlee J.D.** Stick-slip as a mechanism for earthquakes // *Science*. 1966. Vol. 153. P. 990–992. doi:10.1126/science.153.3739.990.
- Brace W.F., Kohlstedt D.** Limits on lithospheric stress imposed by laboratory experiments // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1980. Vol. 85. P. 6248–6252. doi:10.1029/JB085iB11p06248.
- Broberg K.B.** Cracks and fracture. Academic Press, San Diego, 1999. doi:10.1016/B978-0-12-134130-5.X5000-4.
- Brodsky E.E., Kanamori H.** Elastohydrodynamic lubrication of faults // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2000. Vol. 106. P. 16357–16374. doi:10.1029/2001JB000430.
- Brown S.R.** Frictional heating on faults: Stable sliding versus stick slip // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1998. Vol. 103. P. 7413–7420. doi:10.1029/98JB00200.
- Byerlee J.D.** Friction of rocks // *Pure and Applied Geophysics*. 1978. Vol. 116. P. 615–626. doi:10.1007/BF00876528.
- Cook N.G.W.** The failure of rock // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. 1965. Vol. 2. P. 389–403. doi:10.1016/0148-9062(65)90004-5.
- Déverchère J., Petit C., Gileva N., Radziminovitch N., Melnikova V., San'kov V.** Depth distribution of earthquakes in the Baikal rift system and its implications for the rheology of the lithosphere // *Geophysical Journal International*. 2001. Vol. 146. P. 714–730. doi:10.1046/j.0956-540x.2001.1484.484.x.
- Dieterich J.H.** Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1979. Vol. 84. P. 2161–2168. doi:10.1029/JB084iB05p02161.
- Dyadkin Yu.D.** Thermal exchange in deep wells and filtration zones during thermal extraction from dry rocks [in Russian]. Nauka, Leningrad, 1974. 38 p.
- Dyadkin Yu.D.** Exploitation of geothermal deposits [in Russian]. Nedra, Moscow, 1989. 228 p.
- Ellsworth W., Chiaraluce L.** Supershear during nucleation of the 2009 M 6.3 L'Aquila, Italy Earthquake // *Eos Transactions. AGU*. 2009. Vol. 90 (52). Abstract U13B–0068.
- Fouch M.J.** The Yellowstone hotspot: plume or not? // *Geology*. 2012. Vol. 40. P. 479–480. doi:10.1130/focus052012.1.
- Freund L.B.** Dynamic fracture mechanics. Cambridge University Press, Cambridge, 1998.

- Gaucher E., Schoenball M., Heidbach O., Zang A., Fokker P.A., van Wees J.-D., Kohl T.** Induced seismicity in geothermal reservoirs: a review of forecasting approaches // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 52. P. 1473–1490. doi:10.1016/j.rser.2015.08.026.
- Gibowicz S.J.** Seismicity induced by mining: recent research // *Advances in Geophysics*. 2009. Vol. 51. P. 1–53. doi:10.1016/S0065-2687(09)05106-1.
- Gnatus N.A., Chutorskoy M.D.** Prospects of hot dry rock extraction and utilization – petrothermal power Engineering in Russia // *RUDN Journal of ecology and life safety*. 2010. Vol. 4. P. 29–40.
- Gori M., Rubino V., Rosakis A.J., Lapusta N.** Pressure shock fronts formed by ultra-fast shear cracks in viscoelastic materials // *Nature Communications*. 2018. Vol. 9. 4754. doi:10.1038/s41467-018-07139-4.
- Griffith A.A.** The phenomena of rupture and flow in solids // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*. 1921. Vol. 221. P. 163–198. doi:10.1098/rsta.1921.0006.
- Griffith W.A., Rosakis A., Pollard D.D., Ko C.W.** Dynamic rupture experiments elucidate tensile crack development during propagating earthquake ruptures // *Geology*. 2009. Vol. 37. P. 795–798. doi:10.1130/G30064A.1.
- Heaton T.H.** Evidence for and implications of self-healing pulses of slip in earthquake rupture // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1990. Vol. 64. P. 1–20. doi:10.1016/0031-9201(90)90002-F.
- Horii H., Nemat-Nasser S.** Compression-induced micro-crack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1985. Vol. 90. P. 3105–3125. doi:10.1029/JB090iB04p03105.
- Khristianovich S.A.** Investigations of the mechanisms of hydraulic fracturing of a seam // *Transactions of the Institute of Geology and Development of Petrol Fossil*. Vol. 2. Proceeding of oil and gas development [in Russian]. Moscow, 1960. P. 159–165.
- King G.C.P., Sammis C.G.** The mechanisms of finite brittle strain // *Pure and Applied Geophysics*. 1992. Vol. 138. P. 611–640. doi:10.1007/BF00876341.
- Kirby S.** Tectonic stress in the lithosphere: Constraints provided by the experimental deformation of rock // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1980. Vol. 85. P. 6353–6363. doi:10.1029/JB085iB11p06353.
- Kirby S.H., Raleigh C.B.** Mechanisms of high-temperature, solid-state flow in minerals and ceramics and their bearing on the creep behaviour of the mantle // *Tectonophysics*. 1973. Vol. 19. P. 165–194. doi:10.1016/0040-1951(73)90038-3.
- Kissin I.G.** Fluids in the Earth's crust: Geophysical and tectonic aspects [in Russian]. Nauka, Moscow, 2015. 328 p.
- Kocharyan G.G.** Geomechanics of faults [in Russian]. GEOS, Moscow, 2016. 424 p.
- Kohlstedt D.L., Evans B., Mackwell S.J.** Strength of the lithosphere: constraints imposed by laboratory experiments // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1995. Vol. 100. P. 17589–17602. doi:10.1029/95JB01460.
- Koplos J., Tuccillo M.E., Ranalli B.** Hydraulic fracturing overview: How, where, and its role in oil and gas // *Journal American Water Works Association*. 2014. Vol. 106. P. 38–56. doi:10.5942/jawwa.2014.106.0153.
- Lachenbruch A.H.** Frictional heating, fluid pressure, and the resistance to fault motion // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1980. Vol. 85. P. 6097–6112. doi:10.1029/JB085iB11p06097.
- Lachenbruch A.H., Sass J.H.** Heat flow and energetic of the San Andreas fault zone // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1980. Vol. 85. P. 6185–6222. doi:10.1029/JB085iB11p06185.

- Leonard T., Liu L.** The role of a mantle plume in the formation of Yellowstone volcanism // *Geophysical Research Letters*. 2016. Vol. 43. P. 1132–1139. doi:10.1002/2015GL067131.
- Lu X., Lapusta N., Rosakis A.J.** Pulse-like and crack-like ruptures in experiments mimicking crustal earthquakes // *Proceedings of the National Academy of Science USA*. 2007. Vol. 104. P. 18931–18936. doi:10.1073/pnas.070426810.
- Lu X., Rosakis A.J., Lapusta N.** Rupture modes in laboratory earthquakes: Effect of fault prestress and nucleation condition. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2010. Vol. 115. B12302. doi:10.1029/2009JB006833.
- Lund J.W., Freeston D.H.** World-wide direct uses of geothermal energy 2000 // *Geothermics*. 2000. Vol. 30. P. 29–68. doi:10.1016/S0375-6505(00)00044-4.
- Maggi A., Jackson J.A., McKenzie D., Priestley K.** Earthquake focal depths, effective elastic thickness, and the strength of the continental lithosphere // *Geology*. 2000. Vol. 28. P. 495–498. doi:10.1130/0091-7613(2000)28<495:EFDEET>2.0.CO;2.
- McGarr A., Pollard D., Gay N.C., Ortlepp W.D.** Observations and analysis of structures in exhumed mine-induced faults // U.S. Geological Survey Open File Report. 1979. No. 79–1239. P.101–120.
- McGarr A., Simpson D., Seeber L.** Case histories of induced and triggered seismicity // *International Geophysics*. 2002. Vol. 81, Part A. P. 647–661. doi:10.1016/S0074-6142(02)80243-1.
- McKenzie D., Brune J.** Melting on fault planes during large earthquakes // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1972. Vol. 29. P. 65–78. doi:10.1111/j.1365-246X.1972.tb06152.x.
- Melosh H.J.** Dynamical weakening of faults by acoustic fluidization // *Nature*. 1996. Vol. 379. P. 601–606. doi:10.1038/379601a0.
- Needleman A.** An analysis of intersonic crack growth under shear loading // *Journal of Applied Mechanics*. 1999. Vol. 66. P. 847–857. doi:10.1115/1.2791788.
- Ngo D., Huang Y., Rosakis A., Griffith W.A., Pollard D.** Off-fault tensile cracks: A link between geological fault observations, lab experiments, and dynamic rupture models // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2012. Vol. 117. B01307. doi:10.1029/2011JB008577.
- Noda H., Dunham E.M., Rice J.R.** Earthquake ruptures with thermal weakening and the operation of major faults at low overall stress levels // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2009. Vol. 114. B07302. doi:10.1029/2008JB006143.
- Ohnaka M., Shen L.-F.** Scaling of the shear rupture process from nucleation to dynamic propagation: Implications of geometric irregularity of the rupturing surface // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1999. Vol. 104 (B1). P. 817–844. doi:10.1029/1998JB900007.
- Ortlepp W.D.** Rock fracture and rockbursts. The South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 1997. 98 p.
- Ortlepp W.D., Armstrong R., Ryder J.A., O'Connor D.** Fundamental study of micro-fracturing on the slip surface of mine-induced dynamic brittle shear zones // *Proceedings of the 6th International symposium on Rockburst and Seismicity in Mines / Potvin Y., Hudyma M. (Eds.). Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2005. P. 229–237. doi:10.36487/ACG_repo/574_20.*
- Otsuki K., Dilov T.** Evolution of hierarchical self-similar geometry of experimental fault zones: Implications for seismic nucleation and earthquake size // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2005. Vol. 110. B03303. doi:10.1029/2004JB003359.

- Peng S., Johnson A.M.** Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract. 1972. Vol. 9. P. 37–86. doi:10.1016/0148-9062(72)90050-2.
- Perrin G., Rice J.R., Zheng G.** Self-healing slip pulse on a frictional surface // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1995. Vol. 43. P. 1461–1495. doi:10.1016/0022-5096(95)00036-1.
- Petukhov I.M., Linkov A.M.** Mechanics of rockburst and outburst [in Russian]. Nedra, Moscow, 1983. 279 p.
- Popkov V.I.** Faults not only migration channels, but area accumulation of oil and gas // Geology, Geography and Global Energy. 2012. Vol. 3 (46). P. 23–28.
- Reches Z., Lockner D.A.** Nucleation and growth of faults in brittle rocks // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1994. Vol. 99. P. 18159–18173. doi:10.1029/94JB00115.
- Rice J.R.** Heating and weakening of faults during earthquake slip // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2006. Vol. 111. B05311. doi:10.1029/2005JB004006.
- Rice J.R.** New perspectives on crack and fault dynamics. Springer, Dordrecht, 2001. doi:10.1007/0-306-46956-1_1.
- Rosakis A.J., Xia K., Lykotrafitis G., Kanamori H.** Dynamic shear rupture in frictional interfaces: speeds, directionality, and modes // Treatise on Geophysics / Schubert G. (Ed.). Elsevier, Amsterdam, 2007. Vol. 4. P. 183–213. doi:10.1016/B978-0-444-53802-4.00072-5.
- Rubino V., Rosakis A.J., Lapusta N.** Understanding dynamic friction through spontaneously evolving laboratory earthquakes // Nature Communications. 2017. Vol. 8. 15991. doi:10.1038/ncomms15991.
- Rubinstein S.M., Cohen G., Fineberg J.** Detachment fronts and the onset of dynamic friction // Nature. 2004. Vol. 430. P. 1005–1009. doi:10.1038/nature02830.
- Ruina A.** Slip instability and state variable friction laws // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1983. Vol. 88. P. 10359–10370. doi:10.1029/JB088iB12p10359.
- Scholz C.H.** Earthquakes and friction laws // Nature. 1998. Vol. 391. P. 37–42. doi:10.1038/34097.
- Scholz C.H.** The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- Segall P., Pollard D.D.** The mechanics of discontinuous faults // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1980. Vol. 85. P. 4337–4250. doi:10.1029/JB085iB08p04337.
- Sibson R.H.** Interactions between temperature and fluid pressure during earthquake faulting—A mechanism for partial or total stress relief // Nature. 1973. Vol. 243. P. 66–68. doi:10.1038/physci243066a0.
- Silva V., Yepes-Estrada C., Weatherill G.** Part Three: Hazard specific risk assessment – earthquake. In book: Words into action guidelines national disaster risk assessment // Words into Action Guidelines National Disaster Risk Assessment / Safaie S. (Ed.). United Nations International Strategy for Disaster Risk Reduction, Geneva, Switzerland, 2017.
- Smith R.B., Jordan M., Steinberger B., Puskas C.M., Farrell J., Waite G.P., Husen S., Chang W.-L., O'Connell R.** Geodynamics of the Yellowstone hotspot and mantle plume: Seismic and GPS imaging, kinematics, and mantle flow // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2009. Vol. 188. P. 26–56. doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.08.020.
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V.** Earthquake physics and prognostics [in Russian]. Nauka, Moscow, 2003. 270 p.
- Stavrogin A.N., Protosenya A.G.** Rock strength and stability of deep productivity [in Russian]. Nedra, Moscow, 1985. 271 p.

- Stavrogin A.N., Tarasov B.G.** Experimental physics and rock mechanics [in Russian]. Nauka, St. Petersburg, 2001. 343 p.
- Suckale J.** Induced seismicity in hydrocarbon fields // *Advances in Geophysics*. 2009. Vol. 51. P. 55–106. doi:10.1016/S0065-2687(09)05107-3.
- Tarasov B.G.** Intersonic shear rupture mechanism // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. 2008. Vol. 45. P. 914–928. doi:10.1016/j.ijrmms.2007.10.002.
- Tarasov B.G.** Superbrittleness of rocks at high confining pressure // *Deep Mining 2010: Proceedings of the Fifth International Seminar on Deep and High Stress Mining*. Australian Centre for Geomechanics. Perth, 2010. P. 119–133. doi:10.36487/ACG_repo/1074_08.
- Tarasov B.G.** Universal scale of brittleness for rocks failed at compression // *Proceedings of the 13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*. Melbourne, Australia, 2011. Vol. 2. P. 669–673.
- Tarasov B.G.** Depth distribution of lithospheric strength determined by the self-unbalancing shear rupture mechanism // *Proceedings of the ISRM International Symposium – Eurock 2013*. Wroclaw, Poland, 2013. P. 165–170. doi:10.1201/b15683-25.
- Tarasov B.G.** Hitherto unknown shear rupture mechanism as a source of instability in intact hard rocks at highly confined compression // *Tectonophysics*. 2014. Vol. 621. P. 69–84. doi:10.1016/j.tecto.2014.02.004.
- Tarasov B.G.** Shear fractures of extreme dynamics // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016. Vol. 49. P. 3999–4021. doi:10.1007/s00603-016-1069-y.
- Tarasov B.G.** Shear ruptures of extreme dynamics in laboratory and natural conditions // *Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth Conference on Deep and High Stress Mining*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2017. P. 3–50. doi:10.36487/ACG_rep/1704_0.1_Tarasov.
- Tarasov B.G.** Dramatic weakening and embrittlement of intact hard rocks in the earth's crust at seismic depths as a cause of shallow earthquakes // *Earth crust / Nawaz M., Sattar F., Kundu S.N. (Eds.)*. IntechOpen, 2019. doi:10.5772/intechopen.85413.
- Tarasov B.G.** New physics of supersonic ruptures // *Deep Underground Science and Engineering*. 2023a. Vol. 2. P. 207–244. doi:10.1002/dug2.12050.
- Tarasov B.G.** Fan-hinged shear instead of frictional stick-slip as the main and most dangerous mechanism of natural, induced and volcanic earthquakes in the earth's crust // *Deep Underground Science and Engineering*. 2023b. Vol. 2. P. 305–336. doi:10.1002/dug2.12052.
- Tarasov B.G., Ortlepp W.D.** Shock loading-unloading mechanism in rockburst shear fractures in quartzite causing genesis of polyhedral sub-particles in the fault gouge // *Proceeding of the Fourth International Seminar on Deep and High Stress Mining*, Australia, 2007. P. 183–192. doi:10.36487/ACG_repo/711_12.
- Tarasov B.G., Randolph M.F.** Frictionless shear at great depth and other paradoxes of hard rocks // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. 2008. Vol. 45. P. 316–328. doi:10.1016/j.ijrmms.2007.06.001.
- Tarasov B.G., Randolph M.F.** Superbrittleness of rocks and earthquake activity // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. 2011. Vol. 48. P. 888–898. doi:10.1016/j.ijrmms.2011.06.013.
- Tarasov B.G., Guzev M.A.** New insight into the nature of size dependence and the lower limit of rock strength // *Proceeding of the 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines*. St. Petersburg, Moscow, 2013. Vol. 1. P. 31–40.

Tarasov B.G., Potvin Y. Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. 2013. Vol. 59. P. 57–69. doi:10.1016/j.ijrmms.2012.12.011.

Tarasov B.G., Randolph M.F. Improved concept of lithospheric strength and earthquake activity at shallow depths based upon the fan-head dynamic shear rupture mechanism // Tectonophysics. 2016. Vol. 667. P. 124–143. doi:10.1016/j.tecto.2015.11.016.

Tarasov B.G., Sadovskii V.M. Modeling of fan formation in a shear rupture head on the basis of singular solutions of plane elasticity // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1773. P. 080006-1–080006-7. doi:10.1063/1.4964990.

Tarasov B.G., Stacey T.R. Features of the energy balance and fragmentation mechanisms at spontaneous failure of class I and class II rock // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2017. Vol. 50. P. 2563–2584. doi:10.1007/s00603-017-1251-x.

Tarasov B.G., Sadovskii V.M., Sadovskaya O.B. Analysis of fan waves in a laboratory model simulating the propagation of shear ruptures in rocks // Computational Mechanics of Solids. 2016. Vol. 9 (1). P. 38–51. doi:10.7242/1999-6691/2016.9.1.4.

Tarasov B.G., Guzev M.A., Sadovskii V.M., Cassidy M.J. Modelling the mechanical structure of extreme shear ruptures with friction approaching zero generated in brittle materials // International Journal of Fracture. 2017. Vol. 207. P. 87–97. doi:10.1007/s10704-017-0223-1.

Xia K., Rosakis A.J., Kanamori H. Laboratory earthquakes: the sub-Raleigh-to supershear rupture transition // Science. 2004. Vol. 303. P. 1859–1861. doi:10.1126/science.1094022.

Zheng G., Rice J.R. Conditions under which velocity-weakening friction allows a self-healing versus a crack-like mode of rupture // Bulletin of the Seismological Society of America. 1998. Vol. 88. P. 1466–1483. doi:10.1785/BSSA0880061466.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ТАРАСОВ Борис Григорьевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник ВНИМИ. Стаж работы в геомеханике 48 лет. Профессор Ленинградского горного института (1992–1999), профессор Западного Австралийского университета (2000–2018), профессор Дальневосточного федерального университета (2019–2021). Руководил научным центром «Геотест» (1992–1999) и лабораторией геомеханики (2003–2018). Основные научные интересы: экспериментальная физика, механика горных пород.

*Статья поступила в редакцию 16 февраля 2024 г.,
одобрена после рецензирования 15 марта 2024 г.,
принята к публикации 18 марта 2024 г.*