



*Институт динамики геосфер
имени академика М.А. Садовского
Российской академии наук*

Геомеханика разломов

д.ф.-м.н. Г.Г. Кочарян
gevorgkidg@mail.ru

Школа «Геофизика природных катастроф»

30 июня 2024г.

МФТИ

Содержание

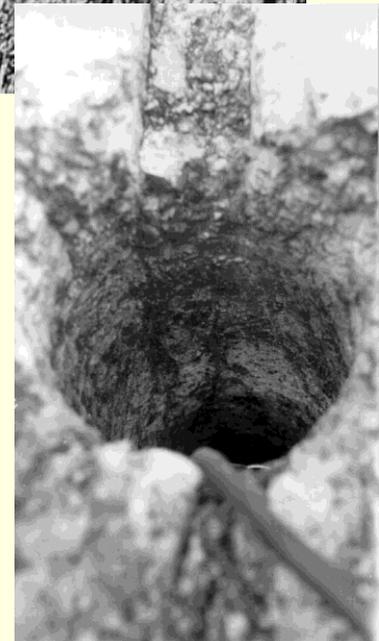
- Режимы скольжения по разлому
- Структура разломной зоны
- Зарождение и трансформация процесса скольжения.

Разломы земной коры

Участки сейсмодислокации Гоби-Алтайского землетрясения 1957 г.



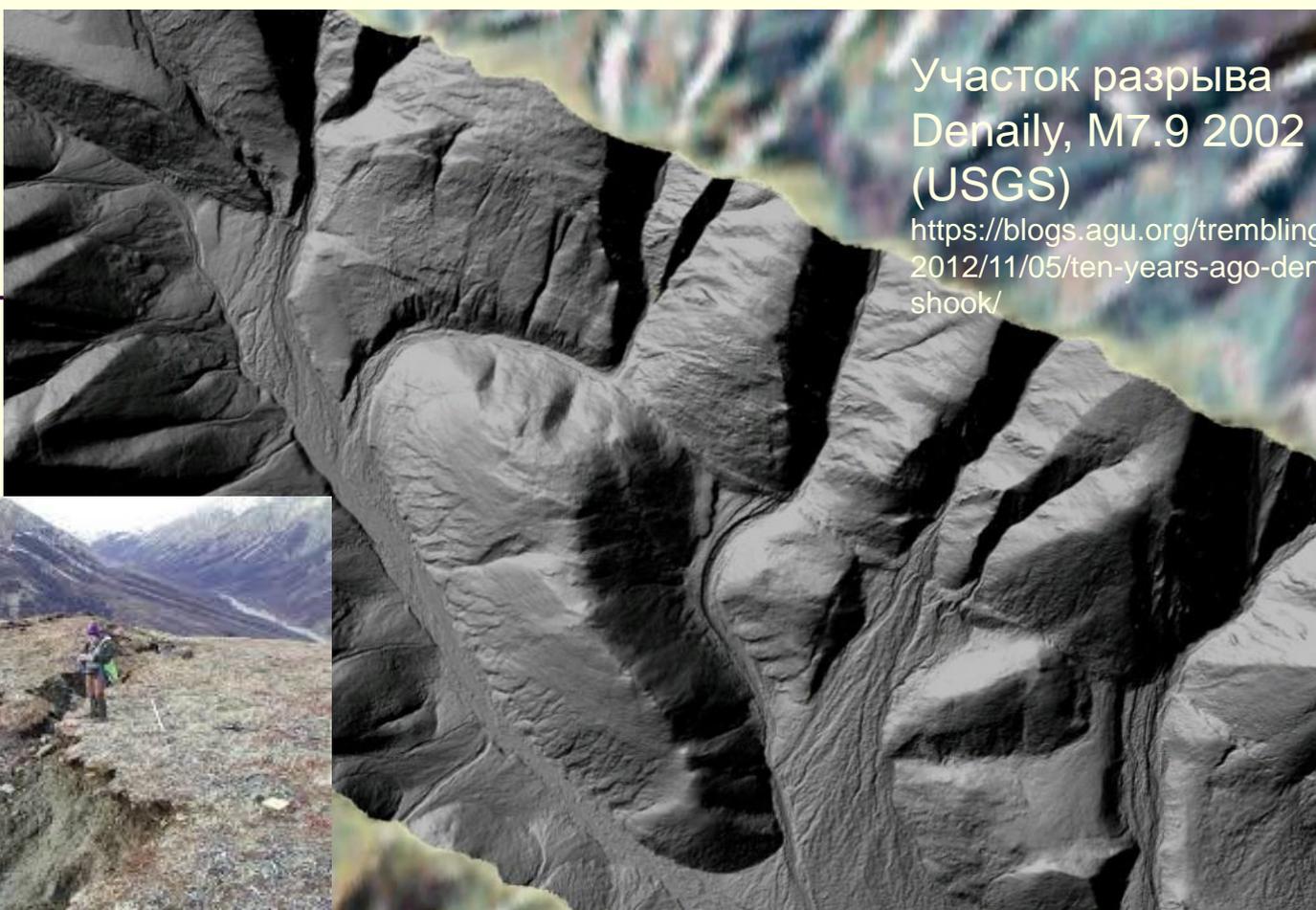
Тектонические разломы, трещины разного масштаба, зоны дробления и т.д. являются важнейшим элементом геомеханических моделей.



Музей разлома (Кобе, Япония)



Под термином «разлом» (в англоязычной литературе *fault*) обычно понимается достаточно крупное нарушение сплошности земной коры вдоль которого происходило относительное смещение пород.



Участок разрыва
Denaily, M7.9 2002
(USGS)

<https://blogs.agu.org/tremblingearth/2012/11/05/ten-years-ago-denaily-shook/>

Denaily Fault каждый раз при крупном EQ на протяжении тысячелетий смещал речные долины.

На этом изображении разлом проходит сверху слева вниз вправо, а большие отклонения каждого каньона представляют собой совокупный результат десятков землетрясений, произошедших к 2002 году.

Процессы, контролируемые разломами

Вулканизм и
дегазация

Сейсмичность

Рудные поля и
месторождения

Инженерно-
геологические
явления

**Гидрогеологические
явления и процессы**

**Сейсмогенные и асейсмичные
движения по разломам земной коры**



MENDENHALL RESEARCH FELLOWSHIP PROGRAM

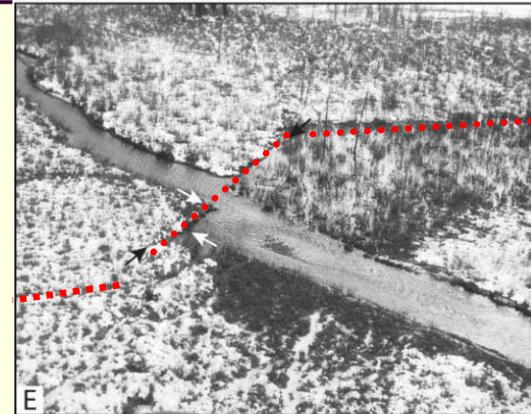
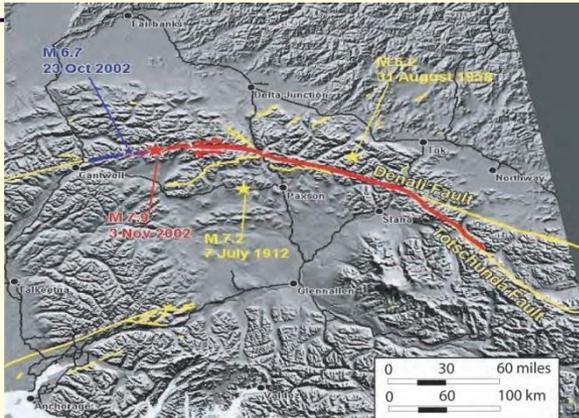
22-33. Physics-based modeling of earthquake hazard in northern California

By M

Глобальная задача - построение расчетной модели, основанной на физических принципах и успешно выполняющей прогностические функции.

Модели, основанные на физике, могут заполнить информационные пробелы, которые в настоящее время ограничивают практический анализ сейсмической опасности. Эта тематика направлена на улучшение понимания связей между физическими процессами, ожидаемыми сотрясениями в любом месте и оценкой сейсмической опасности посредством использования компьютерного моделирования и/или разработки геологических 3D-моделей.

Структуру деформационных процессов, происходящих в окрестности сейсмогенного разлома, с известной долей условности, можно разделить на две подобласти, едва пересекающиеся во времени и пространстве зона подготовки и зона локализации деформаций.



1. Зона подготовки землетрясения - процессы детерминированные эволюцией соответствующего участка коры (~ nL).

- особенности НДС;
- накопление энергии деформации
- трансформация характеристик среды, деформационных и гидрогеологических процессов, параметров физических полей в ближней и дальней окрестности будущего разрыва.
- Практически все предвестники относятся к этой зоне.

2. Процессы в зоне локализации деформаций; условия зарождения, распространения и остановки разрыва.

- Физические и химические процессы, происходящие на разных масштабных уровнях – от перемещений геоблоков, до образования нанокристаллов в зеркалах скольжения.
- Их влияние на характер скольжения, прочностные, фрикционные, реологические свойства материала.
- Структура разломной зоны, ее флюидодинамика и т.д.

Режимы скольжения



Image: NOAA

Крип



Землетрясение

Сейсмический момент и сейсмическая энергия

$$M_0 = \mu \cdot uLD$$

$$M_0 = \mu \cdot u \cdot L^2 = \mu \cdot \frac{u}{L} \cdot L^3 = \sigma_s \cdot S \cdot L = F_s \cdot L$$

Произведение среднего сдвигового усилия, действующего на разломе, на его длину.

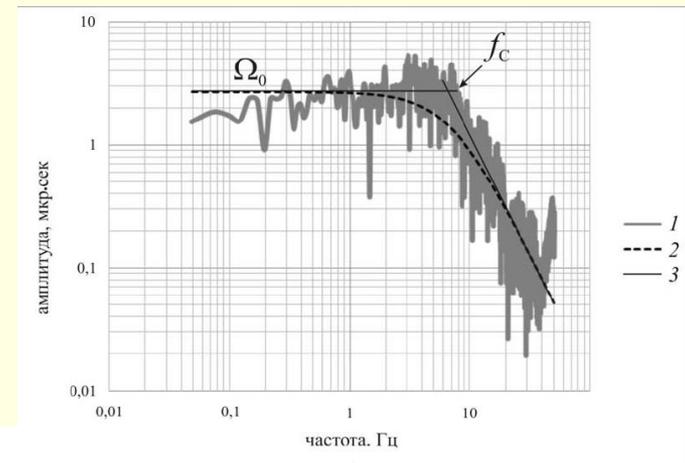
$$|u| \sim \frac{\mu \cdot u_0 LD \cdot R_c \cdot F(\omega, L/v_r)}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}}$$

Величина статического сейсмического момента не зависит от скорости распространения разрыва в очаге !!!

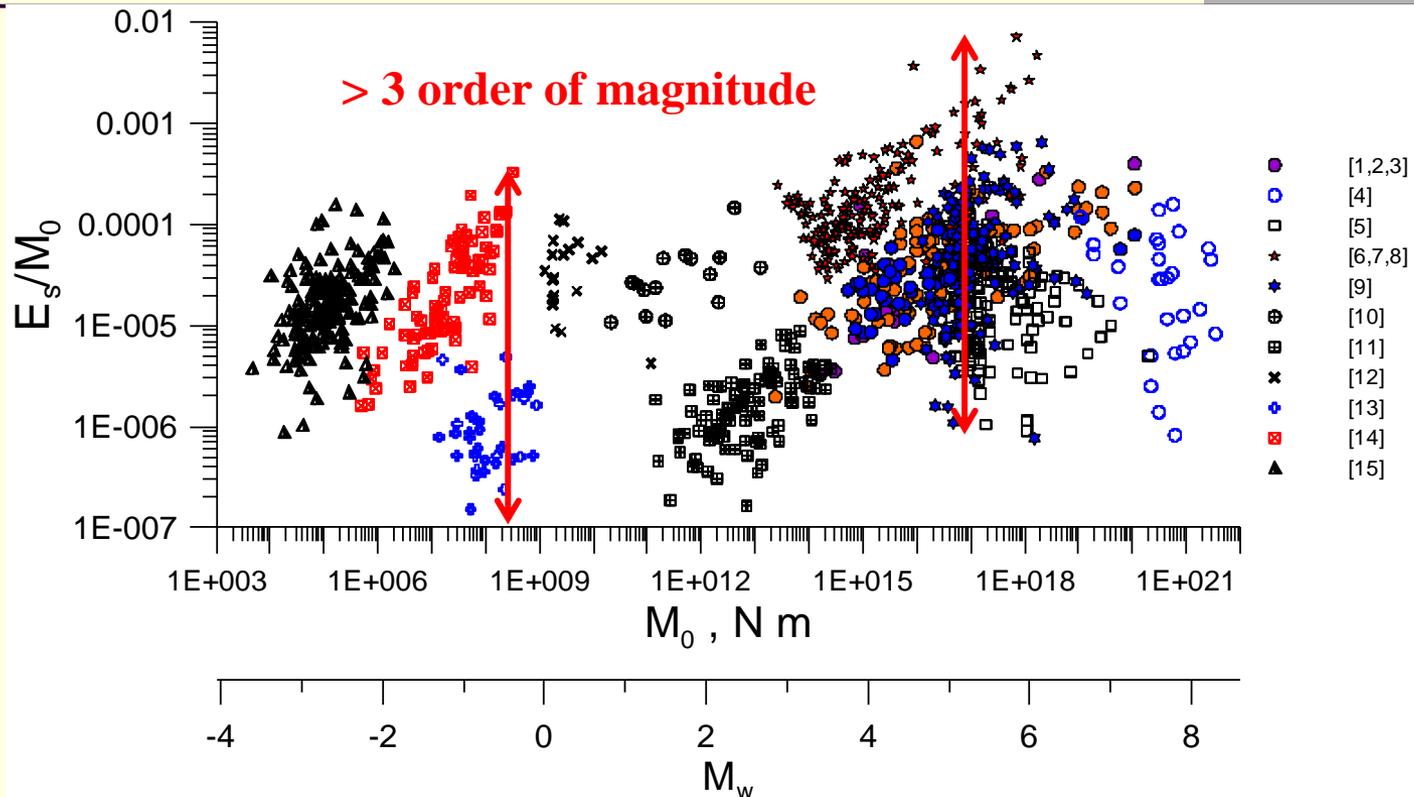
$$E_s = 4\pi r^2 C_f^{-2} [r_0 q(r_0) / r q(r)]^2 \rho_0 \beta_0 \int \sum v^2 dt$$

При выполнении условий подобия:

Величина приведенной энергии $e = E_s / M_0$ не зависит от размера землетрясения.



Каковы причины столь большого разброса величины приведенной энергии?



Кочарян, 2016

«Жесткие» и «вялые» землетрясения



Ю.В. Ризниченко



Н.В. Шебалин



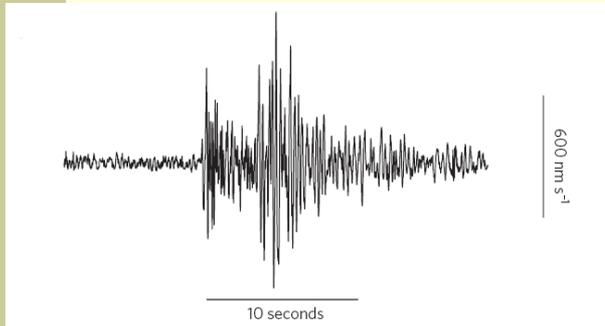
Т.Г. Раутиан

Режимы скольжения

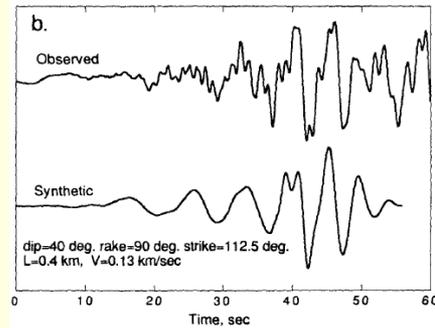
Ide, 2007

Peng&Gomberg, 2010

Кочарян и др. 2014

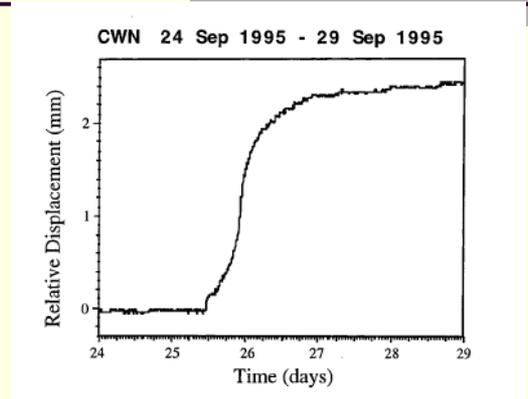


«Нормальные»

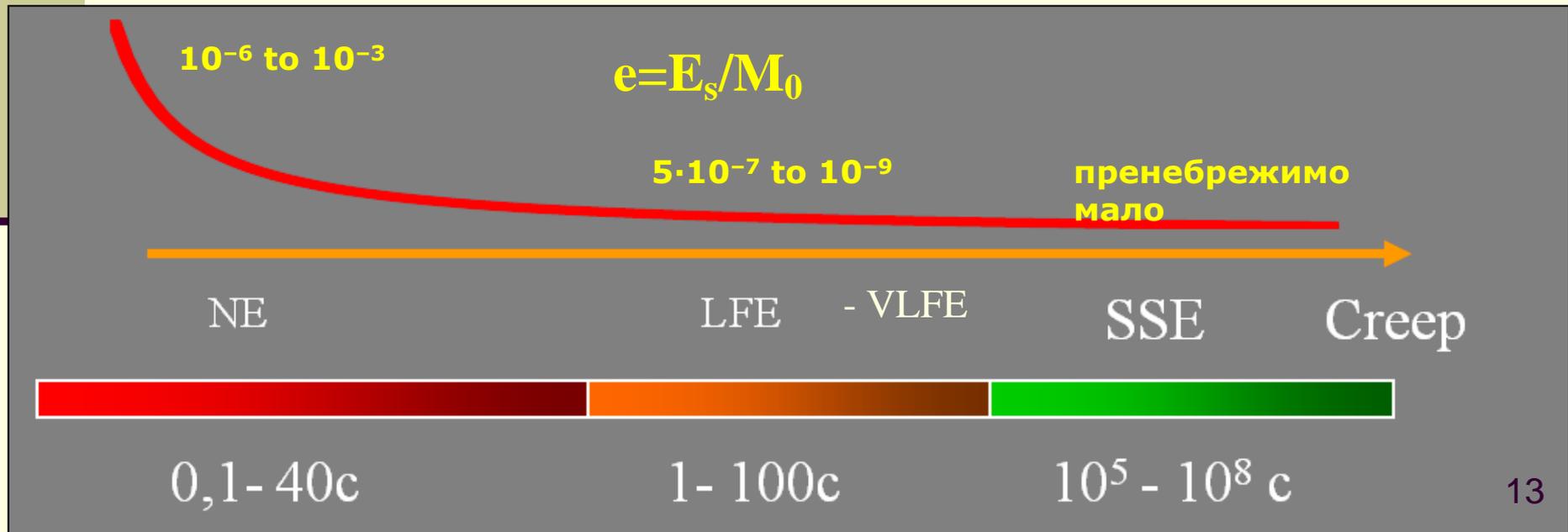


LFE

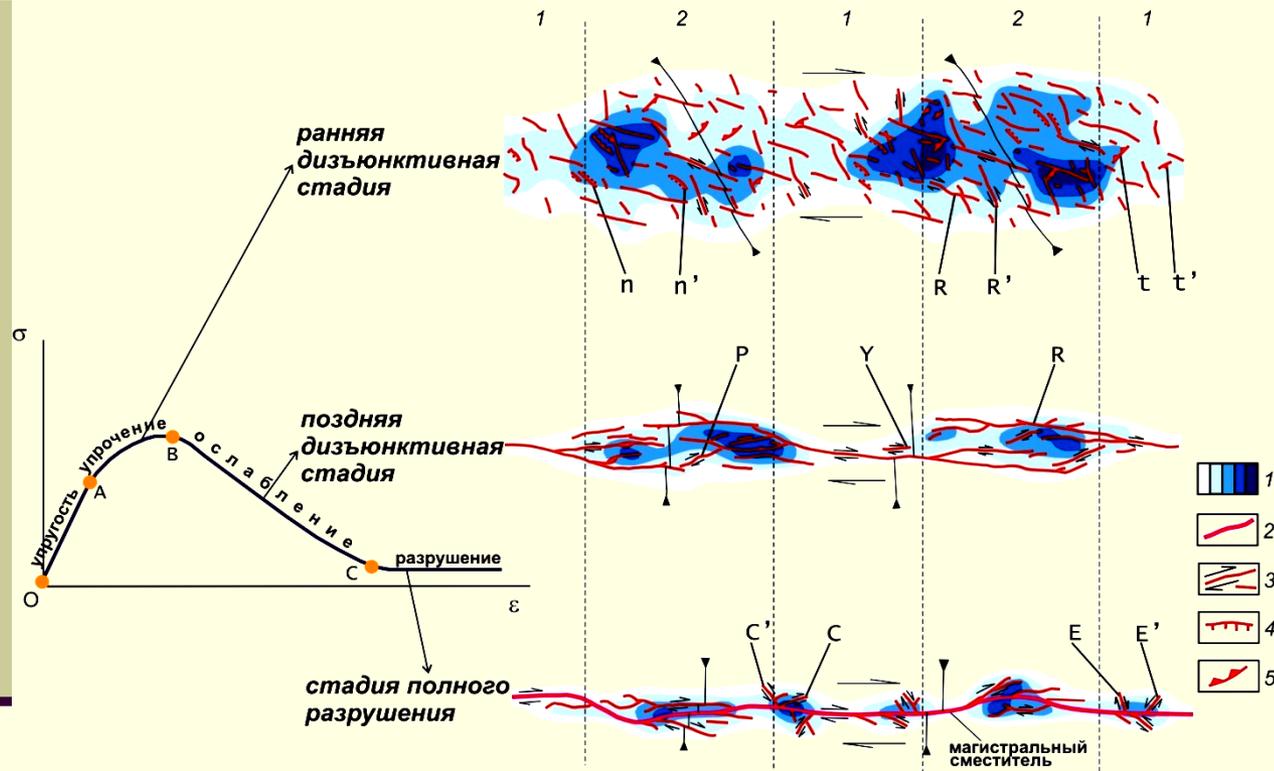
VLFE



SSE



Структура разломных зон



Главные стадии разрывообразования соответствуют трем характерным отрезкам на кривой “нагрузка (σ) – деформация (ϵ), границами которых являются уровни напряжений на пределе текучести (точка A), конечной прочности (точка B) и остаточной прочности (точка C).

Тектонофизическая модель
формирования разломной зоны)

[Семинский, 2003]

Непланарность поверхности скольжения

Распространенное заблуждение :

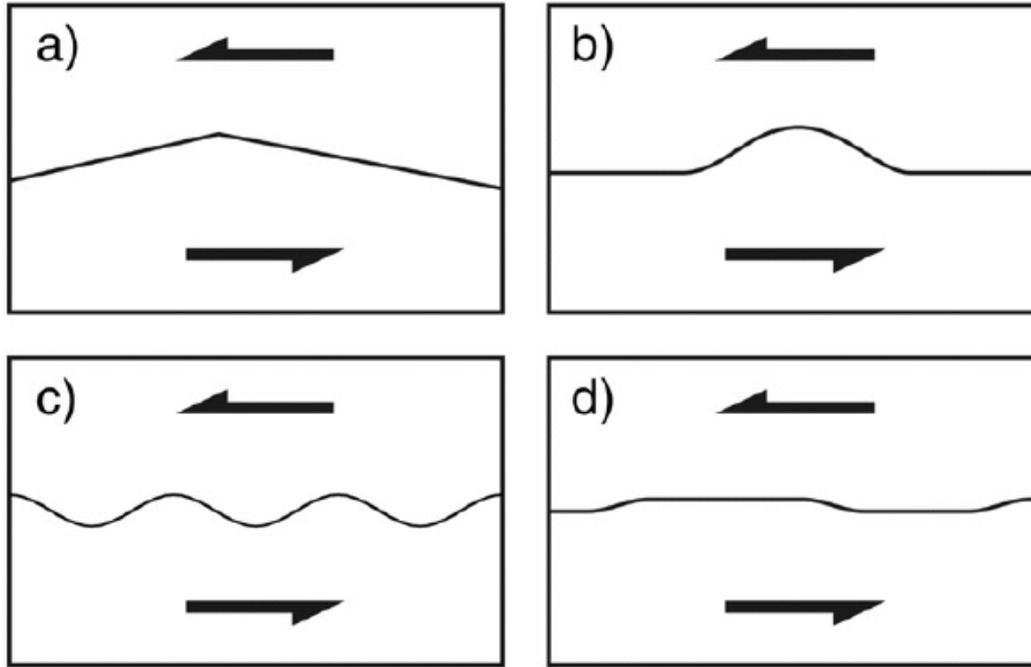
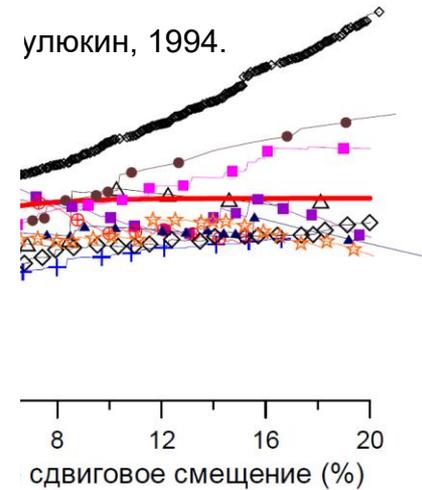
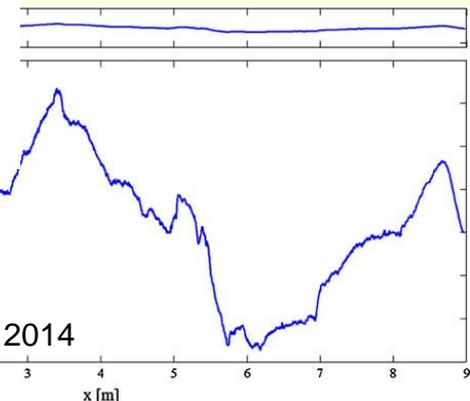


Fig. 12. Various fault geometry used to model the effects of geometrical irregularities on earthquake rupture or other small-displacement fault motion. (a) A kink in the slip direction (e.g., Oglesby and Archuleta, 2003). (b) A seamount (or ridge) in smooth frictional contact with an intact upper plate (e.g., Baba et al., 2001). (c) Wavy fault (e.g., Ritz and Pollard, 2012). (d) Restraining and releasing bends (Nielsen and Knopoff, 1998).



«одной приведенной ширины трещины» от амплитуды сдвига. Ширина трещины нормирована на длину зоны и увеличивается до 0,5-1.0 после чего интенсивность ослабевает и рост ширины трещины

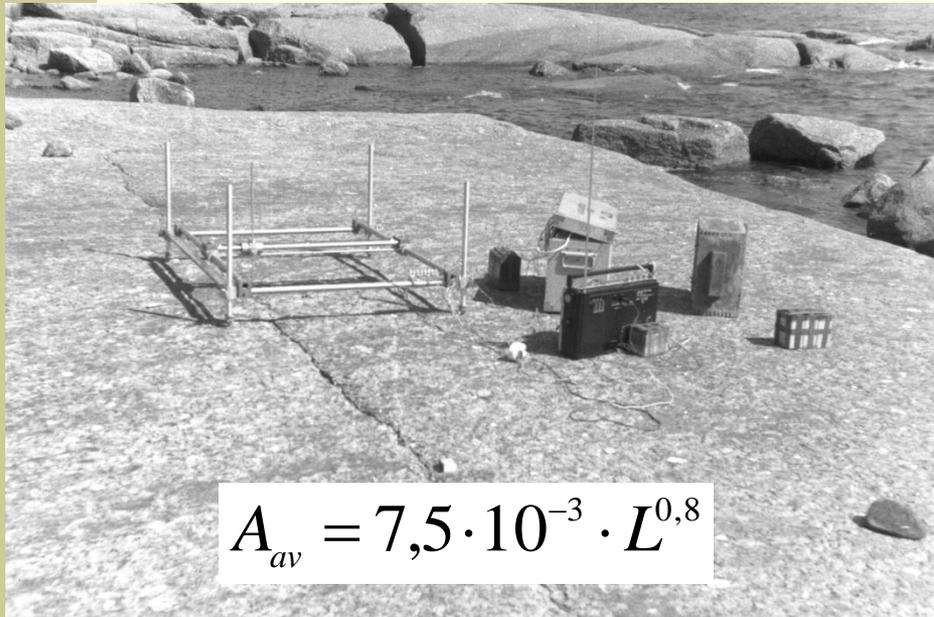


$$A_{av} \sim L^{0,8}$$

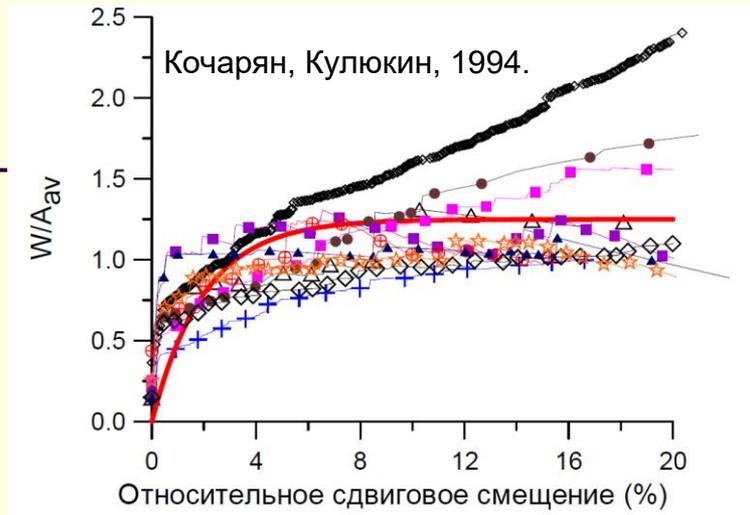
Sagy, Brodsky et al. 2007, 08, 09

BISTACCHI et al., 2011

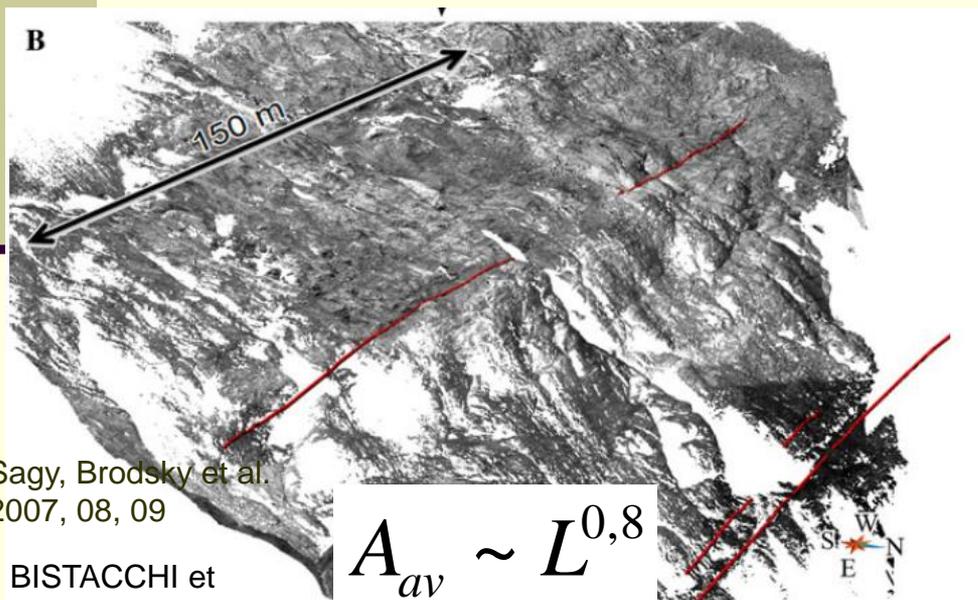
Непланарность поверхности скольжения



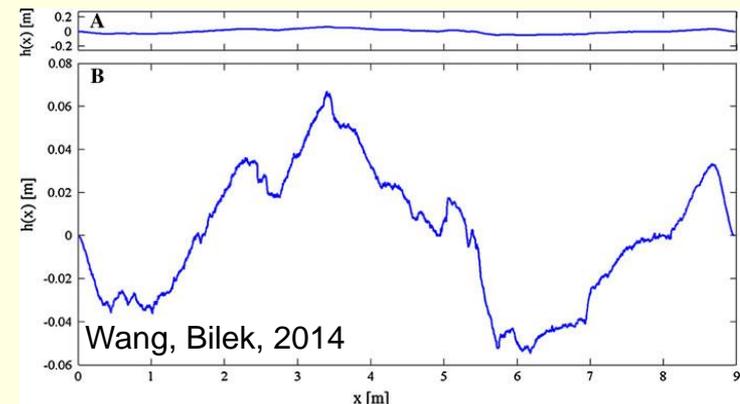
$$A_{av} = 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot L^{0,8}$$



Зависимость средней приведенной ширины «зоны разрушения» от амплитуды сдвига. Величина перемещения нормирована на длину трещины. Ширина зоны увеличивается до 0,5-1,5% от длины блока. после чего интенсивность разрушения ослабевает и рост ширины трещины замедляется



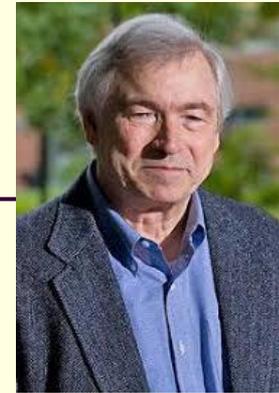
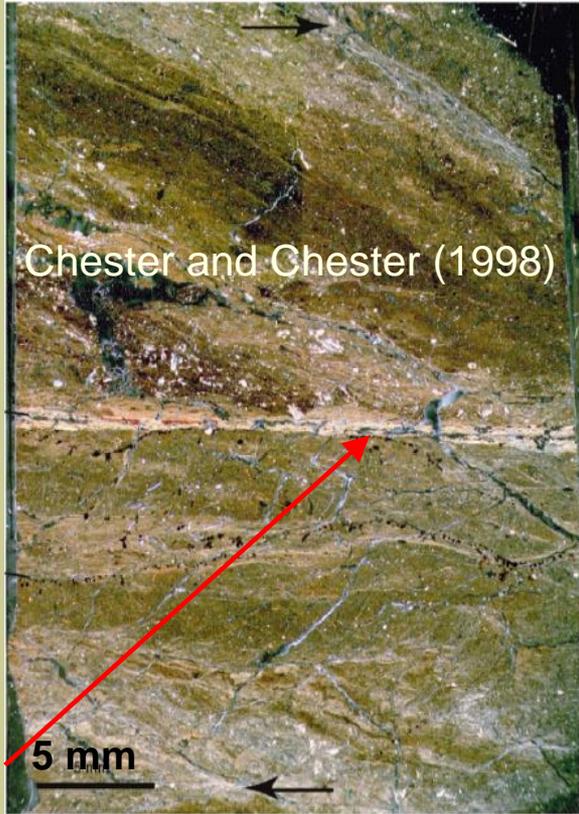
$$A_{av} \sim L^{0,8}$$



Sagy, Brodsky et al.
2007, 08, 09

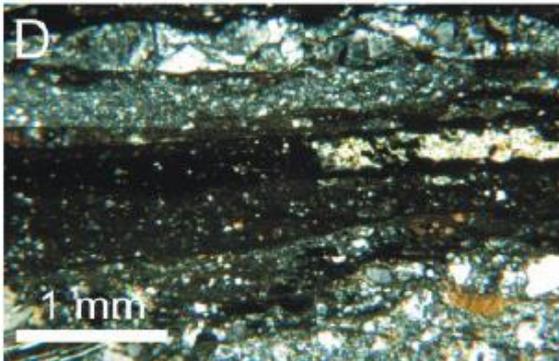
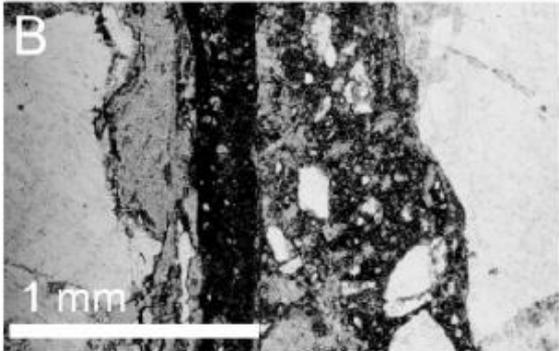
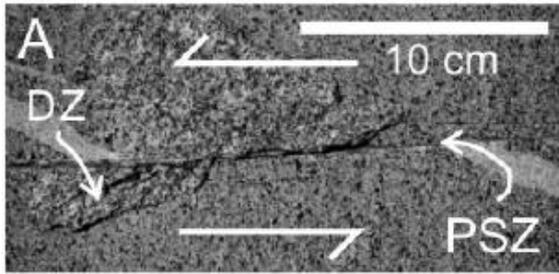
BISTACCHI et al., 2011

Локализация скольжения



«Зоны скольжения разломов, испытавших большое смещение, часто встречаются внутри ультракатакластических, возможно, глиносодержащих зон толщиной порядка десятков и сотен миллиметров, но зона основного сейсмического сдвига может локализоваться до толщины менее 1–5 мм в пределах этого ультракатаклазового ядра».
(J.Rice, 2011)

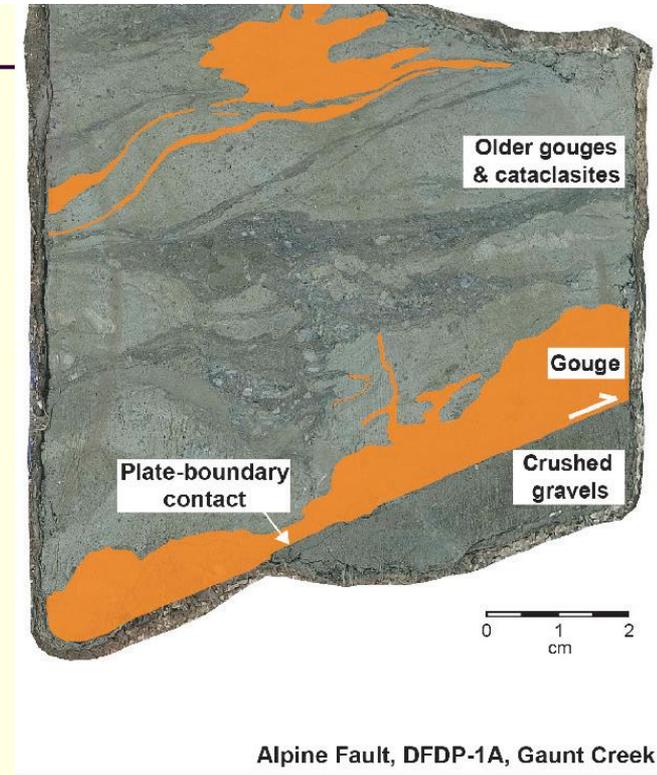
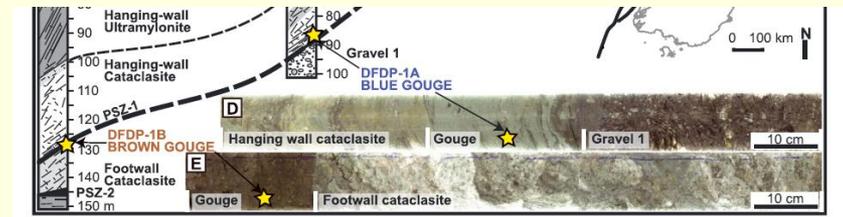
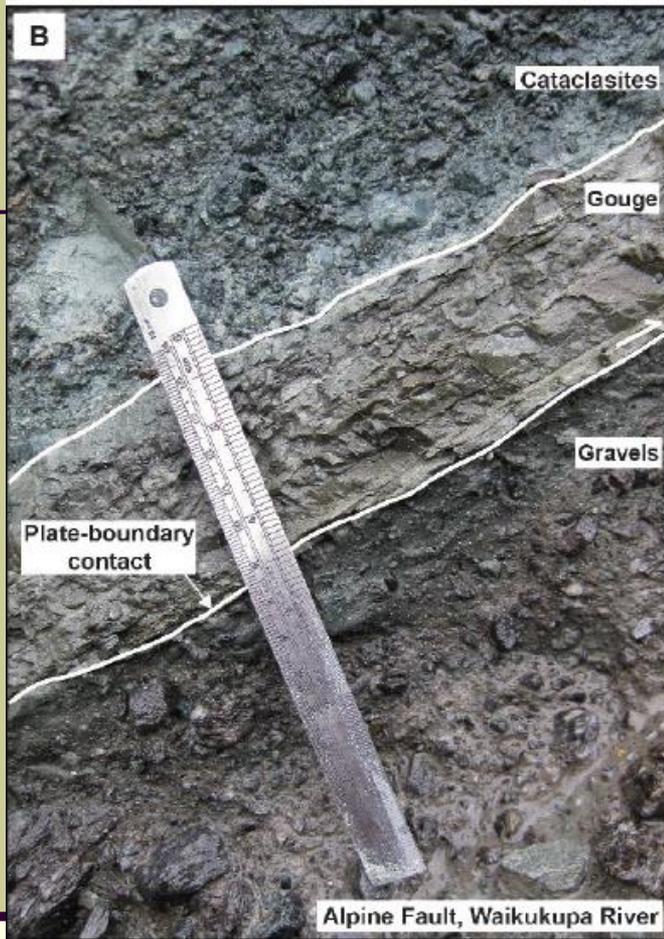
1. Обследованию эксгумированных участков.
2. Глубинное бурение через разломы.



Зоны магистрального сместителя некоторых разломных зон [Shipton et al., 2006].

- а) Небольшая трещина остывания, смещение около 20см,
- б) Участок разлома со смещением около 60см .
- в) Зона магистрального сместителя со смещением около 8м
- г) Зона магистрального сместителя разлома с полным смещением около 100м.

Alpine Fault



Эксгумированный контакт между Тихоокеанской и Австралийской плитами.

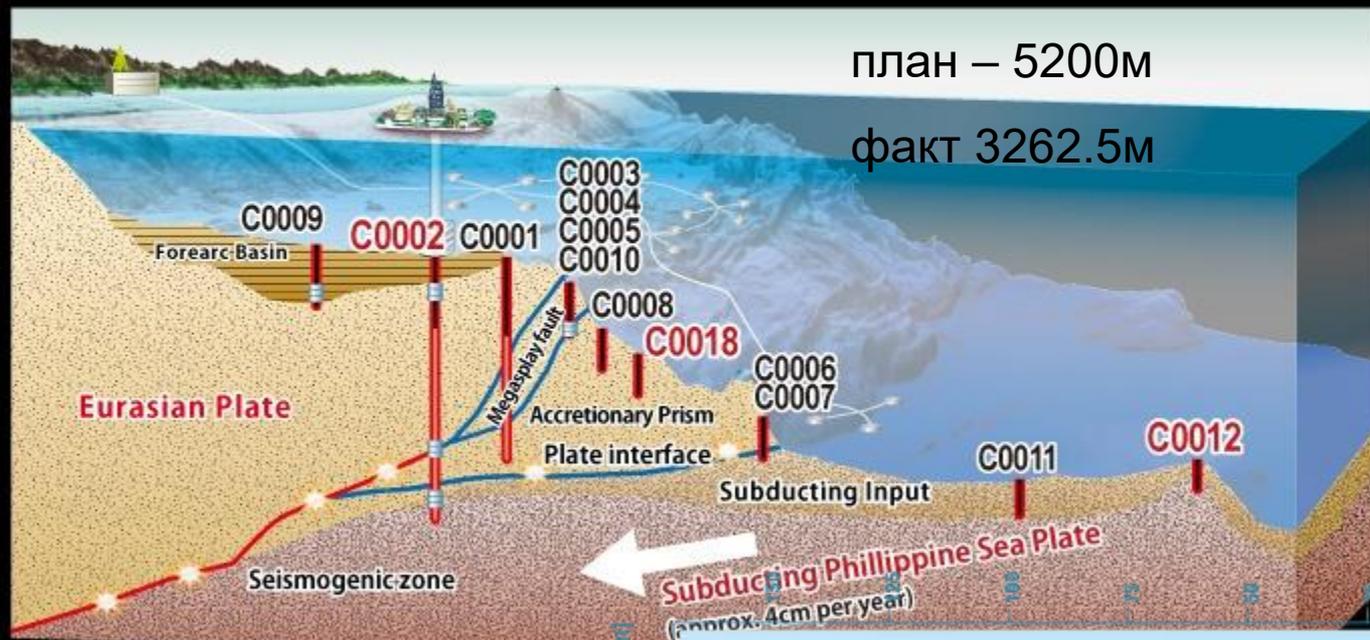
C. Boulton et al., 2017

In DFDP-1A drill core, multiple generations of gouges containing montmorillonite are seen (shaded in orange). Older generations are deformed in the rocks above the plate-boundary contact. The most recent generation occurs as a thin layer along the boundary.

● Drilling site

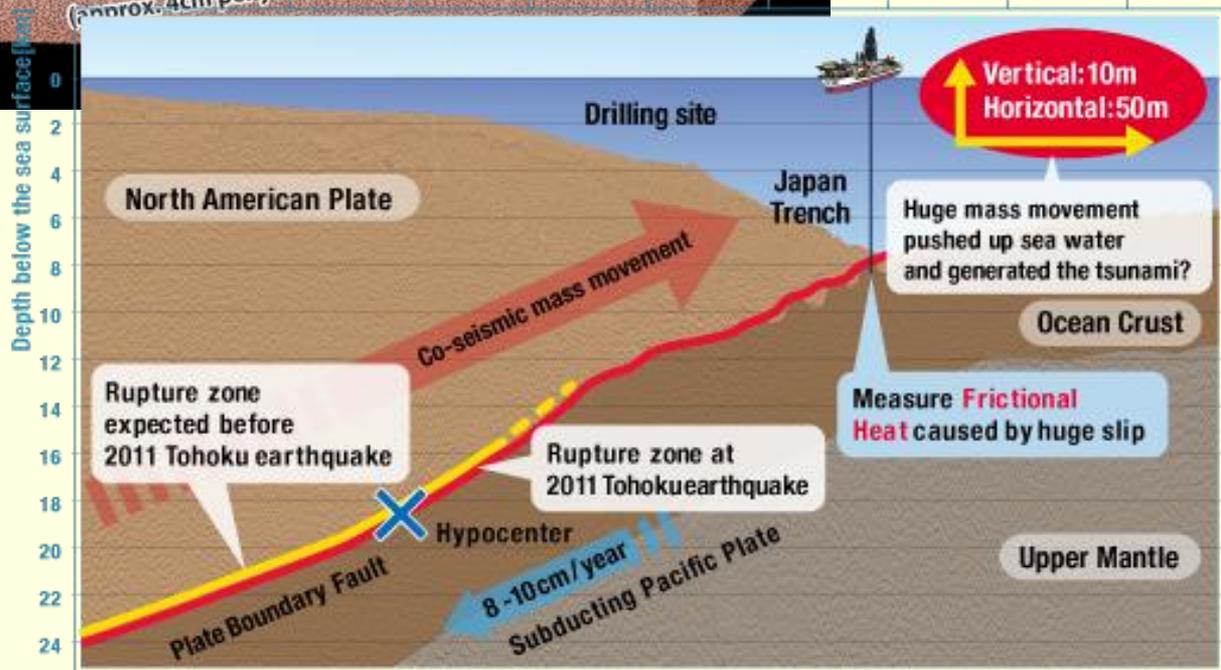
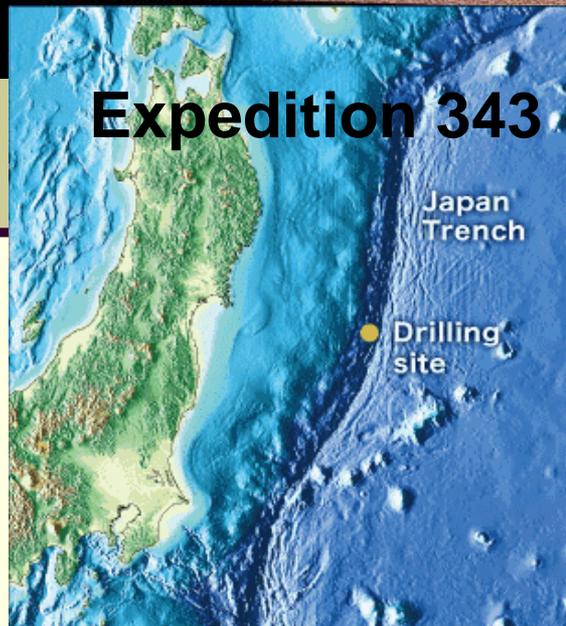
Nan-TroSEIZE

[Tobin et al., 2020]

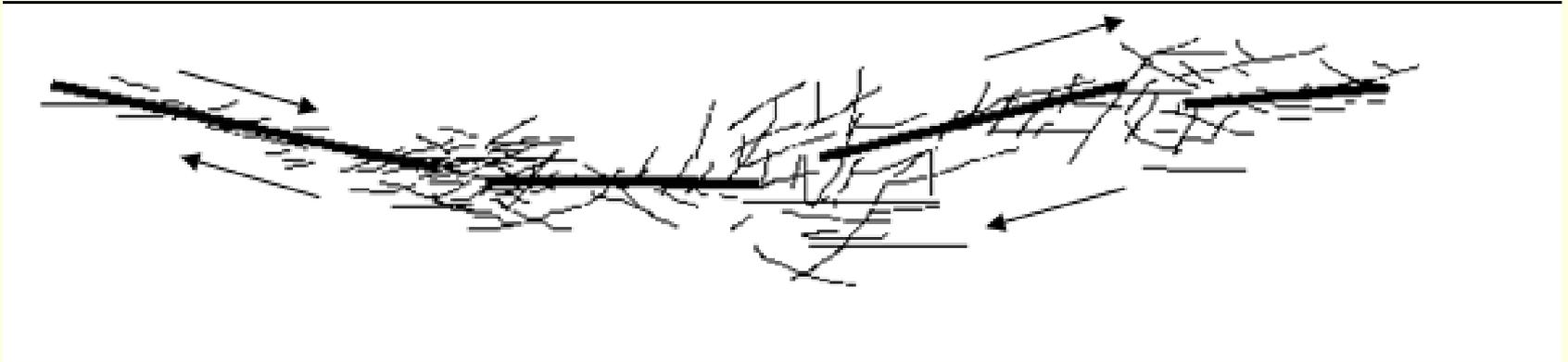


Distance from the trench [km]

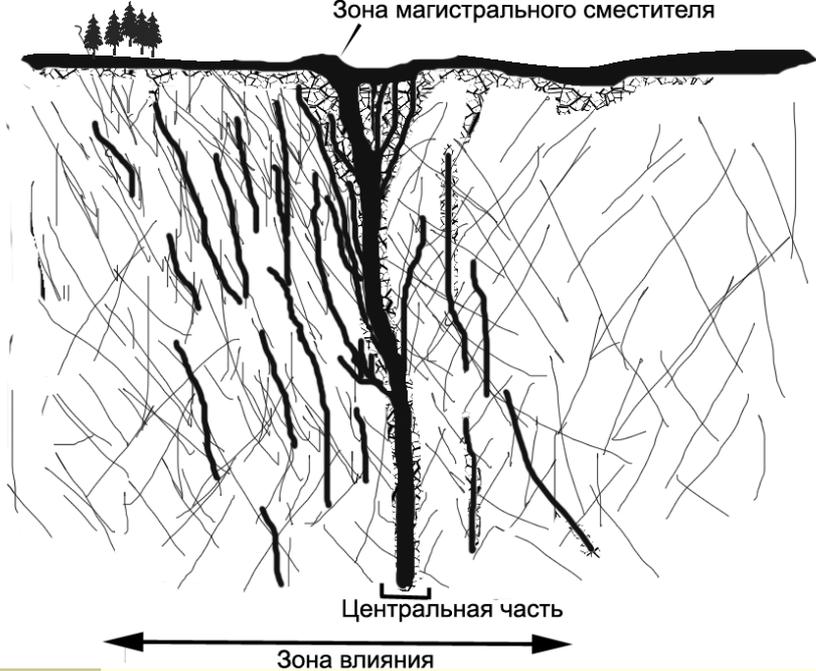
Expedition 343



«Взаимодействие» магистральных сместителей через зоны распределенных катакластических деформаций (штрихованные области).



Сублинейные конгломераты отдельных магистральных сместителей и участков гетерогенной трещиноватости и формируют единую магистральную зону разлома.



Схематичное изображение структуры разломной зоны

Зона влияния разлома (*Damage zone*) – участок массива разлома с повышенной, по сравнению с фоновой, плотностью трещин. Степень трещиноватости повышается по направлению к **Центральной части разломной зоны** (*Fault core*) в которой выделяют одну или несколько подзон интенсивной деформации сантиметры-метры толщиной.

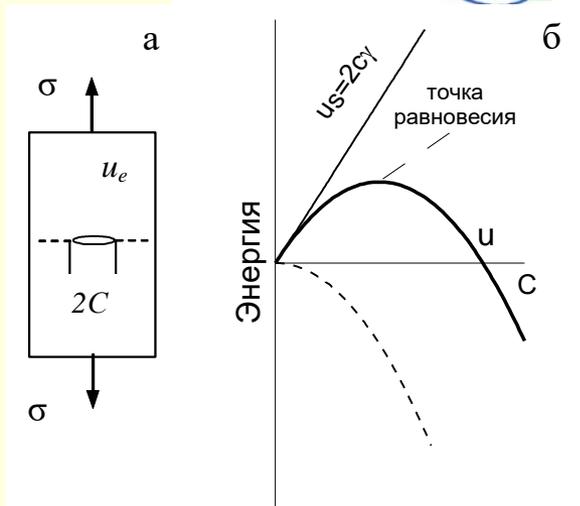
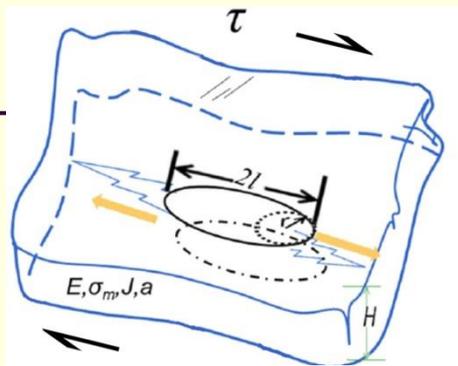
Внутри последних полосы интенсивного измельчения зерен определяют **зону магистрального сместителя** (*Principal slip zone*), толщина которой составляет всего лишь первые см (может локализоваться до толщины менее 1–5 мм).

В сейсмически активных разломных зонах:

- высокая степень локализации
- большая часть деформаций имеет косейсмический характер
- косейсмические разрывы часто происходят вдоль одной и той же поверхности
- перемещения по вторичным, вновь образованным нарушениям сплошности, невелики.

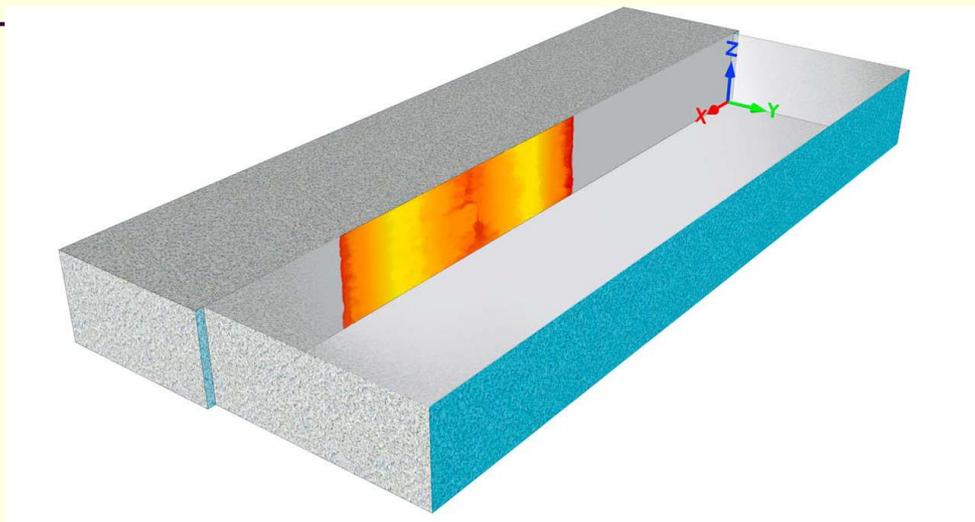
Одной прочности мало!

Распространение трещины Гриффитса



Условия старта/остановки разрыва

Скольжение по разлому



Разрыв начинается если выполняется условие

$$\frac{dU}{dc} = \frac{dU_e}{dc} + \frac{dU_s}{dc} = 0$$

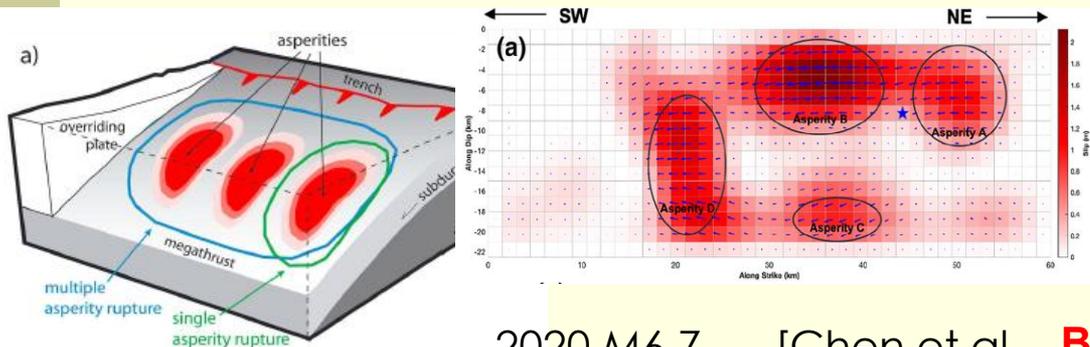
Разрыв останавливается либо если возрастает удельная энергия разрушения, либо снижается интенсивность выделения упругой энергии.

И условие старта, и условие остановки определяются соотношением между скоростью динамического высвобождения упругой энергии деформации (U_e) и скоростью расходования энергии на распространение трещины (U_s).

«Сильные» и «слабые» участки разломов - пятна

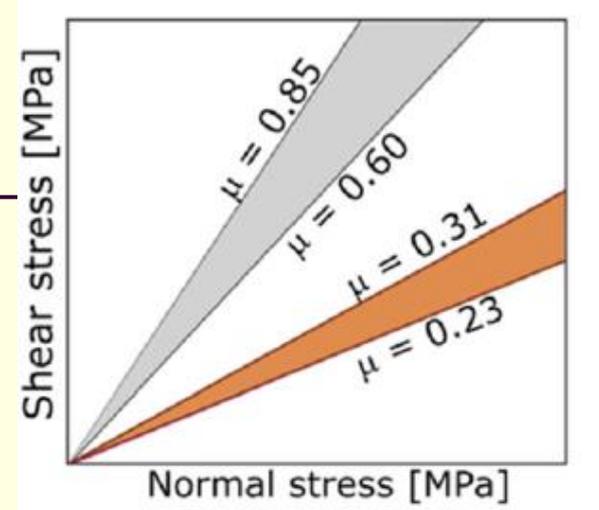
asperities (Kanamori, Stewart, 1978)

Геодезия, сейсмология, наблюдения в ближней зоне



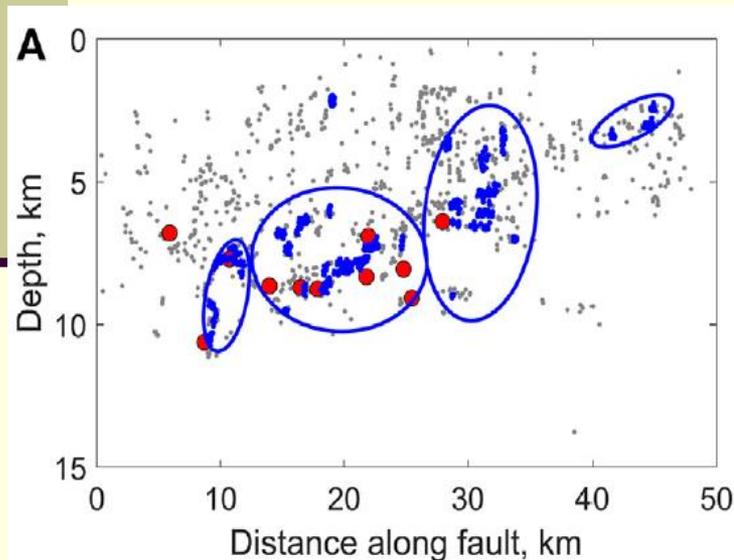
2020 M6.7,
N-A Fault

[Chen et al.,
2020]

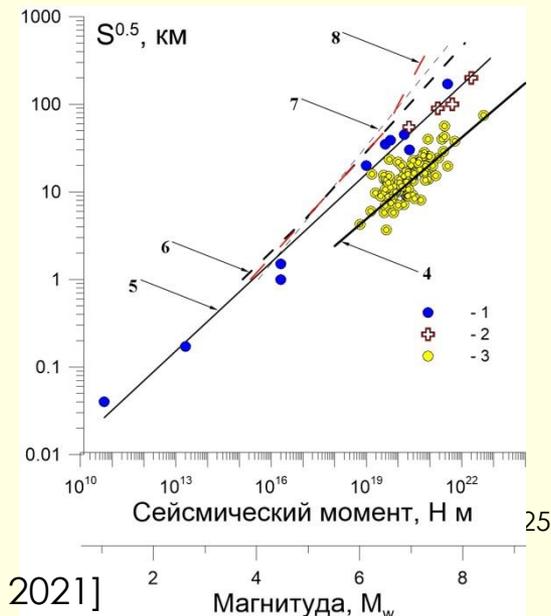


Высокая прочность – плотные породы

Низкая прочность - филлосиликаты



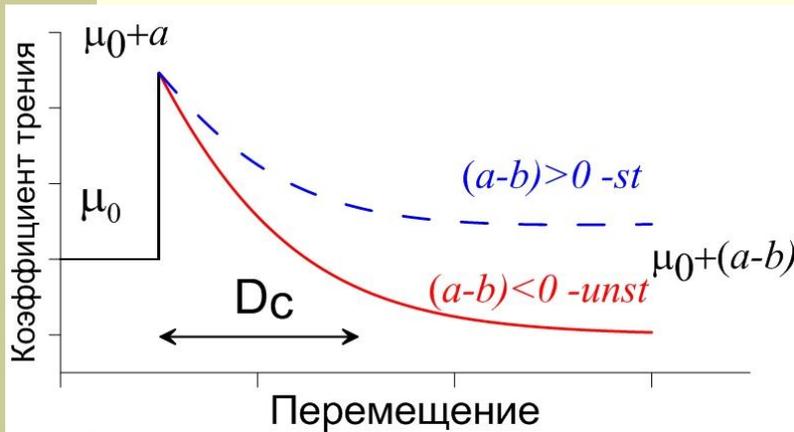
CALAVERAS
FAULT
Серые точки -
фоновая
сейсмичность,
голубые плотные
кластеры, красные
– гипоцентры
ML ≥ 4.
(Ostapchuk et al.,
2022)



[Кочарян, Кишкина., 2021]

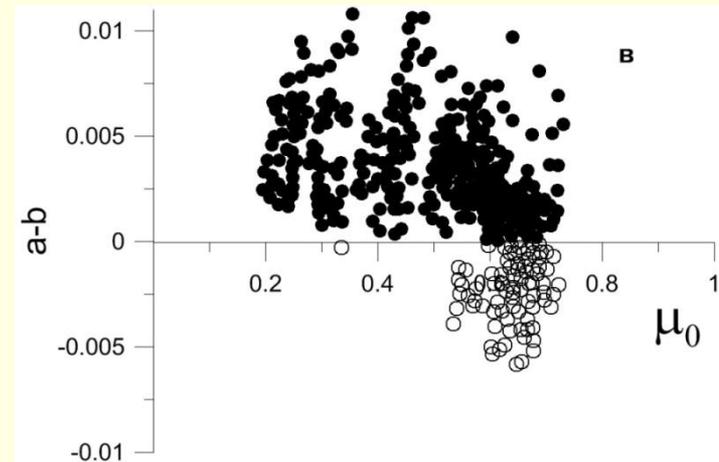
Фрикционные параметры определяют не только величину трения, но и скорость его снижения после начала скольжения!!

Модель Rate & State трение



Фрикционные свойства — «упрочнение-разупрочнение» — определяются материальным составом поверхности скольжения, а также P-T условиями.

$a-b > 0$ - скоростное упрочнение (VS) — стабильное скольжение
 $a-b < 0$ - скоростное разупрочнение (VW) — нестабильное скольжение



Тип скольжения разлома эволюционирует от устойчивого к неустойчивому скольжению с увеличением коэффициента трения. Кочарян и др., 2023

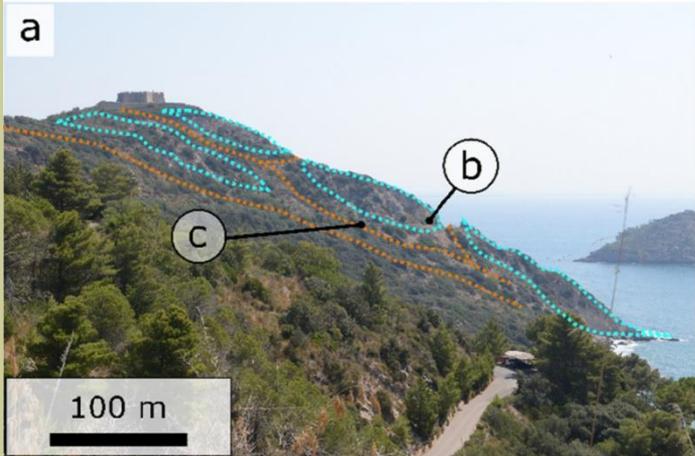
Значения коэффициентов трения и фрикционных параметров, определенных для некоторых геоматериалов

Материал	μ_0 , сухой	μ_w , водонас.	Фрикционный параметр, (a-b)
Актинолит (85%)+ хлорит (15%)		0.5-0.8	<0
Антигорит		0.57-0.60	-0.0044-(-0.0015)
Амфиболит	0.67		-0.001-(-0.016)
Гранит Westerley	0.63-0.72	0.6-0.7	-0.005- 0.023
Габро		0.58-0.68	-0.02 - 0.007
Гиббсит	0.74	0.5	
Известняк		0.62-0.71	-0.004-0.005
Лизардит	0.8	0.18	
Монтморлонит	0.41	0.03	
Сапонит		0.1-0.17	0.0007–0.0067
Смектит	0.25-0.31	0.03-0.09 остаточный	-0.0015–0.011
Эпидотит	0.63		-0.001-(-0.007)

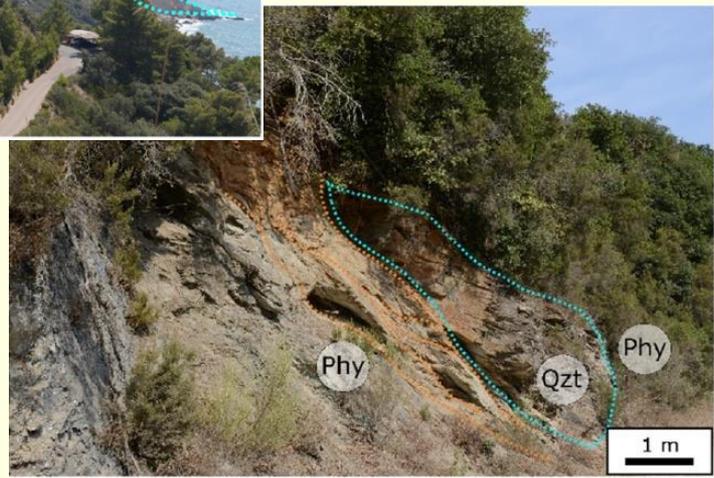
Кочарян и др., 2023

$a - b > 0 - VS - \text{упрочнение}$

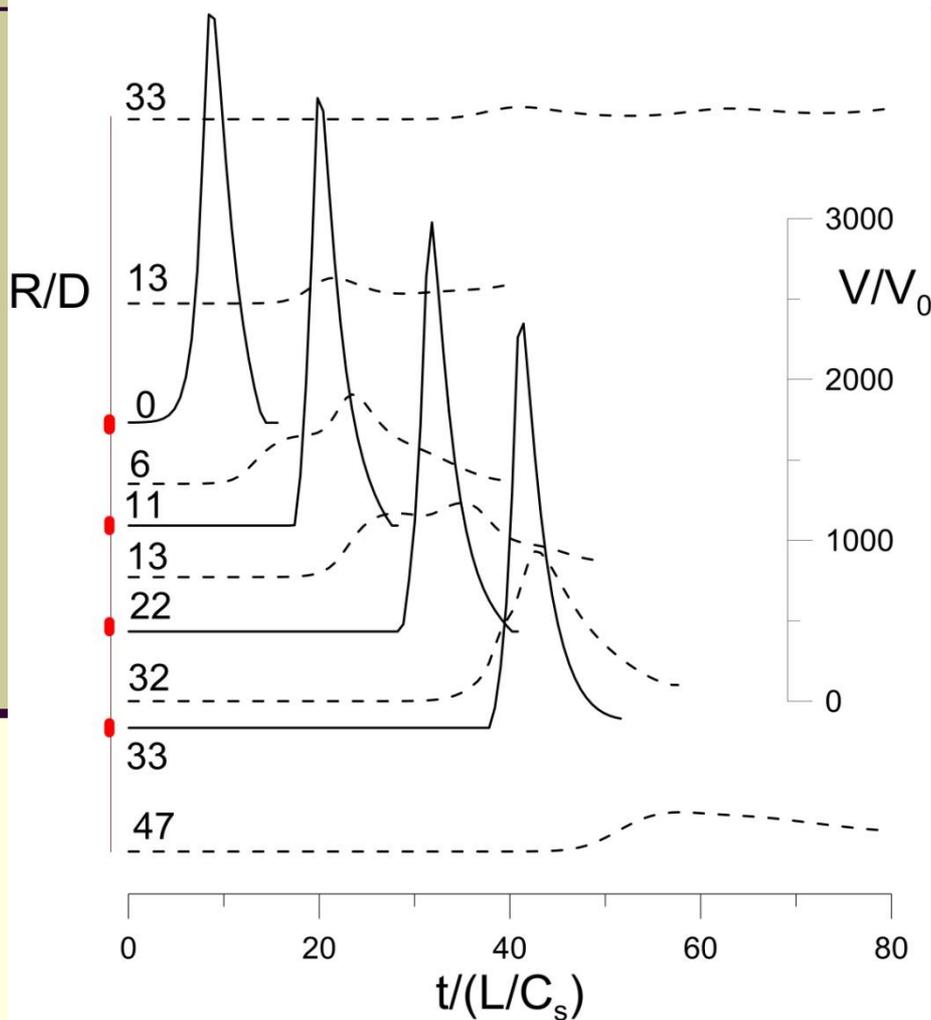
$a - b < 0 - VW - \text{разупрочнение}$



Современные представления: «пятна asperitis» - области с разными фрикционными свойствами.



Несколько пятен



За пределами участка разупрочнения скорость смещения быстро снижается, вновь увеличиваясь на соседних пятнах. Чем выше суммарная доля участков с разупрочнением, тем выше доля энергии деформации, идущей на излучение упругой волны в высокочастотной части спектра.

Вне пятен – кулоновское трение.

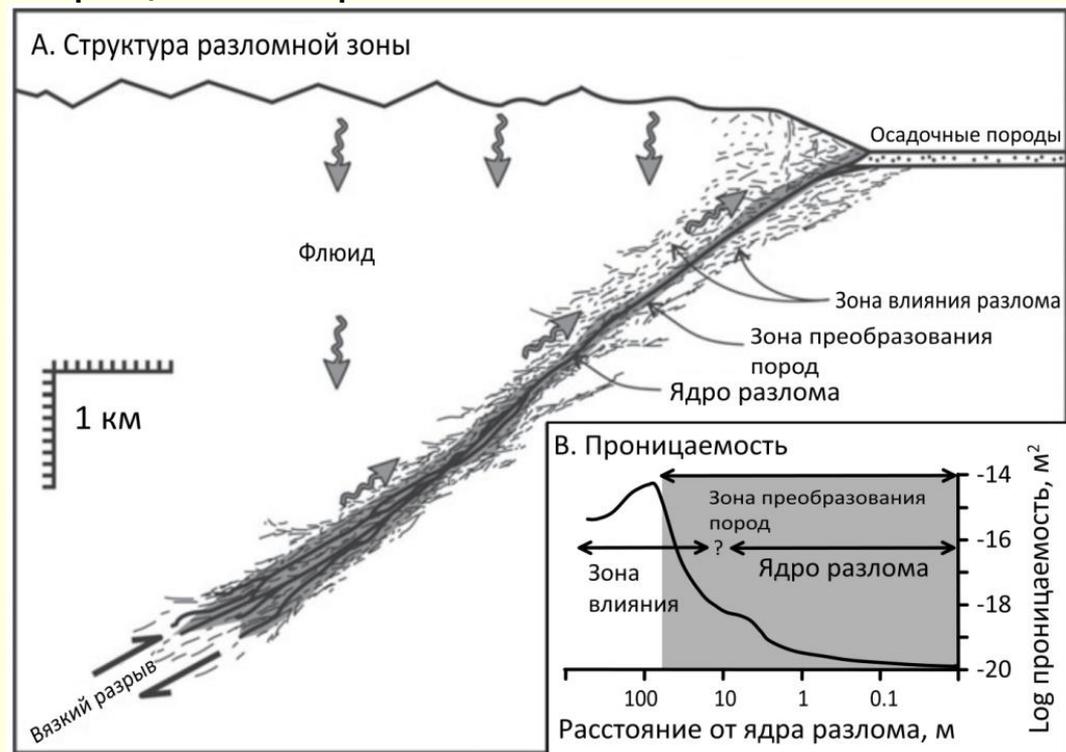
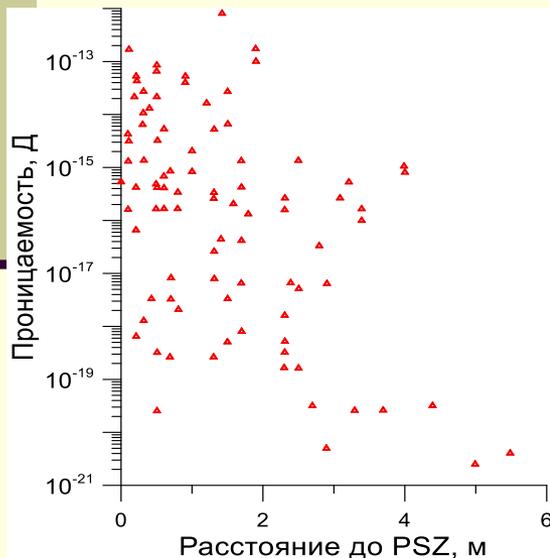
Проницаемость разломных зон

«Точечные» данные.

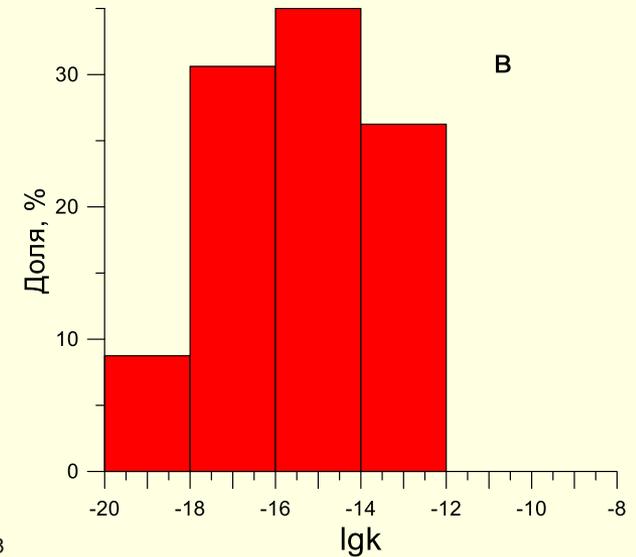
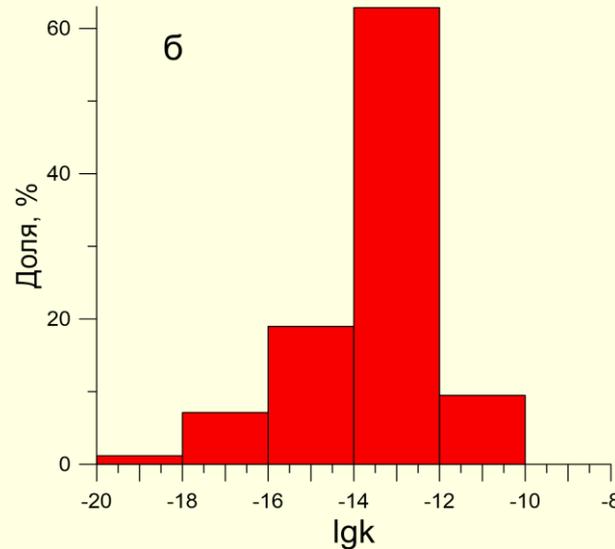
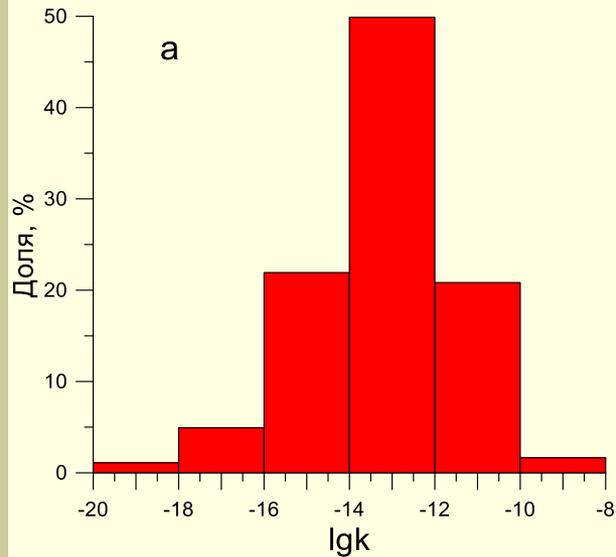
1. На обнажениях отбираются образцы для проведения испытаний, а также выполняется оценка эффективной проницаемости отдельных трещин.
2. Керны из протолита, зоны влияния.

«Объемная проницаемость

1. Малые глубины - опытно-фильтрационные работы.
2. Поинтервальные измерения в скважинах.



Гидравлические свойства разломных зон



а – 0-1000м (N=183);

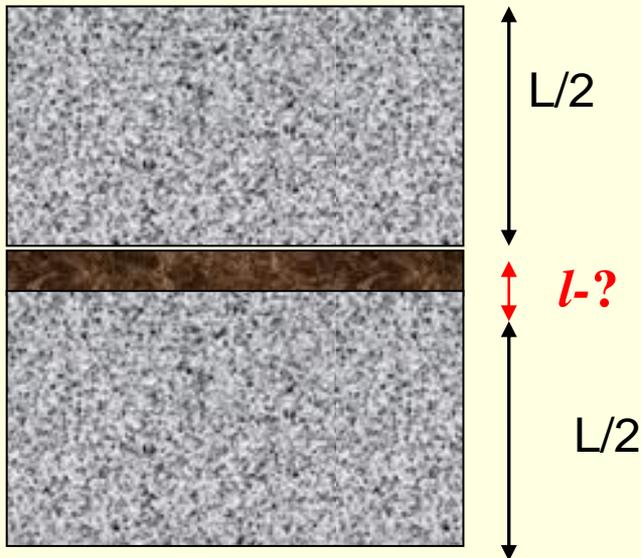
б – 1000-2500м (N=84);

в – 2500-9065м (N=23).

Гистограммы распределения логарифма объемной
проницаемости разломных зон для нескольких
интервалов глубин (по данным [Scibek, 2020])

Какую характеристику разлома следует выбрать для использования в геомеханических моделях?

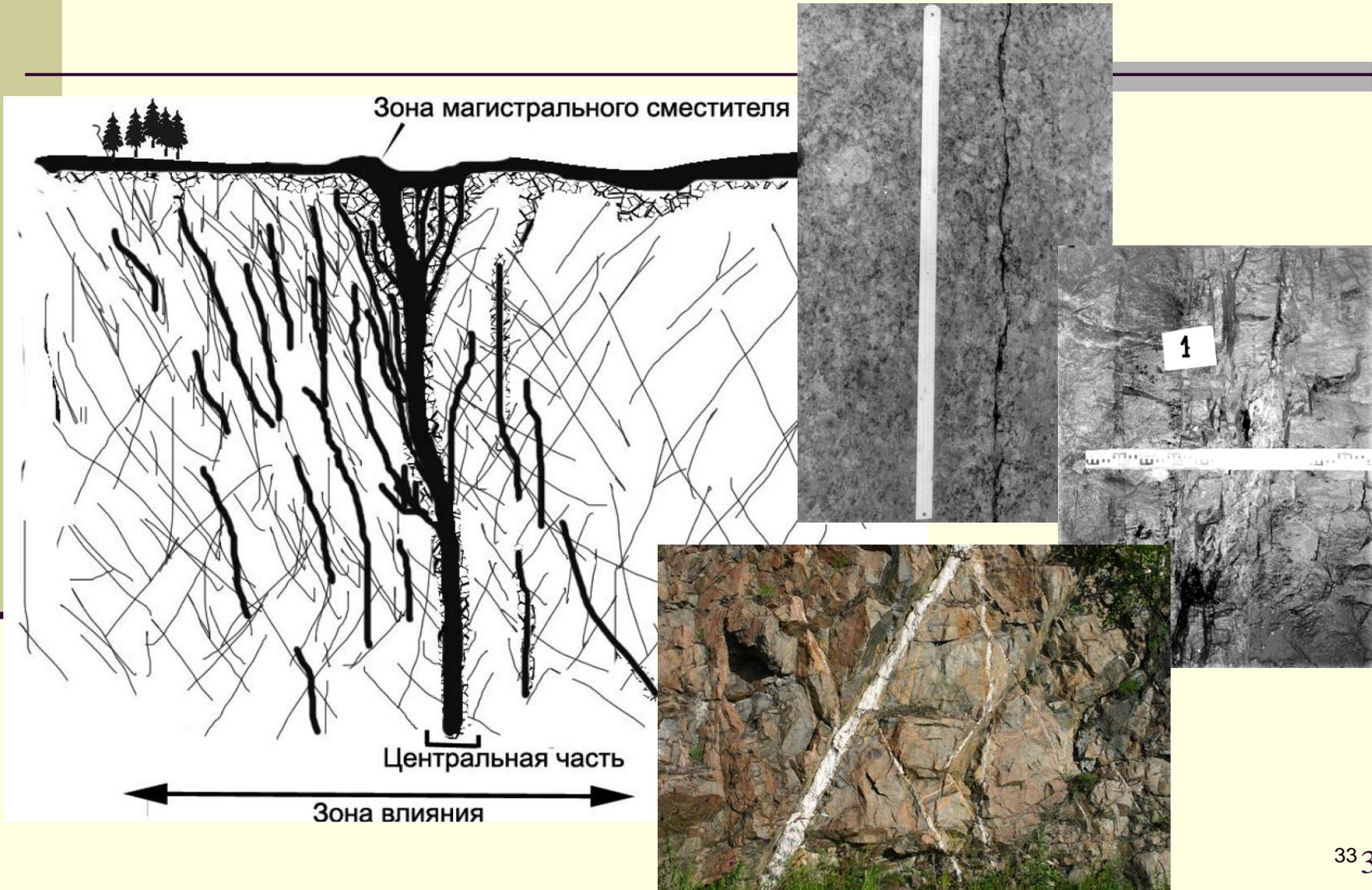
Отступление 3:



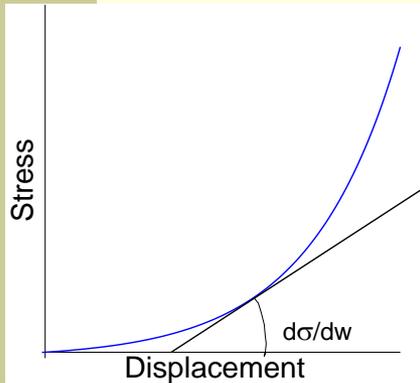
$$\frac{1}{E_{\text{эф}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{E_i}}{\sum_{i=1}^n L_i} = \sum_{i=1}^n \frac{(L_i / H)}{E_i} = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{E_i}$$

$$\frac{1}{E_{\text{эфф}}} = \frac{1}{(l + L)} \left(\frac{l}{E_m} + \frac{L}{E} \right) \approx \frac{1}{L} \left(\frac{l}{E_m} + \frac{L}{E} \right)$$

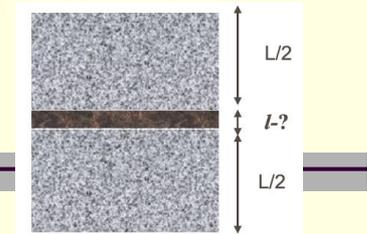
Что брать в качестве ширины разлома?



Нормальная и сдвиговая жесткость



$$k_n = \frac{d\sigma}{dW_n} \quad k_s = \frac{d\tau}{dW_s} \quad [\text{МПа/мм}]$$

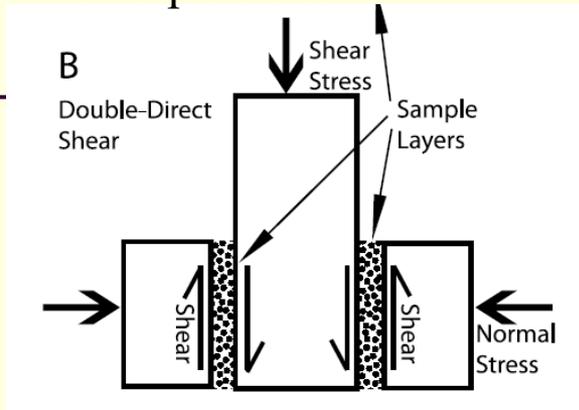


Goodman, 1968

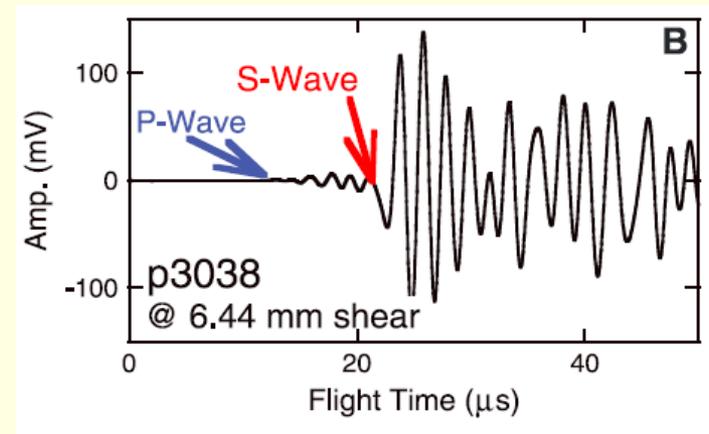
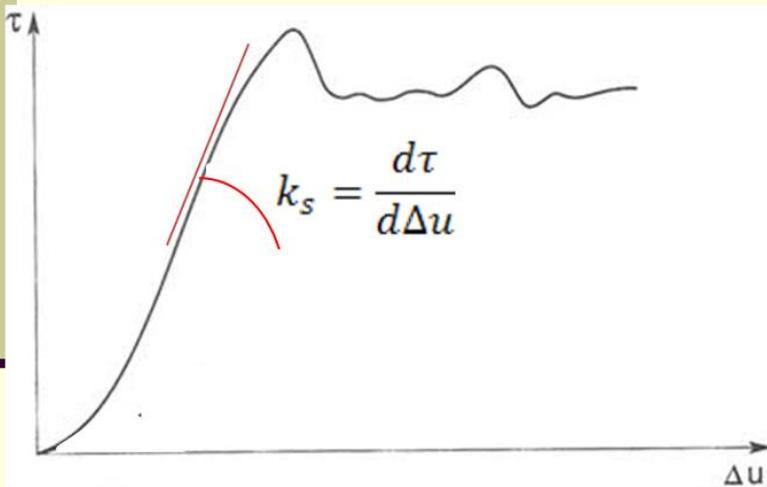
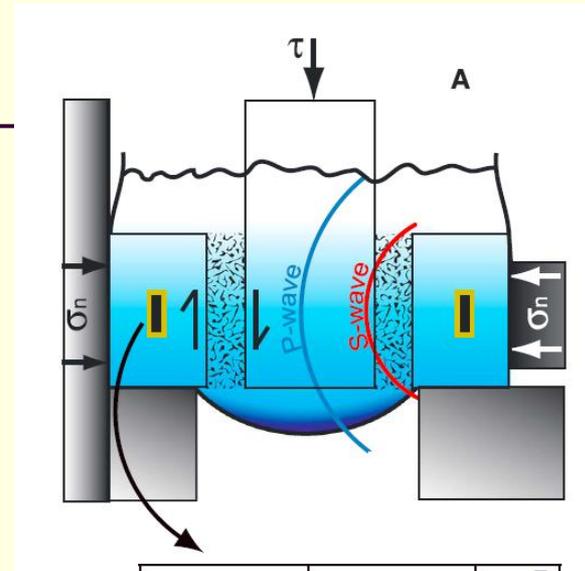
Достоинства «жесткости»:

1. Позволяет «уйти» от неопределенного параметра «толщина трещины (разлома)».
2. Более других параметров чувствительна к изменению характеристик как нарушения сплошности, так и НДС. Отражает структуру разлома, проницаемость, свойства заполнителя.
3. Может быть измерена дистанционно сейсмическими методами.
4. Сдвиговая жесткость разлома является макроскопическим параметром, контролирующим режим скольжения по разлому и эффективность подвижки по разлому как сейсмического источника.
5. Резкое снижение сдвиговой жесткости разлома свидетельствует о переходе разлома в метастабильное состояние.

квазистатические эксперименты



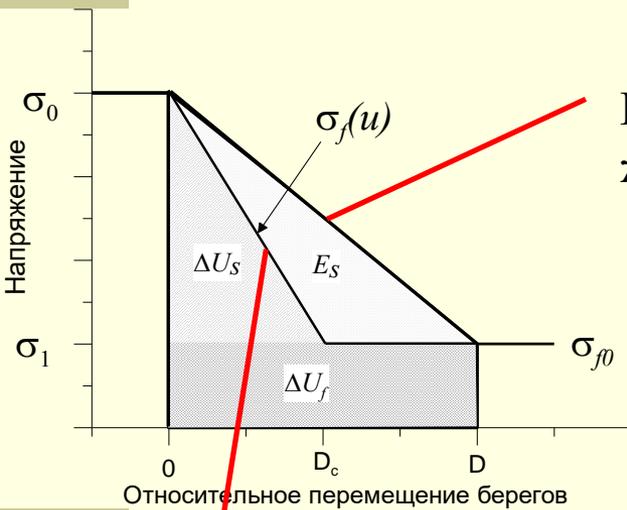
УЗ эксперименты



Различия между статической и динамической жесткостями может достигать двух порядков.

Kaproth, V. M., and C. Marone (2014),

Отступление 4 Баланс энергии при образовании разрыва.



Наклон этой линии —
жесткость массива $K \sim G/L$

$$k_s = \frac{d\sigma_f}{dD}$$

- по определению
жесткость разлома

ΔU_e — полное изменение внутренней энергии
 ΔU_s — энергия, затраченная на трещинообразование
 ΔU_f — энергия диссипированная в тепло при скольжении
 E_s — излученная энергия

Условие неустойчивости:

$$|k_s| > |K|$$

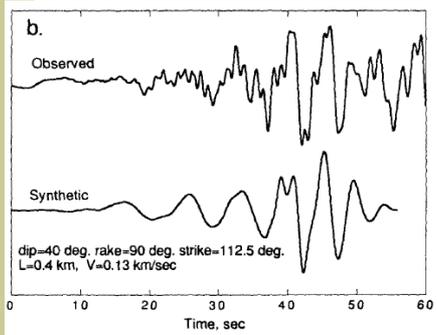
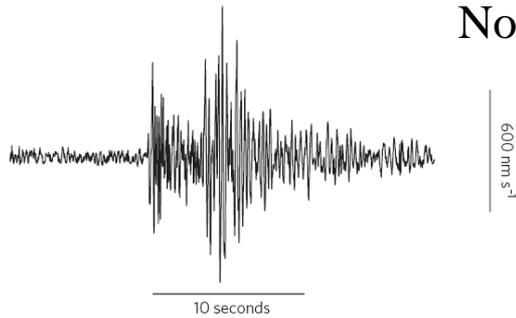
Скорость снижения
сопротивлению сдвигу больше,
чем скорость сброса
напряжений.

**Сейсмическое
излучение содержит
только информацию,
касающуюся
изменения напряжений
в ходе землетрясения
и не содержит
информацию о
величине полных
напряжений**

Отношение K/k_s определяет E_s

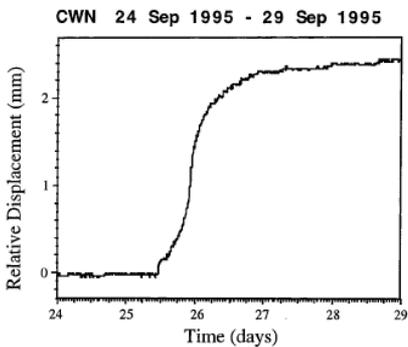
Режимы скольжения

Normal EQ



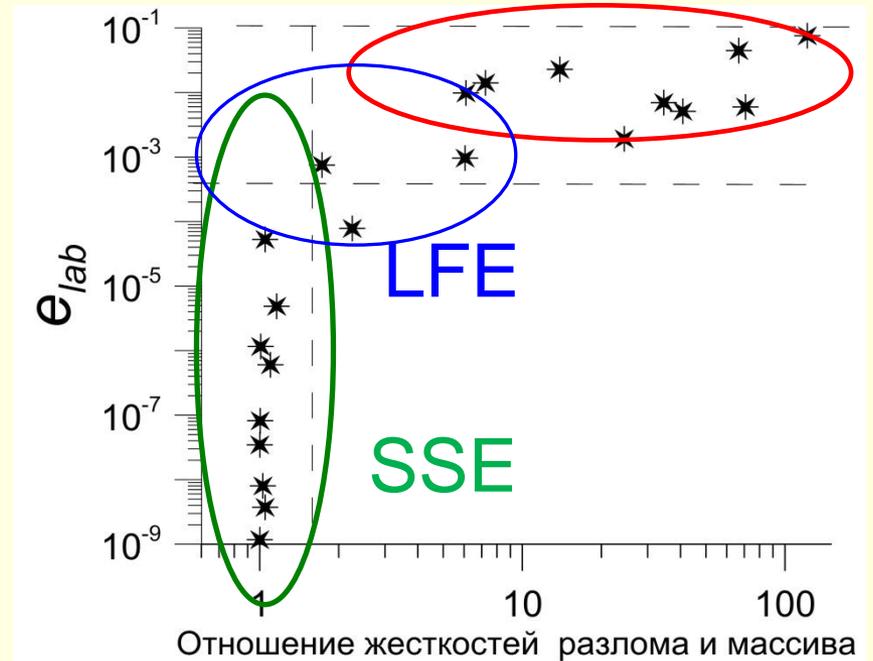
LFE

VLFE



SSE

EQ



Сдвиговая жесткость контролирует эффективность подвижки по разлому, как сейсмического источника.

Геомеханические условия инициирования динамического скольжения

$$(I) \tau \sim \tau_p$$

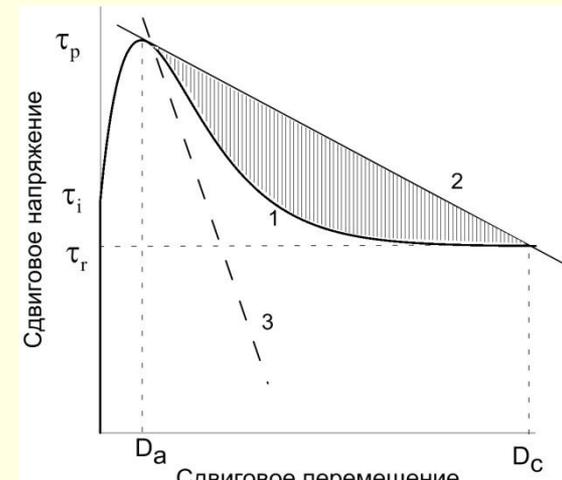
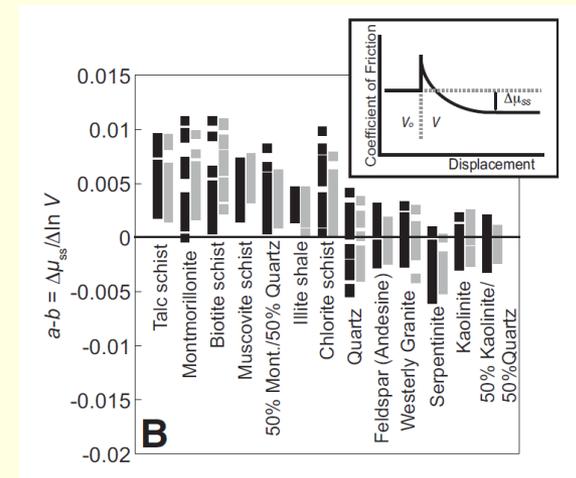
Достижение в локальной области уровня напряжений порядка текущей величины прочности контакта.

$$(II) \frac{\partial \tau}{\partial v} < 0; \quad \frac{\partial \tau}{\partial D} < 0$$

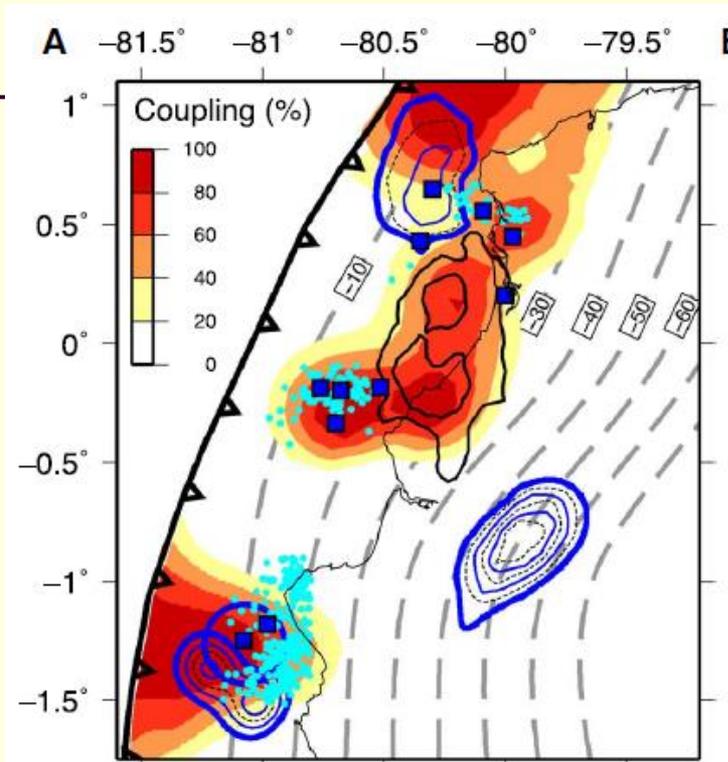
Разупрочнение - P-T условия, структурные и физико-механические свойства геоматериала.

$$(III) |k_s| = \left| \frac{\partial \tau}{\partial D} \right| \geq K = \eta \frac{G}{\hat{L}}$$

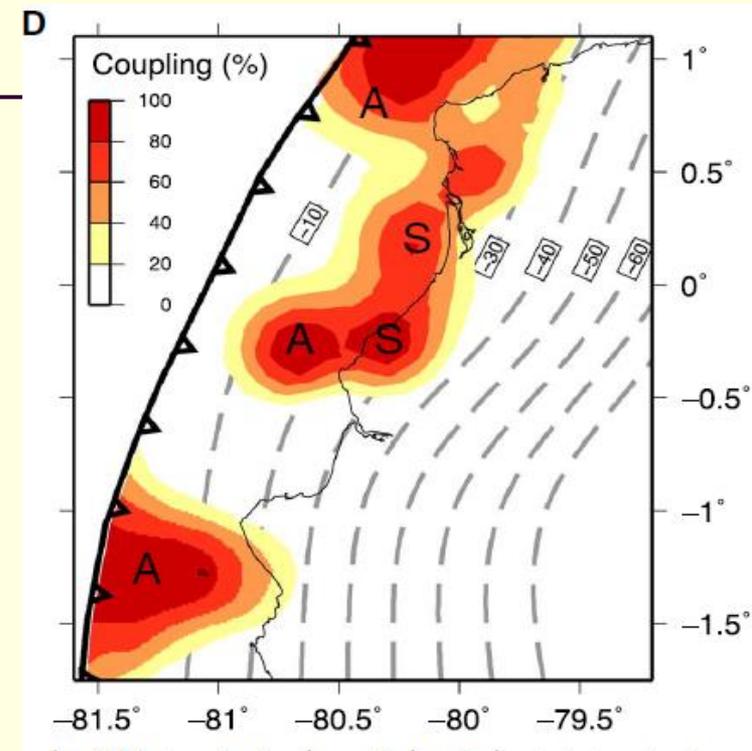
Соотношение между жесткостями массива и разлома.



Взаимодействие SSE и EQ

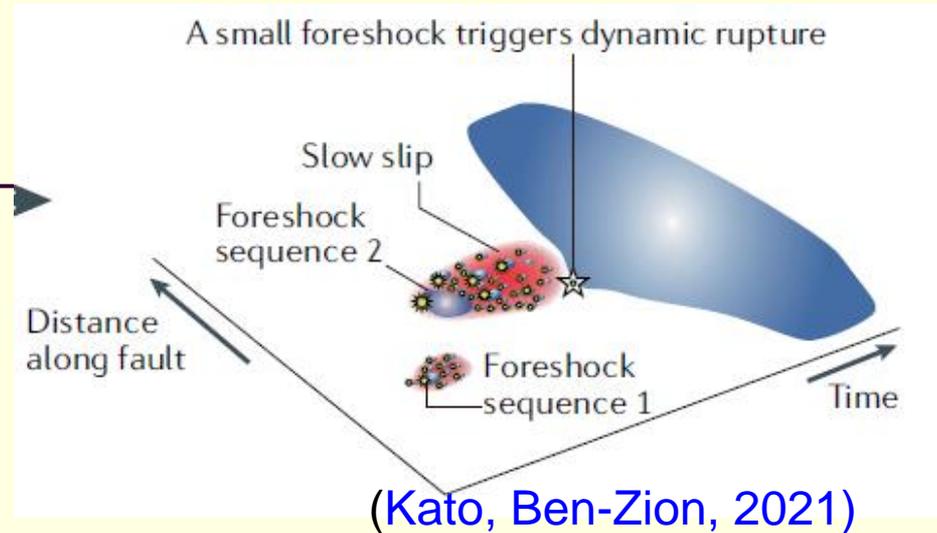


SSE (синие линии), сейсмические рои (голубые точки) и повторы (синие квадраты) перед землетрясением MW 7.8 2016г. (Rolandone et al., 2018)



SSE могут происходить при VW трении, если из-за повышенного давления флюида размер зоны нуклеации больше размера пятна. Это предотвращает эволюцию скольжения в сторону динамической неустойчивости.

Взаимодействие SSE и EQ



- (i) Прямая корреляция между SSE и некоторыми крупными землетрясениями определенно установлена/
- (ii) Большинство SSE не влечет за собой сильных землетрясений.
- (iii) Судя по всему, SSE является возможной, но не обязательной частью процесса зарождения землетрясений.

Едва ли стоит рассчитывать на использование информации об этих явлениях в интересах краткосрочного прогноза, однако их изучение дает ценную информацию о физике очага.

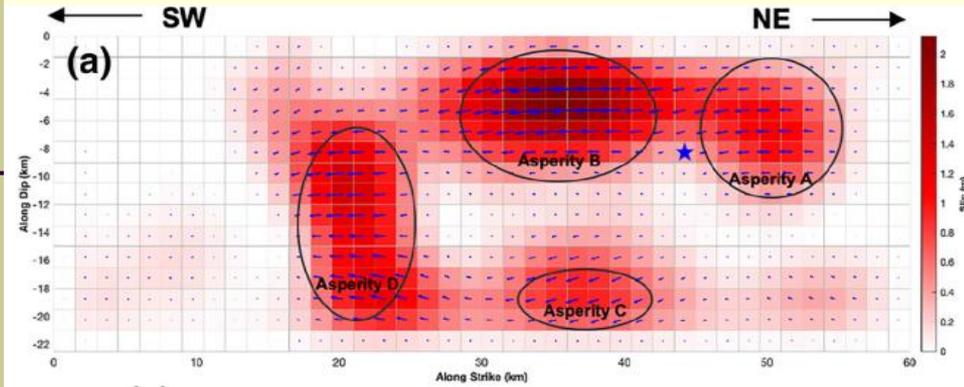
Первоочередные задачи мониторинга с целью получения первичных сведений необходимых для построения расчетной модели

Выявлять:

1. Специфические фрикционные свойства зоны скольжения или ее подобластей (V_S , V_W).
2. Области с локализацией различных типов скольжения.
3. Предвестник начала динамического скольжения (хорошо бы ☺☺ !!!!).

Сейсмологические данные

2020 M6.7, Восточно-Анатолийский разлом (Chen et al., 2020)



Спутниковая геодезия

2003 Mw 6.8 Chengkung earthquake
Avouac, 2015

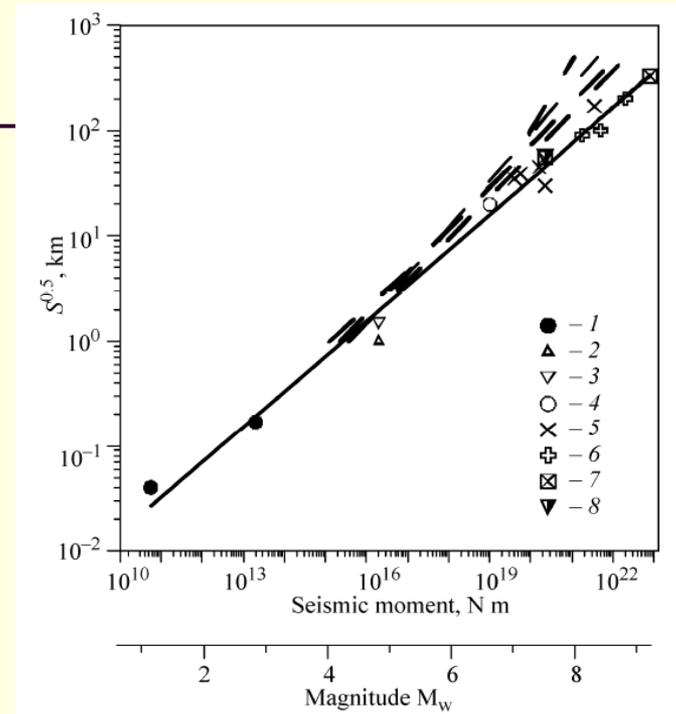
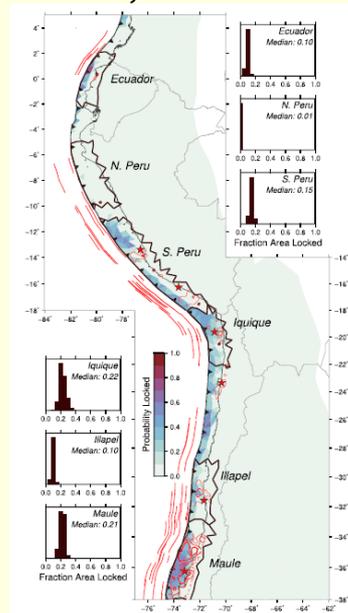
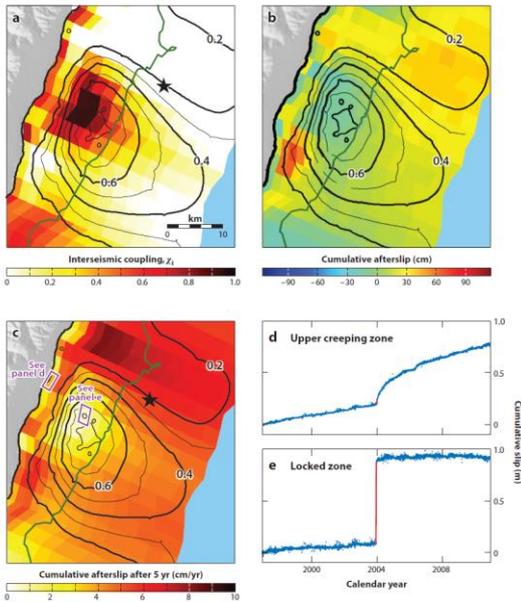


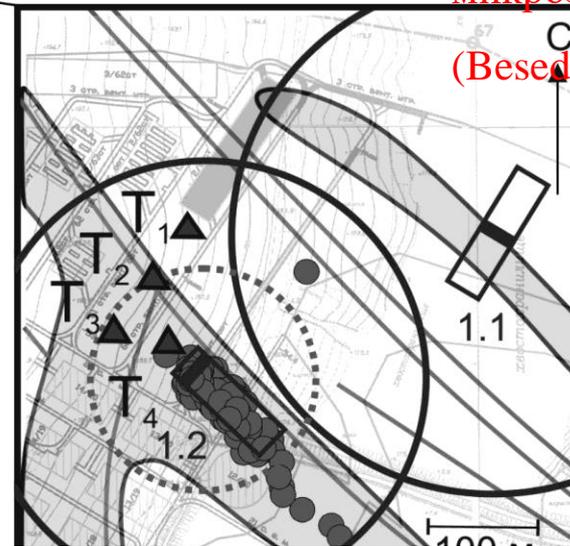
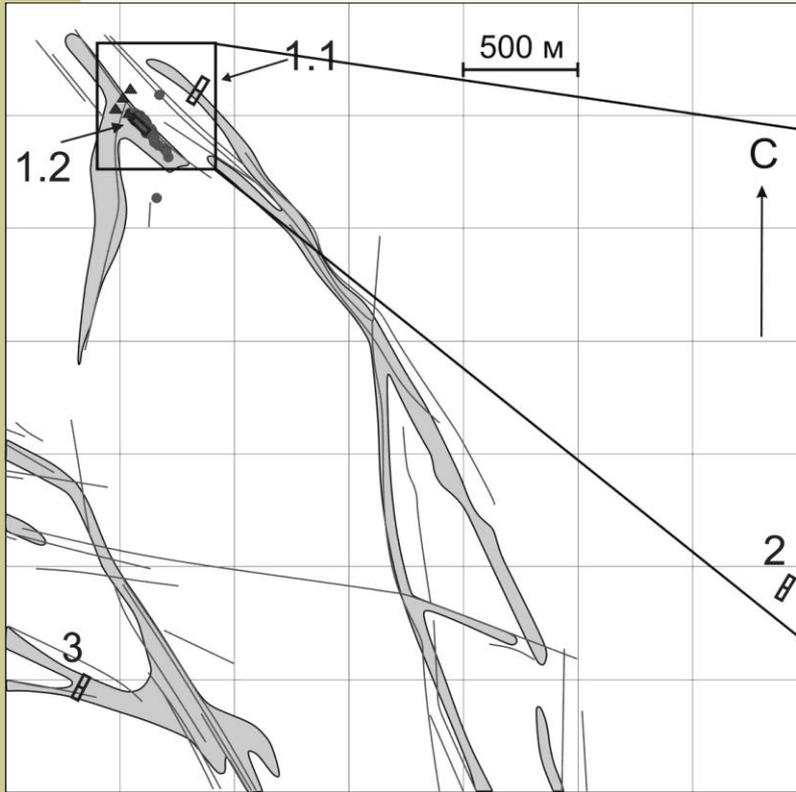
Fig. 9. Average size of asperities versus the earthquake scale. S is the effective area of asperities. 1—[67], 2—[68], 3—[69], 4—[70], 5—[71], 6—[66], 7—[72], 8—[73]

Мегнадвиги, Южная Америка, Herman, Govers 2020

Kocharyan, Kishkina, 2021

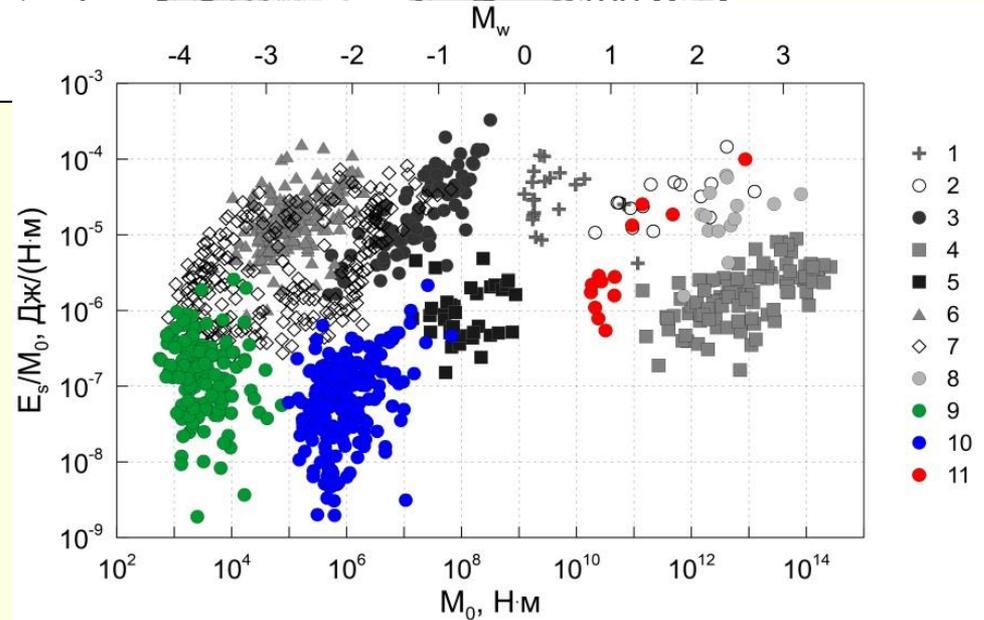
а. Мониторинг излучательной эффективности слабой сейсмичности (оценка «медленности» событий в локальной области).

Рой медленных микроземлетрясений (Besedina et al., 2021)



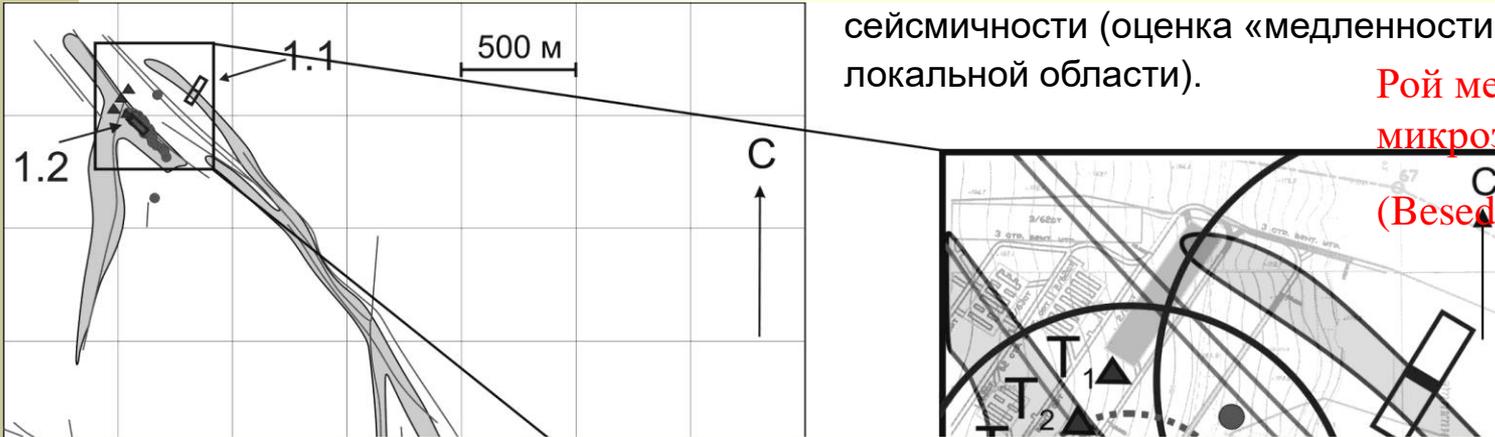
$V/C_s \sim 0.1-0.5$

Крайне низкие значения E_s/M_0 и, соответственно, V_f позволяют предполагать, что взрыв инициировал рой медленных микроземлетрясений.



а. Мониторинг излучательной эффективности слабой сейсмичности (оценка «медленности» событий в локальной области).

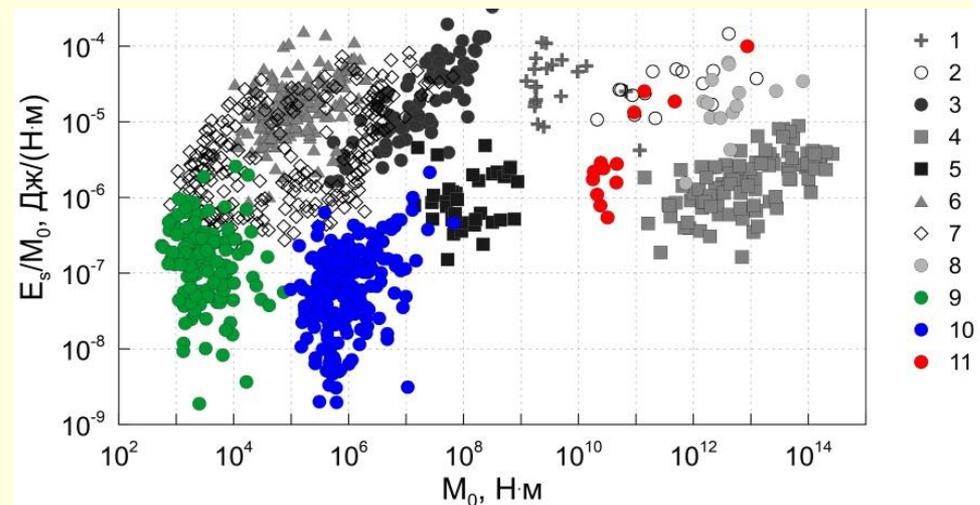
Рой медленных микроземлетрясений (Besedina et al., 2021)



Вопрос: Насколько присутствие медленных событий гарантирует асейсмичность области??

0.5

Крайне низкие значения E_s/M_0 и, соответственно, V_f позволяют предполагать, что взрыв инициировал рой медленных микроземлетрясений.



б. Снижение эффективной жесткости разлома перед динамическим срывом

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2011, том 441, № 3, с. 384–387

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34

ИЗМЕНЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ РАЗЛОМНОЙ ЗОНЫ В ХОДЕ СЕЙМИЧЕСКОГО ЦИКЛА

© 2011 г. Г. Г. Кочарян, А. А. Остапчук

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2016, том 470, № 6, с. 707–710

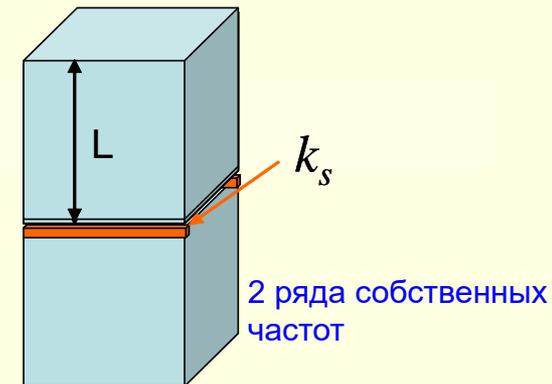
ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34

О ПРЕДВЕСТНИКЕ ДИНАМИЧЕСКОГО СРЫВА ПО ТЕКТОНИЧЕСКОМУ РАЗЛОМУ

© 2016 г. Академик РАН В. В. Адушкин, Г. Г. Кочарян, А. А. Остапчук*, Д. В. Павлов
Поступило 29.04.2016 г.

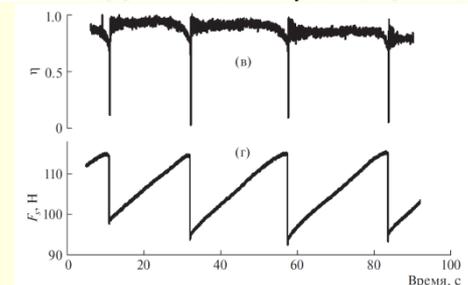
Идея метода
(2003г.)



Сдвиговое напряжение



Сдвиговое перемещение



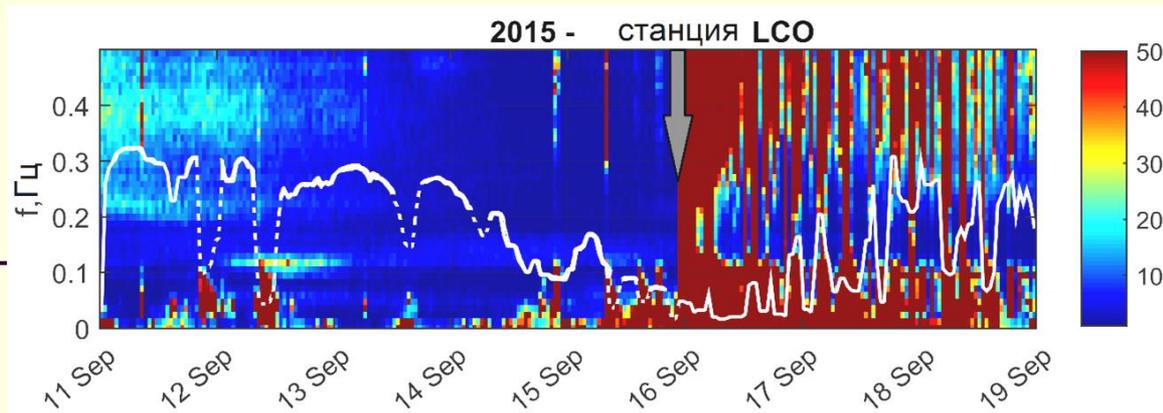
SCIENTIFIC REPORTS

OPEN Traces Of Laboratory Earthquake Nucleation In The Spectrum Of Ambient Noise

Received: 8 January 2018
Accepted: 4 July 2018
Published online: 17 July 2018

Gevorg G. Kocharyan^{1,2}, Alexey A. Ostapchuk^{1,2} & Dmitry V. Pavlov¹

The short-term forecast of earthquakes associated with fault rupture is a challenge in seismology and



Нормированная спектрограмма сейсмического сигнала, зарегистрированного на станции LCO перед Чилийским землетрясением Mw8.3, 16.09.2015г. Белой линией представлен спектральный центростид, рассчитанный в частотной области 0.01 – 0.5 Гц.

*ISSN 1069-3513, Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2020, Vol. 56, No. 2, pp. 151–161. © Pleiades Publishing, Ltd., 2020.
Russian Text © The Author(s), 2020, published in Fizika Zemli, 2020, No. 2, pp. 10–20.*

Microseismic Noise before and after Strong Earthquakes: Case Study of Chilean Subduction Zone

A. N. Besedina^{a, *}, S. B. Kishkina^a, G. G. Kocharyan^a, and I. A. Ryakhovskiy^a

^a*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

**e-mail: besedina.a@gmail.com*

Received August 5, 2019; revised October 14, 2019; accepted October 14, 2019

Выводы

- Для сейсмически активных разломных зон характерны:
 - высокая степень локализации
 - большая часть деформаций имеет косейсмический характер
 - косейсмические разрывы часто происходят вдоль одной и той же поверхности
- Различные режимы реализации энергии деформации определяются фрикционными свойствами поверхности раздела, зависящими от P-T условий, материального состава, гидрологического режима и т.д.
- Отношение сдвиговой жесткости разломной зоны к жесткости массива является универсальным параметром, определяющим режим скольжения независимо от P-T условий.
- Области разломных зон с разными режимами скольжения взаимодействуют, в значительной степени определяя ход процессов инициирования, эволюции и остановки динамического разрыва.
- Масштаб зарождающегося разрыва детерминирован фрикционными свойствами окружающих областей.

Перспективные направления исследований

1. Исследование структуры разломных зон на глубине (локализация)

характерные размеры зоны скольжения

- Параметры зоны влияния
- Процессы массопереноса
- Взаимодействие коротких сегментов разрыва

2. Макроскопические условия старта и остановки разрыва.

- Роль различных триггеров.
- Стохастическая или детерминистская модель?
- Взаимодействие различных мод скольжения.

3. Исследование геометрии поверхностей скольжения (в широком смысле)

- На крупных asperities σ_n ниже?
- Шероховатость на больших масштабах не контролирует трение?
- Увеличение амплитуды шероховатости и уменьшение ее минимальной длины волны, приводит к переходу от сейсмического скольжения к асейсмическому.
- Крупномасштабная шероховатость (асперитиз) контролирует «сложность разрыва» и соотношение энергии к моменту.

4. Физическая природа вариаций трения

- систематическое исследование всех обнаруженных зависимостей и комплексирование их в связную, теоретически обоснованную систему.

5. Структура и свойства зоны влияния

- Структура и свойства зоны динамического влияния модулируют параметры динамического разрыва
- Связь структурных и физ.-мех свойств разломной зоны и «сверхзвуковых разрывов».
- «Постоянство» сброса напряжений.

6. Разработка новых методов мониторинга.

7. Новые подходы

- Анализ полевых и лабораторных данных с помощью методов машинного обучения, искусственного интеллекта
- Построение принципиально новых, наблюдательных сетей в окрестности разломных зон.
- Численное моделирование отдельных стадий процесса с целью определения связи между различными физическими механизмами и оценки их относительной важности.

Г.Г. Кочарян

**ГЕОМЕХАНИКА
РАЗЛОМОВ**



ФИЗИКА ЗЕМЛИ, 2021, № 4, с. 3–41

ОБЗОР

УДК 550.34,551.24,622.83

**ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ СКОЛЬЖЕНИЯ
В ЗОНАХ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ РАЗЛОМОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ.
ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА¹**

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, 2023, № 3, с. 3–32

УДК 550.34,551.24,622.83

**ТРЕНИЕ КАК ФАКТОР, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНУЮ
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОДВИЖЕК ПО РАЗЛОМАМ И ВОЗМОЖНОСТЬ
ИХ ИНИЦИИРОВАНИЯ. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА**

© 2023 г. Г. Г. Кочарян¹, *, А. Н. Беседина¹, Г. А. Гридин¹, К. Г. Морозова¹, А. А. Остапчук¹

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, 2024, № 4, с. 3–32

УДК 550.34+556.3

**АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ГИДРОГЕОЛОГИИ
СЕЙСМОГЕННЫХ РАЗЛОМНЫХ ЗОН**

© 2024 г. Г. Г. Кочарян¹, *, И. В. Шатунов¹

A close-up photograph of large, dark, textured rocks. The rocks are layered and have a rough, granular surface. In the center, a small, bright yellow flower with green leaves is growing out of a crevice between the rocks. The lighting is natural, highlighting the textures of the rock and the vibrant color of the flower.

**Спасибо за
внимание**