



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

## **Использование представлений геомеханики разломных зон при решении задач сейсмологии**

***Г.Г. Кочарян, А.Н. Беседина, А.А. Остапчук***  
*[gevorgkidg@mail.ru](mailto:gevorgkidg@mail.ru)*

**«Современные методы оценки сейсмической опасности и  
прогноза землетрясений»  
22 - 23 октября 2025 г. Москва**

As you might know, our previous national earthquake prediction project was in most parts focused on the hunting of precursors before large earthquake such as based on monitoring of seismic activities, change in wavespeed in the crust and mantle, monitoring preslip etc. However, we completely gave up finding such precursor after we failed predicting destructive Kobe earthquake in 1995. Since then the terminologies of "earthquake prediction" "foretaste (precursor) of large earthquake" are taboo word in Japan. Since then the earthquake prediction program was turned to be based on more basic science such as for understanding source physics, simulation of slip and accumulation of stress, developing high-resolution observation system etc.

## Цитата из e-mail А.А. Любушина 6.08.2025

«Как вы, возможно, знаете, наш предыдущий национальный проект по прогнозированию землетрясений был в основном сосредоточен на поиске предвестников крупных землетрясений, основанном на мониторинге сейсмической активности, изменении скорости волн в земной коре и мантии, мониторинге предподвижки и т.д. Однако мы полностью отказались от поиска таких предвестников после неудачного прогнозирования разрушительного землетрясения в Кобе в 1995 году. **С тех пор термины «прогноз землетрясений» и «предвестник (предвестник) крупного землетрясения» стали табу в Японии, а программа прогнозирования землетрясений стала основываться на более фундаментальных научных принципах, таких как понимание физики источника, моделирование подвижки и накопления напряжений, разработка высокоточной системы наблюдений и т.д.»**



В.Н. Родионов



В.Н. Николаевский

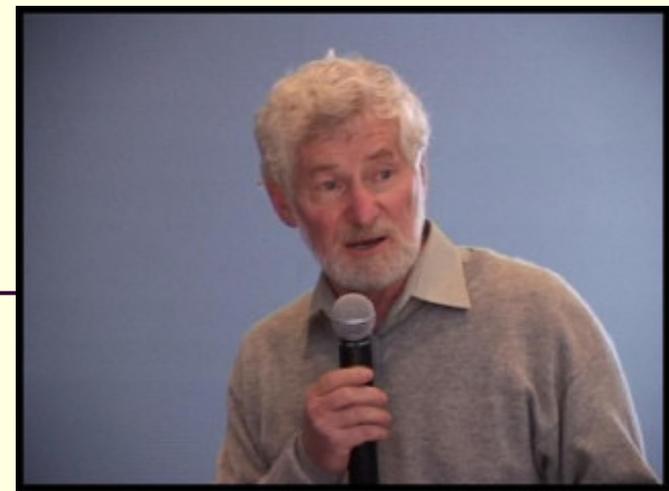
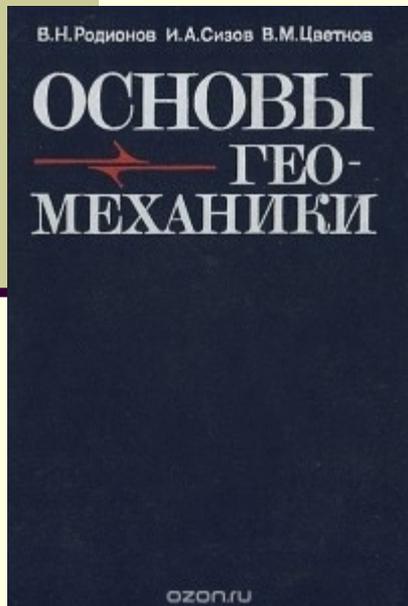


Фото из книги: Сергей Гольдин, "Стихи", 2002 г.

С.В. Гольдин



Физическая мезомеханика Том 7 №1 Февраль 2004

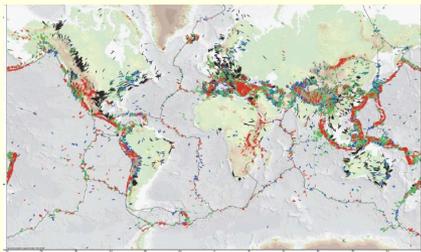
## ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

*ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК*

Под редакцией академика С.В. Гольдина,  
М.М. Немировича-Данченко

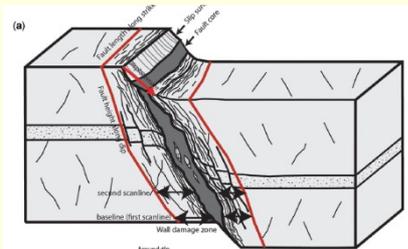
В ИДГ РАН развивается важное для решения многих задач геофизики, сейсмологии, горных наук научное направление – **"Геомеханика разломов"**, объединяющее исследования в области структуры разломных зон, их свойств, механики их деформирования.

## Поле напряжений



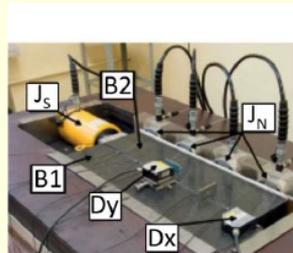
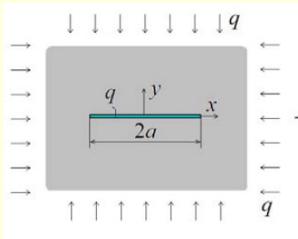
Геодинамика  
Тектоника

## Структура



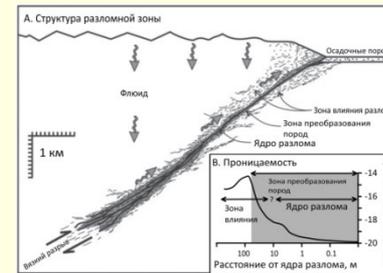
Геология,  
Геофизика

## Свойства



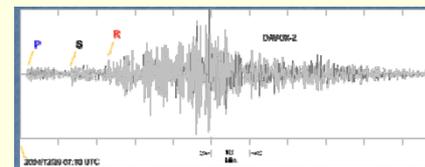
Физика,  
Механика

## Флюидодинамика

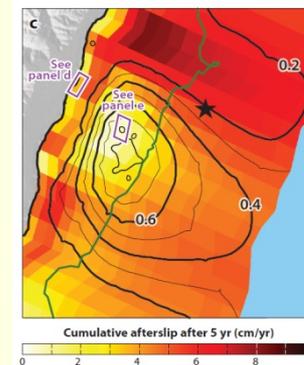


Гидрогеология

## Деформационные процессы в очаге



Сейсмология



Спутниковая  
геодезия и  
интерферометрия

1995 – 2025г.г. – интенсивное развитие физики очага – глубинное бурение, качественные лабораторные эксперименты, плотные сейсмологические сети, космическая геодезия и т.д.

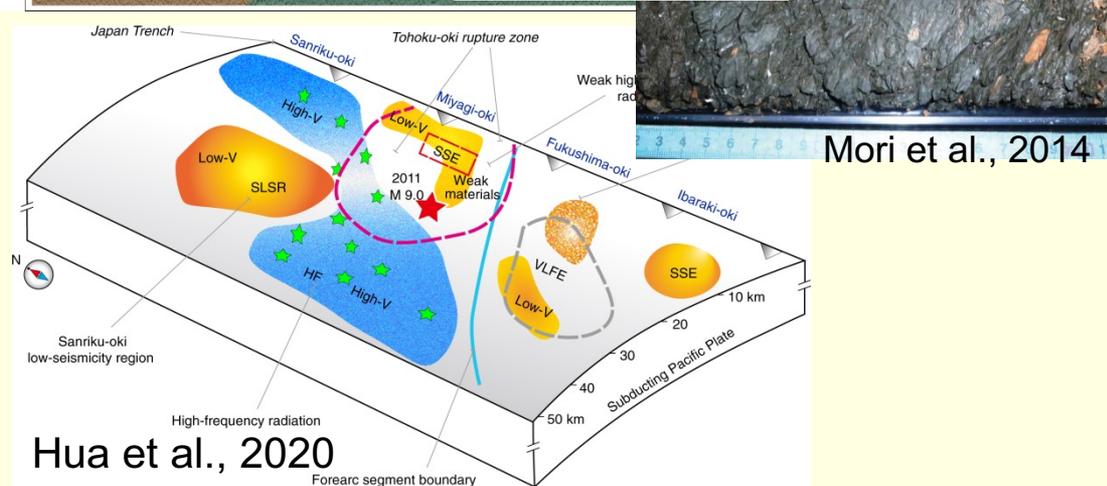
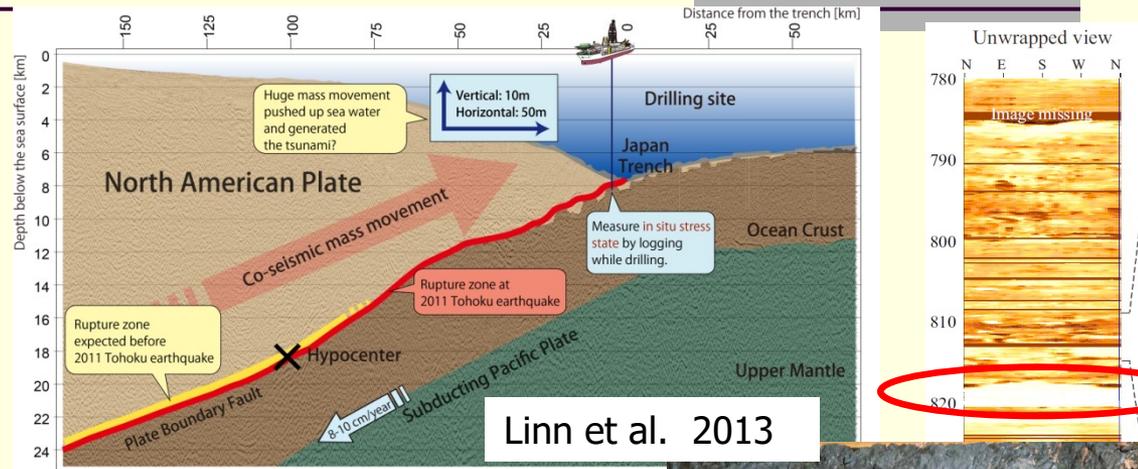
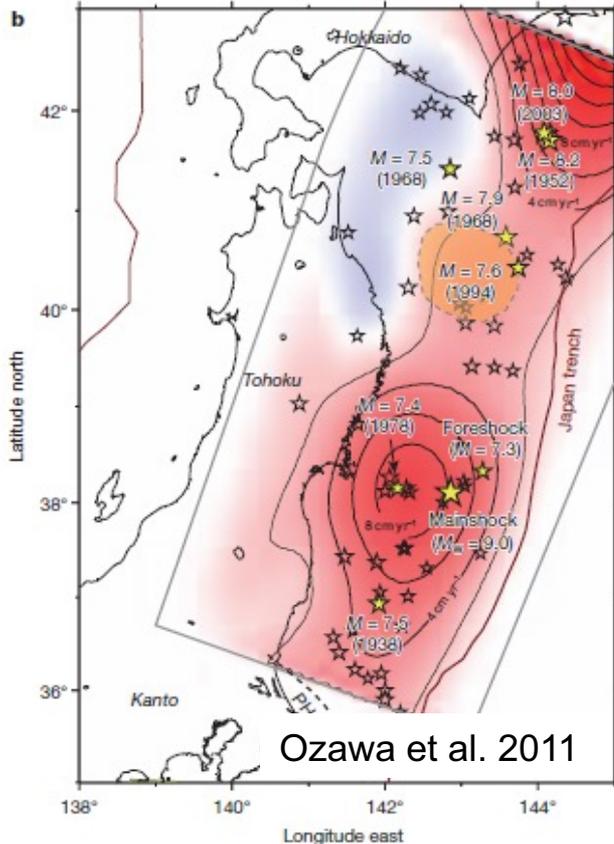
---

Амбициозная задача сегодняшнего дня – построение «цифровой модели» очаговой области, для расчетов деформационных процессов в окрестности будущего разрыва и адекватно описывающей процессы подготовки и инициирования различных мод скольжения в очаге.

- **Заключительная стадия подготовки разрыва**
- **Инициирование разрыва**
- **Распространение разрыва**
- **Постсейсмический слип**

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

(i) зона подготовки и (ii) зона локализации деформаций.

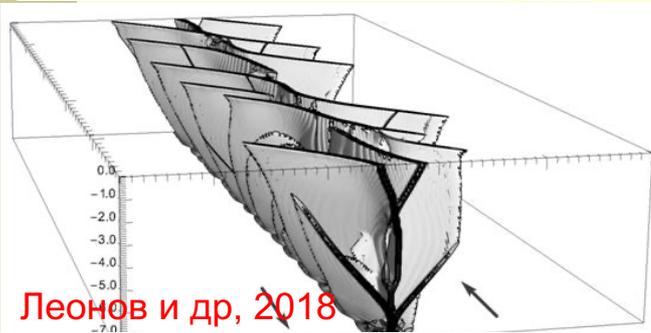
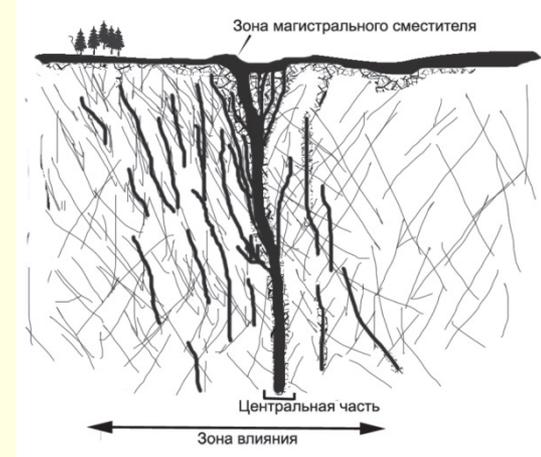
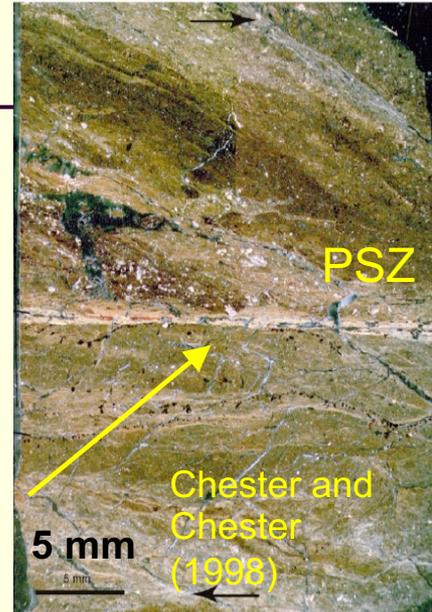


Зона подготовки землетрясения - процессы детерминированные эволюцией соответствующего участка коры

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

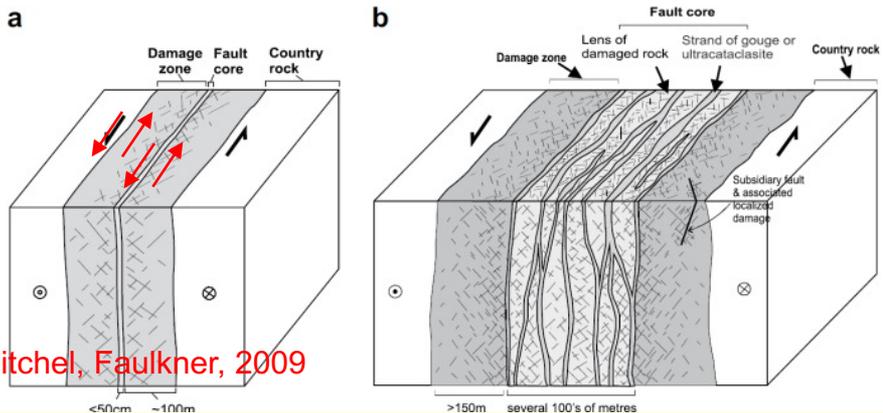
# (i) Сведения о структуре сейсмогенных разломных зон:

- локализация скольжения в узких зонах



Леонов и др, 2018

T.M. Mitchell, D.R. Faulkner / Journal of Structural Geology 31 (2009) 802–816



Mitchell, Faulkner, 2009

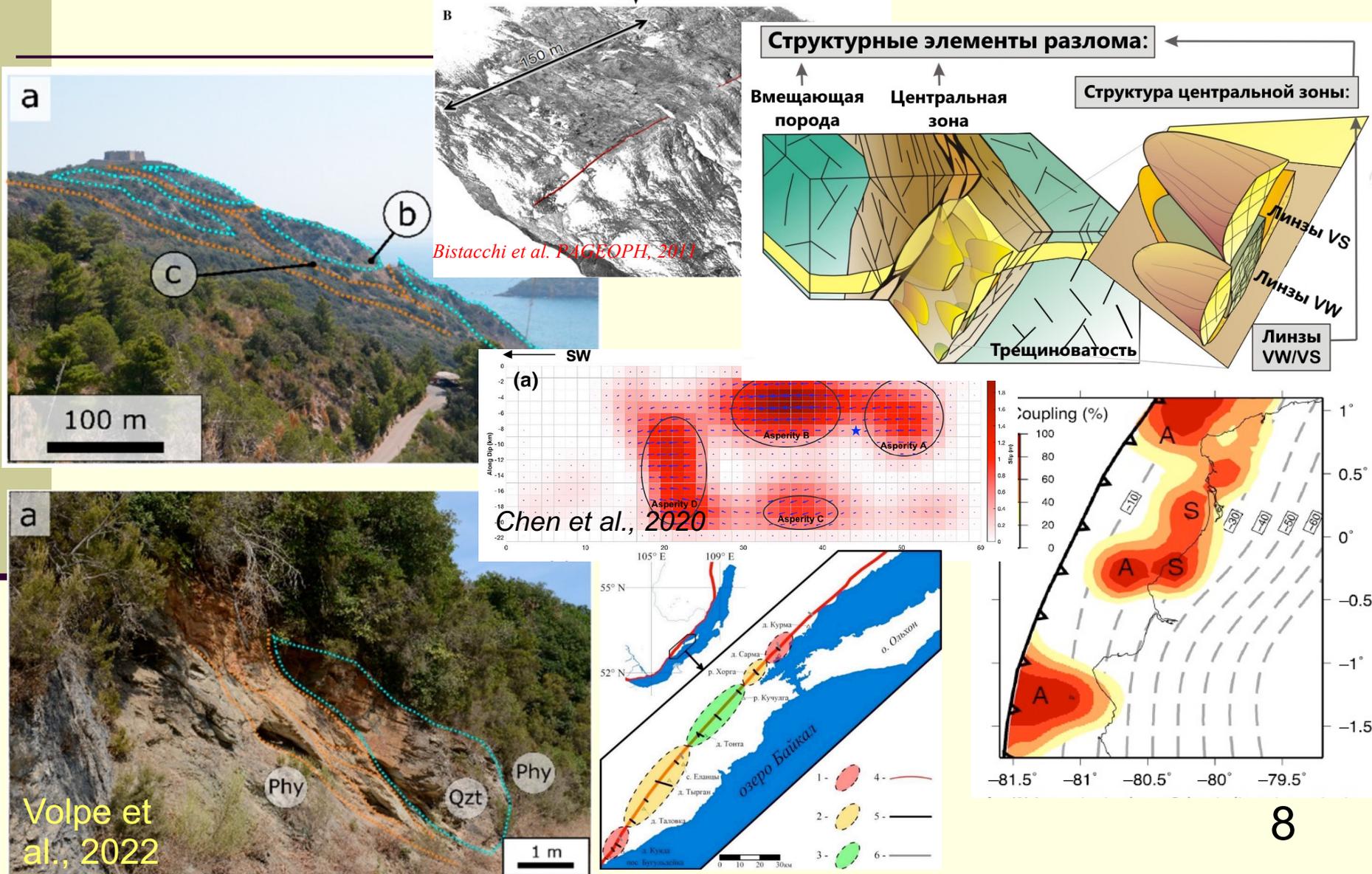


Кочарян, 2016

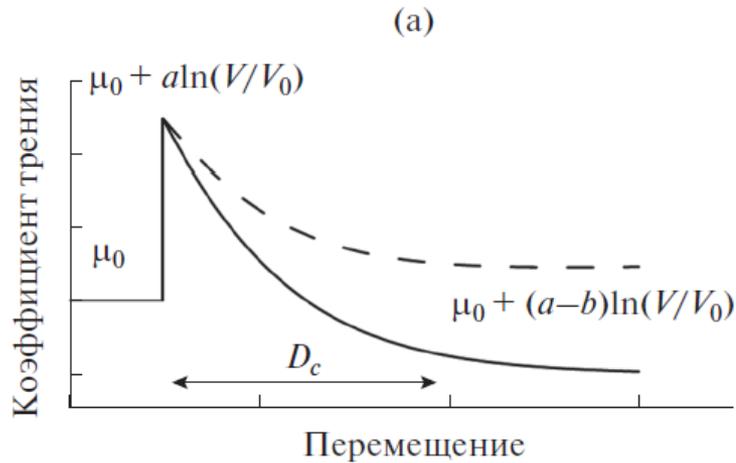
Скольжение может локализоваться в более узких основных зонах скольжения внутри gouge. Скольжение может также локализоваться на границах ядра разлома, примыкающего к зоне трещин.

# (i) Сведения о структуре сейсмогенных разломных зон:

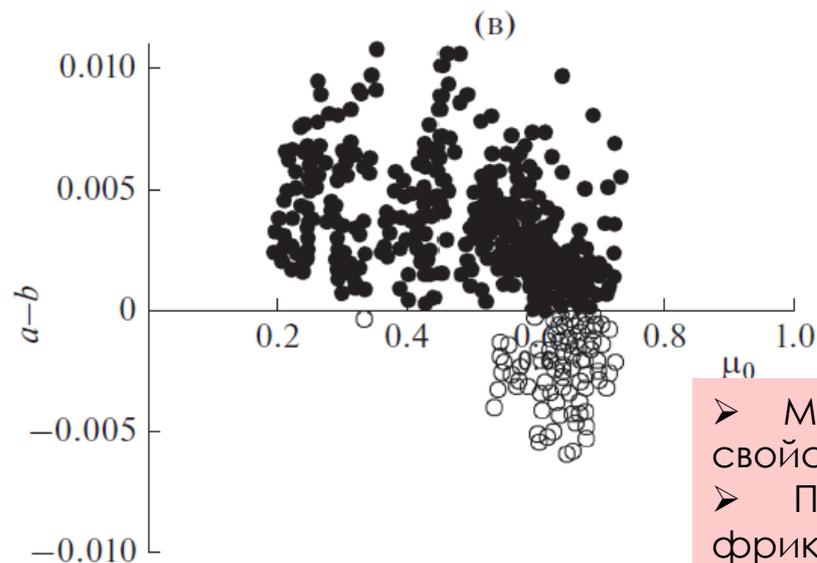
- неоднородность интерфейса - наличие участков с разной геометрией и разными свойствами – asperities.



Характер скольжения (тип реализации накопленной упругой энергии) определяется гетерогенностью интерфейса - наличием контактных пятен и их взаимным расположением, **фрикционными свойствами**, Р-Т условиями.



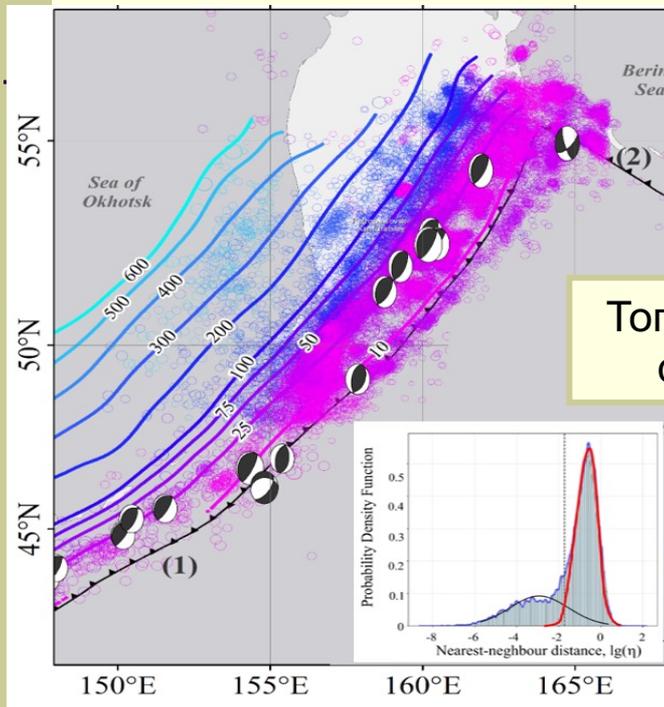
**а** - Изменение коэффициента трения в результате резкого изменения скорости скольжения в рамках R&S модели. Сплошная линия  $a < b$  – скоростное разупрочнение (**VW трение**); пунктир -  $a > b$  – скоростное упрочнение (**VS трение**).



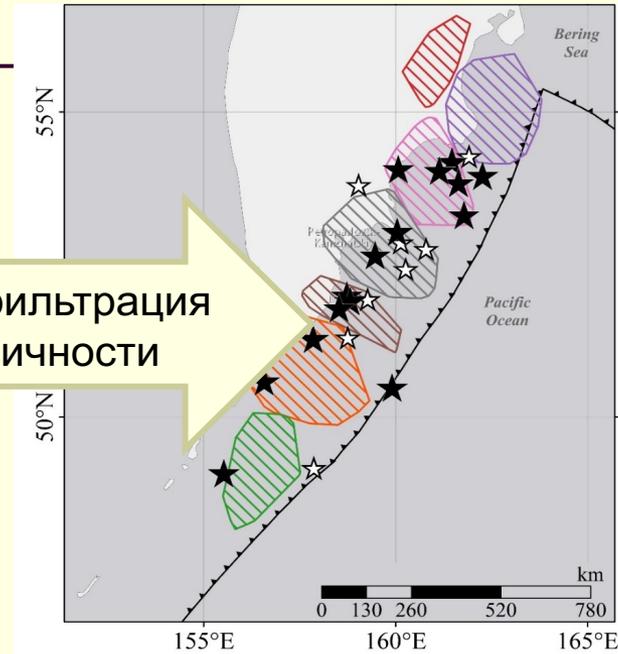
**в** - Фрикционный параметр в зависимости от коэффициента трения для различных материалов. (по данным [Ikari et al., 2013]). Светлые значки – режим скоростного разупрочнения.

- Материалы с низкими  $\mu$  при любых условиях проявляют свойства скоростного упрочнения ( $a-b > 0$ ).
- Природных материалов, демонстрирующих только фрикционное разупрочнение с ростом скорости скольжения, не обнаружено.

# (i) Сведения о структуре сейсмогенных разломных зон Источники данных – кластеризация сейсмичности



Топологическая фильтрация  
фоновой сейсмичности

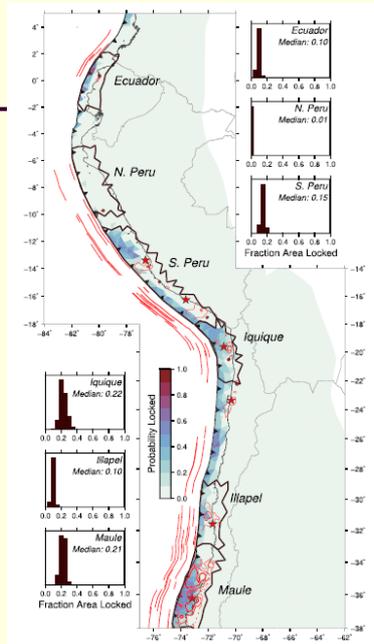


Карта сейсмичности по данным  
КФ ЕГС РАН за период с 01.1990  
по 08.2025

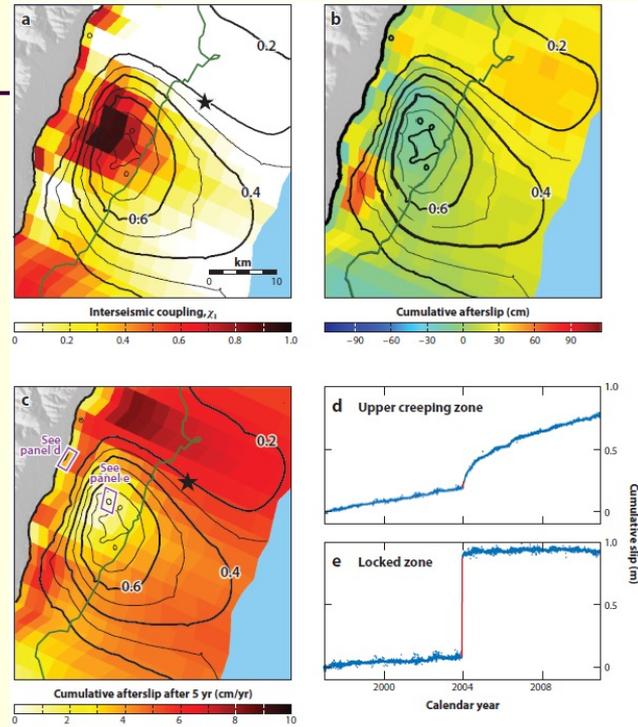
Эпицентры 13 из 16 землетрясений  
M7+ до 1990г и 7 из 8 после 1990г  
локализованы в пределах  
сейсмогенных пятен.

- 1) декластеризация каталога (метод ближайшего соседа Zaliapin et al., 2008)
- 2) выявить области повышенной концентрации фоновой сейсмичности, которые проявляют контактные пятна с фрактальной структурой – проводится топологическая фильтрация, при этом выбирается такая конфигурация, для которой количество групп и количество событий в этих группах максимально

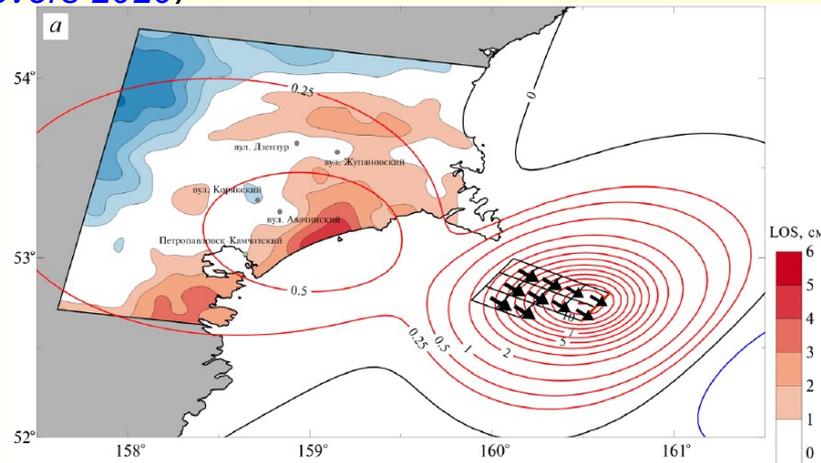
# (i) Сведения о структуре сейсмогенных разломных зон Источники данных – спутниковая геодезия и интерферометрия



«Запертые участки» в районе меганадвигов, Южная Америка, (Herman, Govers 2020)

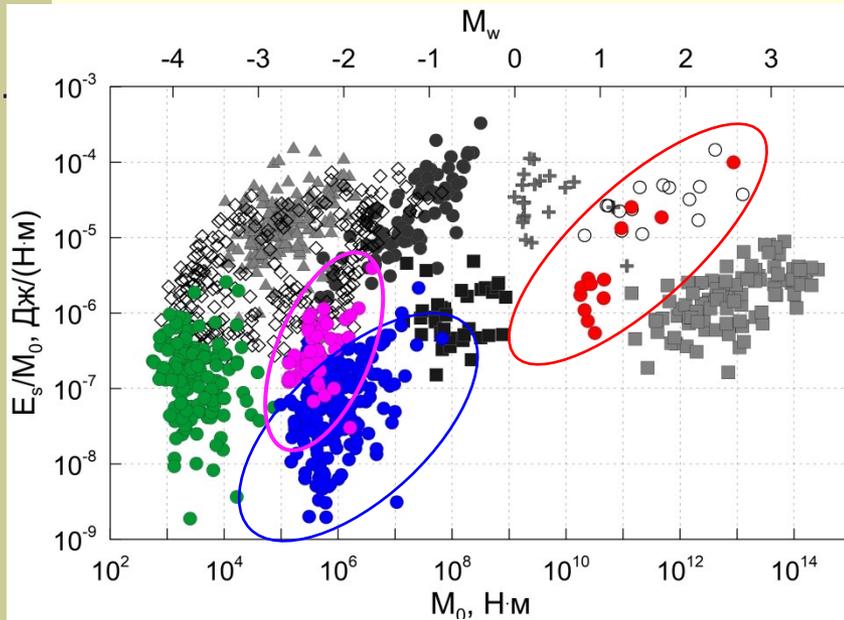


Распределение косейсмических и постсейсмических подвижек в районе EQ 2003 Mw 6.8 Chengkung (Avouac, 2015)



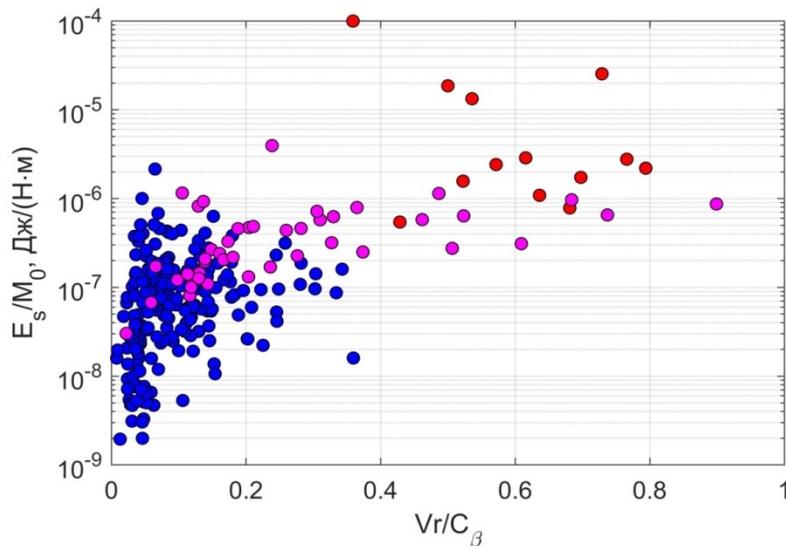
Модель поверхности разрыва, и поля смещений на земной поверхности в окрестности Шипунского EQ 2024, Mw6.9. (Конвисар и др. 2025)

# (i) Сведения о структуре сейсмогенных разломных зон Источники данных – Микросейсмический мониторинг



Зависимость приведенной сейсмической энергии от сейсмического момента:  
1-8 – мировые данные шахтной сейсмичности  
9 – URL, Канада [Collins, Young, 2000];  
10 – КМА (после взрывов вблизи разлома),  
11 – КМА (после взрыва на удалении от разлома)  
12 – месторождение Хибинского массива

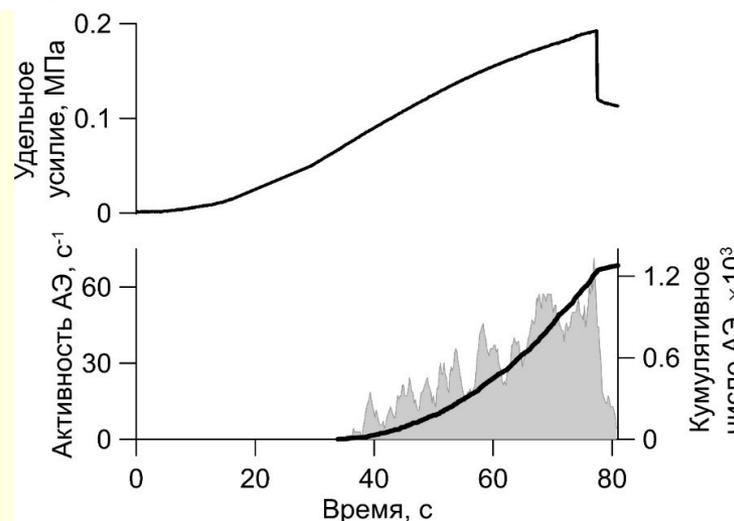
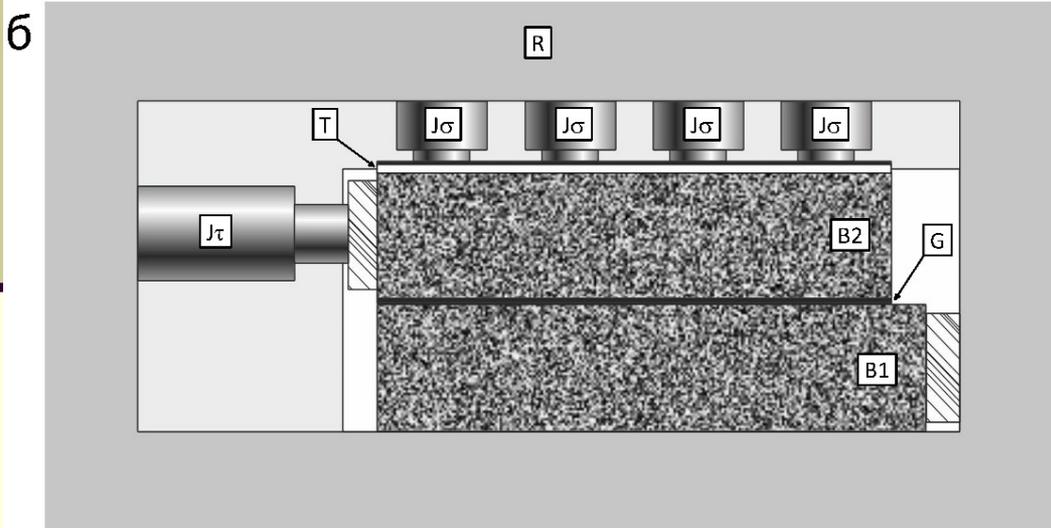
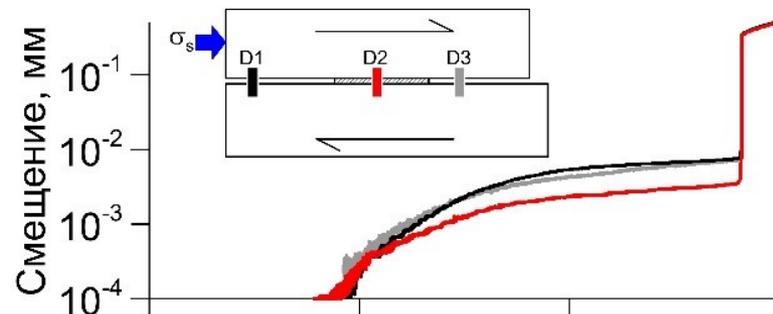
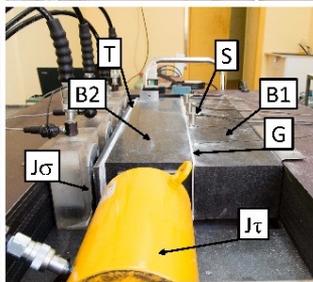
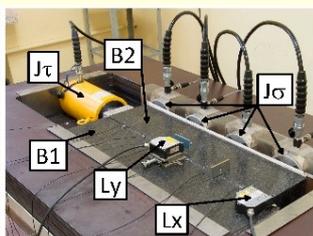
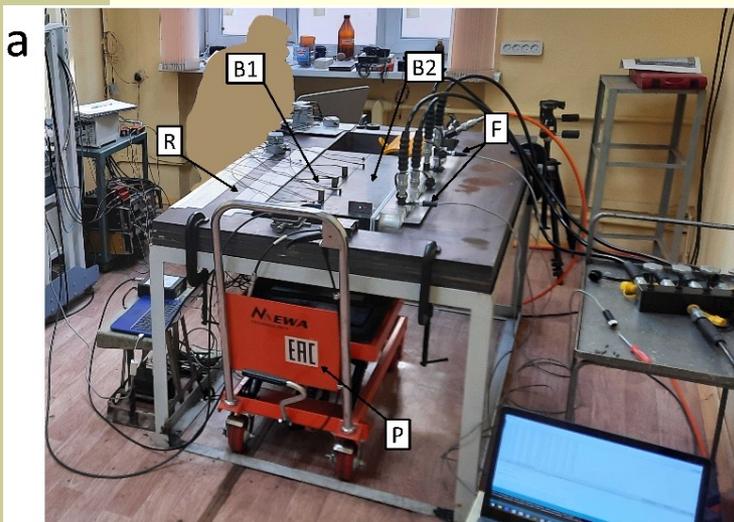
- 10
- 11
- 12



Соотношение между параметром  $E_s/M_0$  и скоростью распространения разрыва;

Количественные соотношения между долей медленных и быстрых событий, которые будут свидетельствовать о потенциальной «опасности», еще предстоит разработать.

# ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ



Конфигурация асперити

$dM_{lab}/dt$

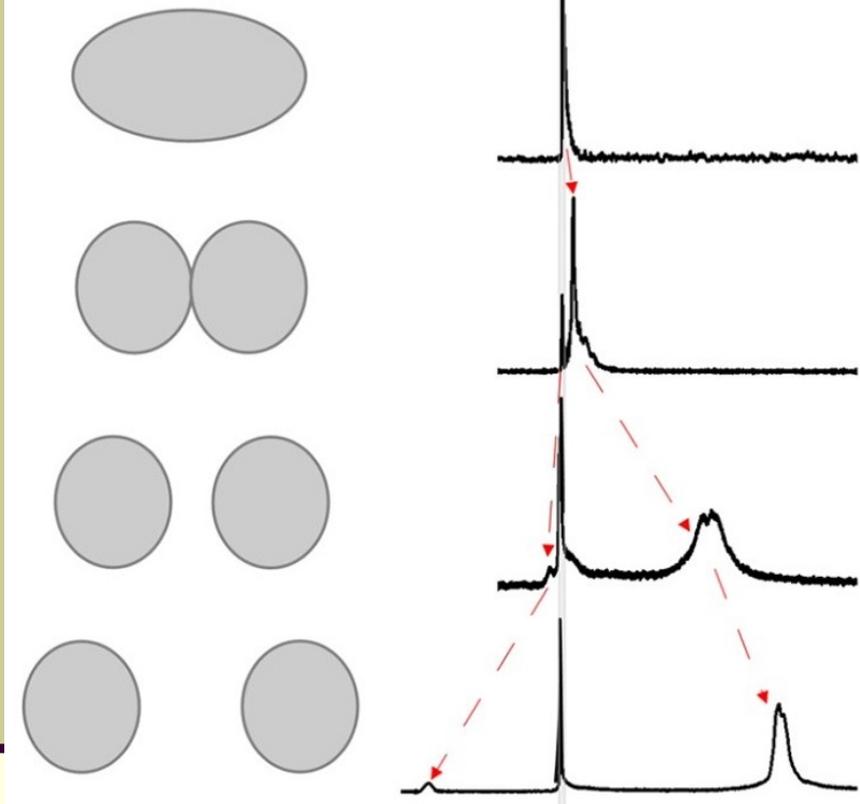
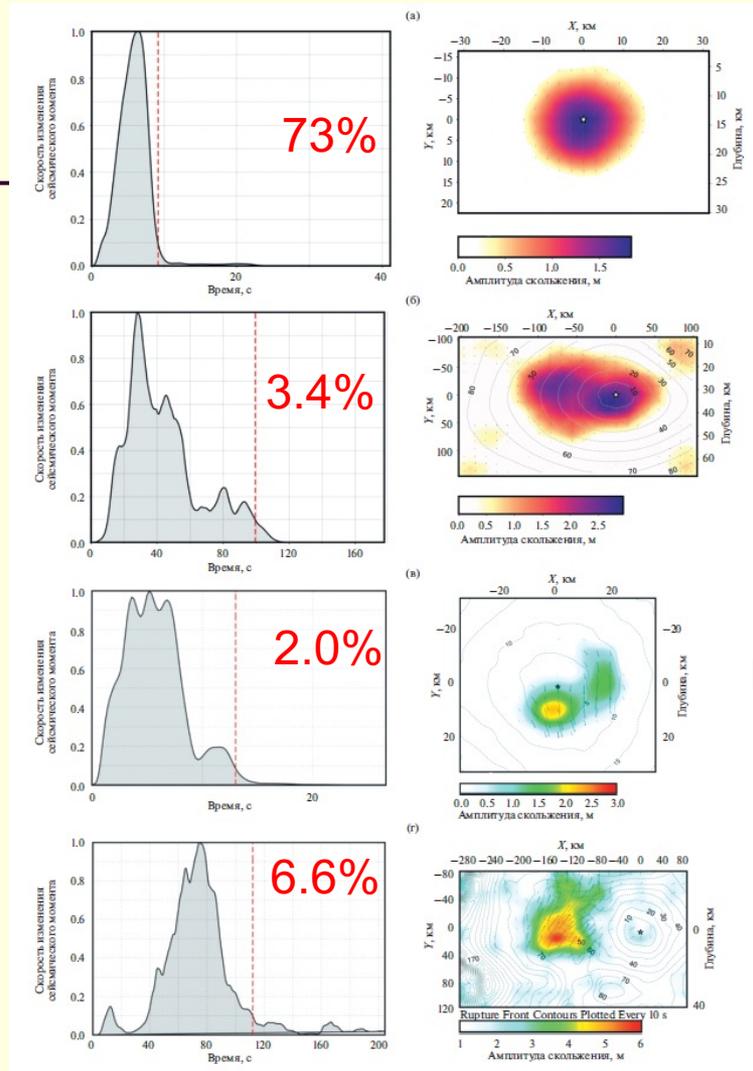


Схема эволюции диаграммы скорости изменения сейсмического момента  $dM_{lab}/dt(t)$  для разных конфигураций пятен.



Mw 7,0

Mw 8.3

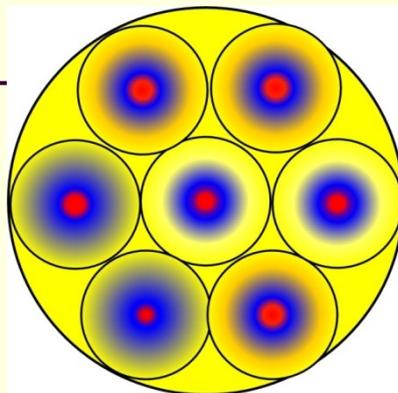
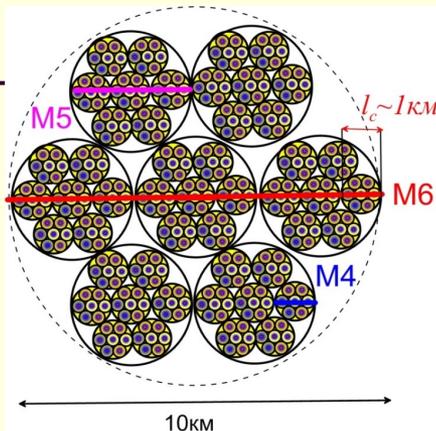
Mw 7.2

Mw 8.4

15% - 3 и более пятен

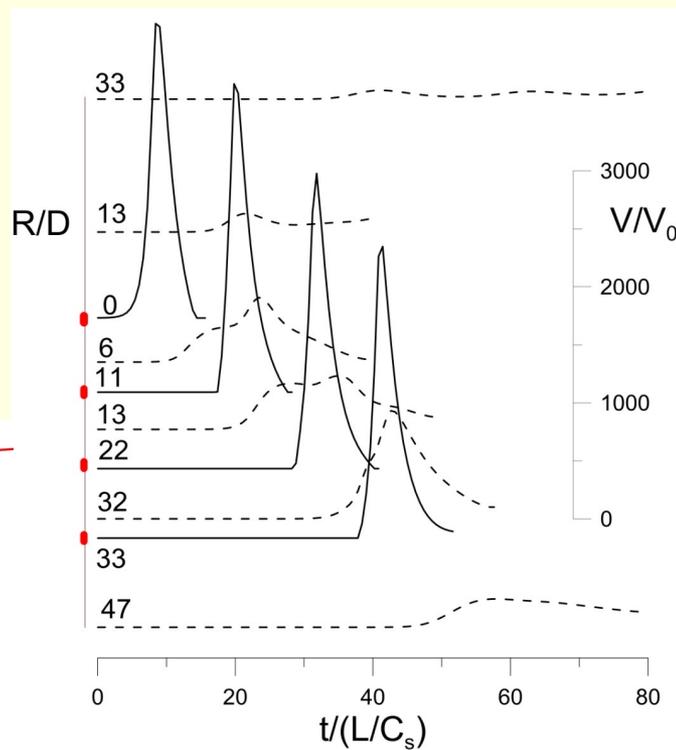
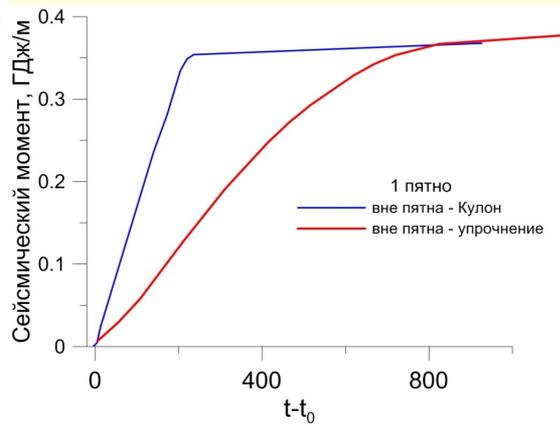
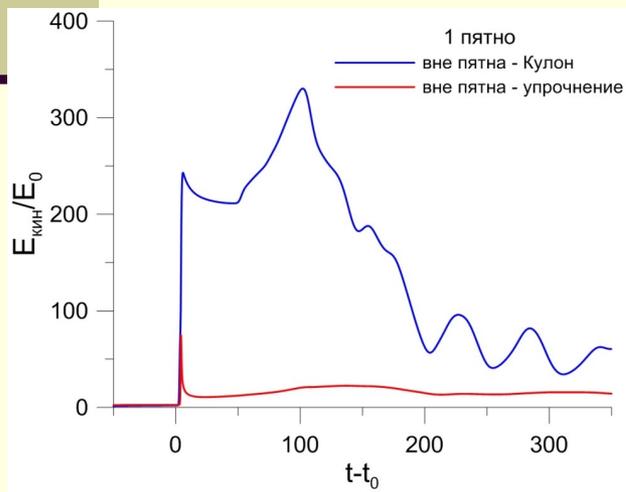
Примеры приведенной скорости изменения момента и пространственного расположения зон локализации скольжения .

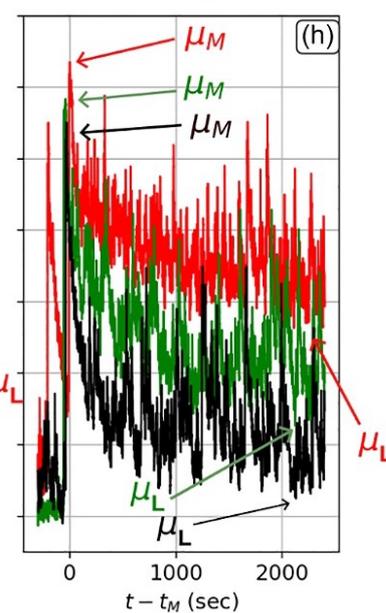
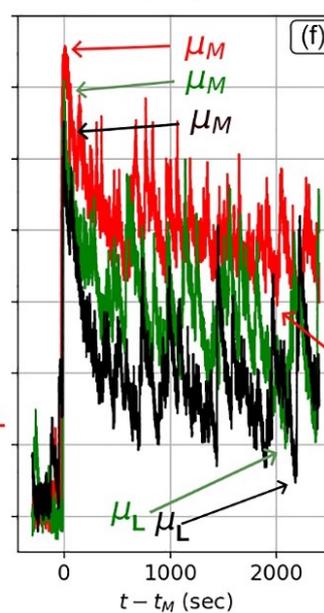
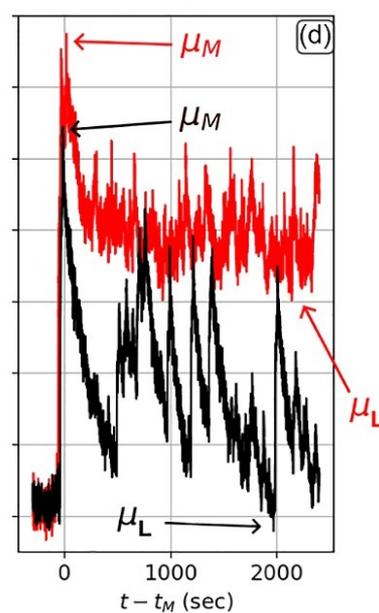
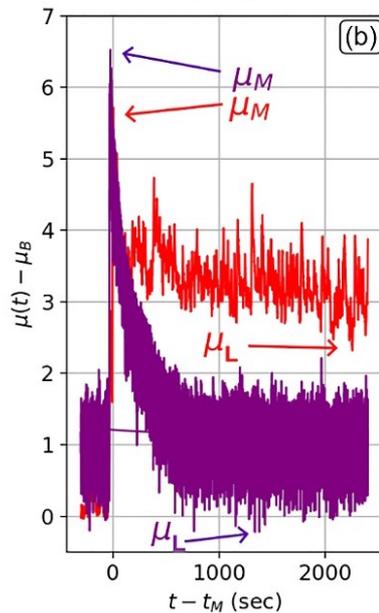
# Простейшая модель шероховатого контакта (численный расчет)



область действительного контакта (концентрации напряжений) окружена областью разгрузки

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





Kos 6.6  
2017/07/20

Kissamos 6.0  
2019/11/27

Tohoku 7.3  
2011/03/09

Tohoku 9.1  
2011/03/11

Iquique 6.7  
2014/03/16

Iquique 6.2  
2014/03/23

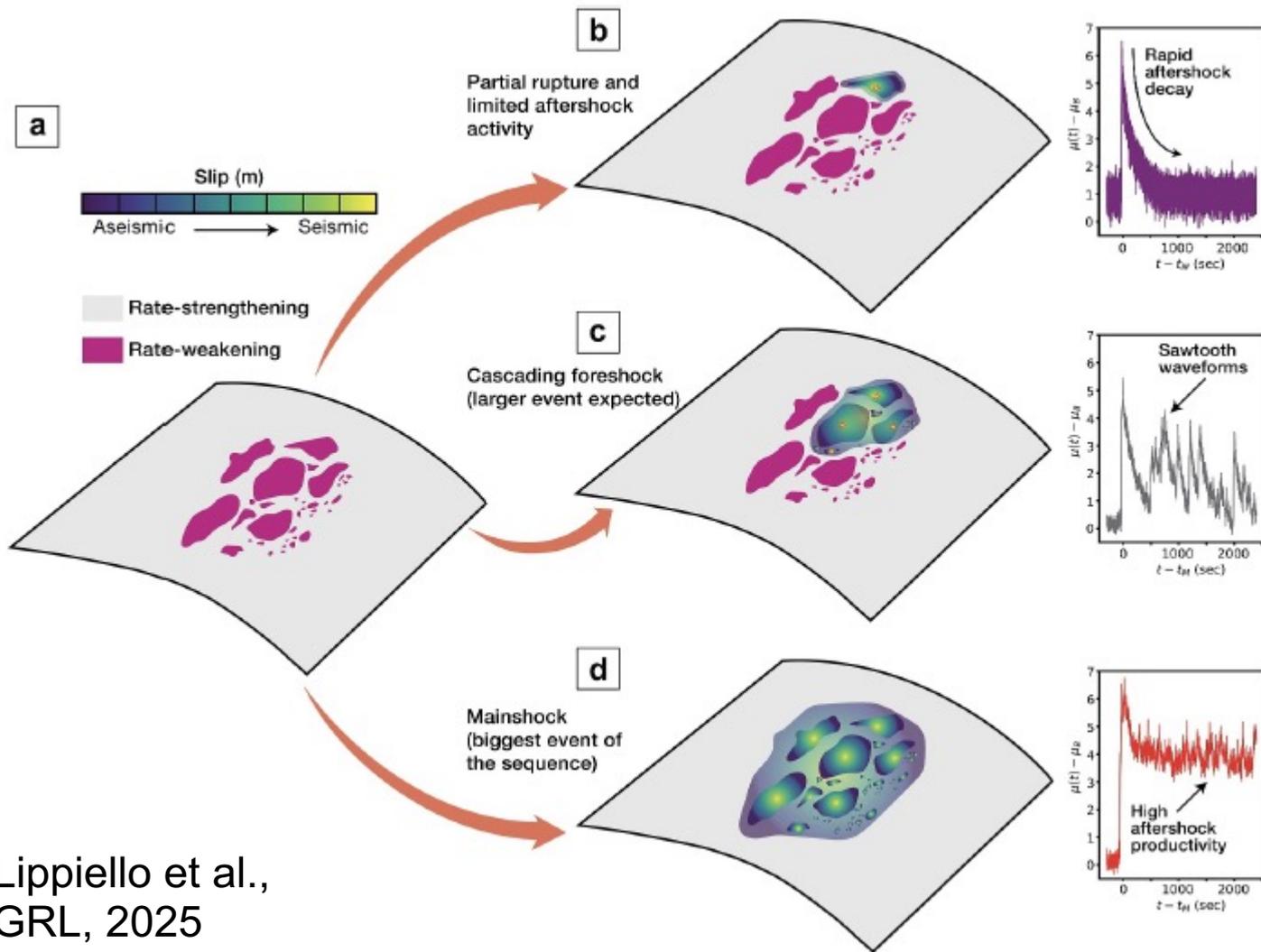
Iquique 8.1  
2014/04/01

Ridgecrest 6.4  
2019/07/04

Ridgecrest 7.0  
2019/07/06

Огибающая скорости смещения грунта, зарегистрированная после нескольких форшоков с магнитудой 6+ , демонстрирует аномальный пилообразный профиль, отличный от типичных сигналов после главных толчков.

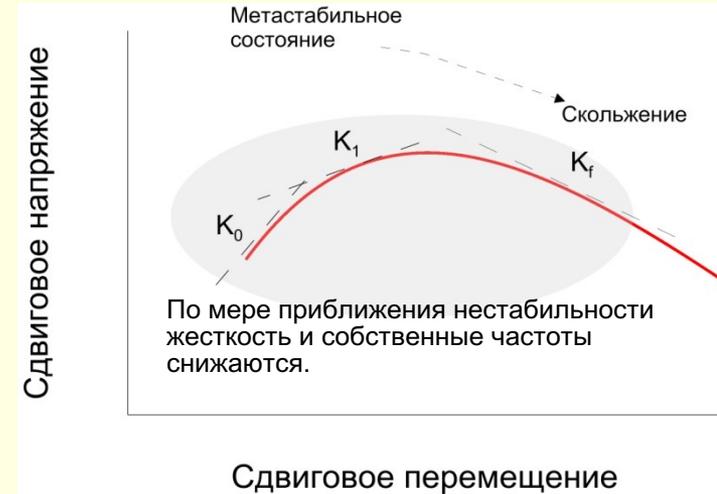
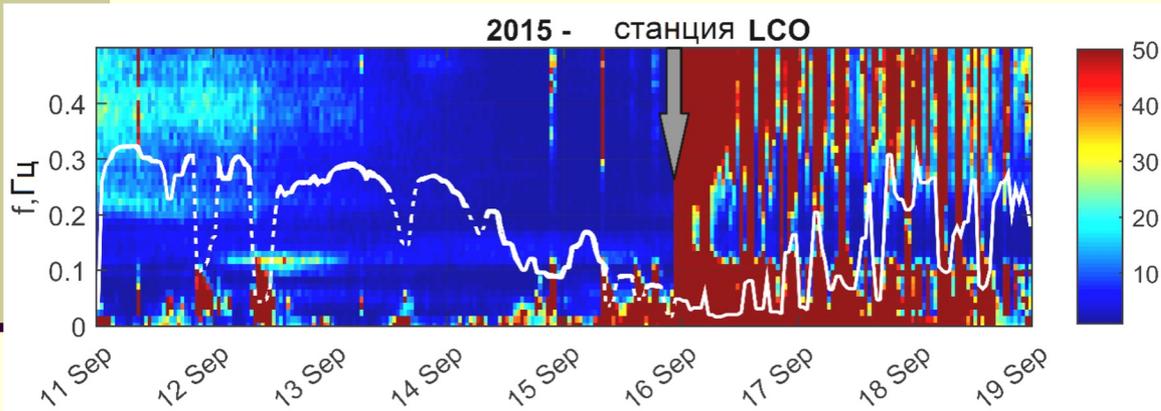
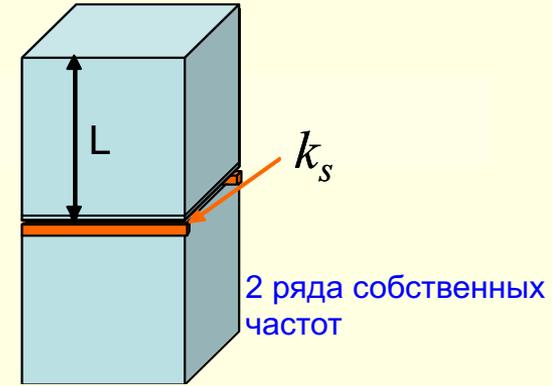
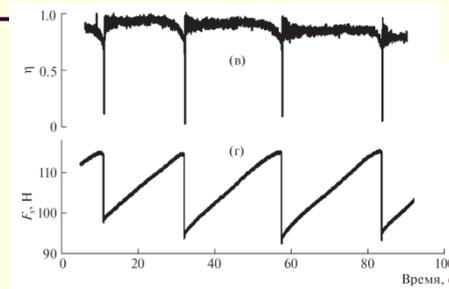
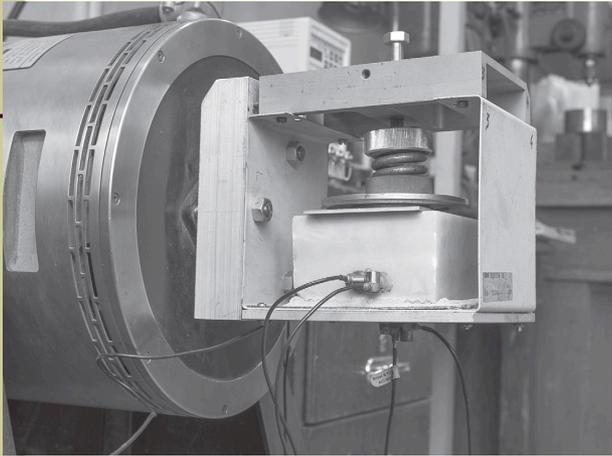
Lippiello et al.,  
GRL, 2025



Lippiello et al.,  
GRL, 2025

Из 68 EQ M6+ , - 10 из 11 форшоков, предшествующих более крупному событию, демонстрируют аномальную форму огибающей, в то время как только 4 из 57 других событий демонстрируют аналогичное поведение.

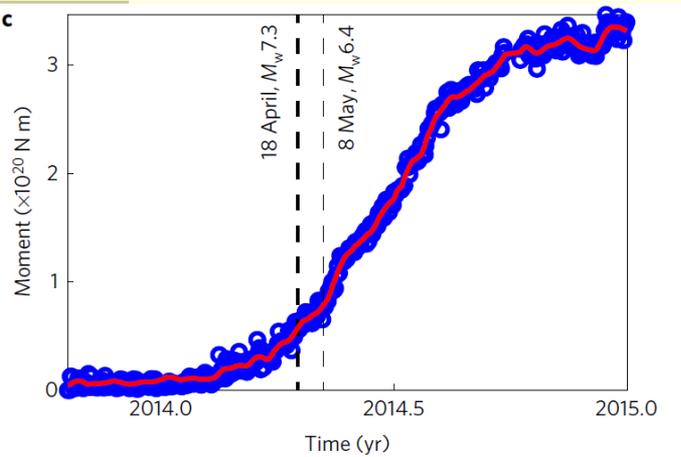
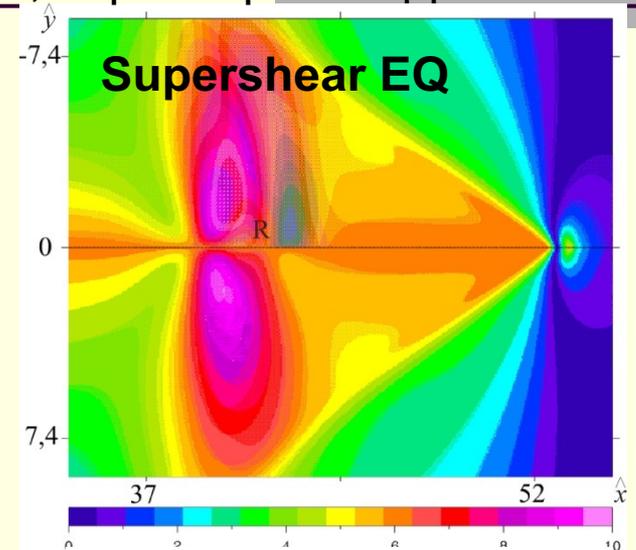
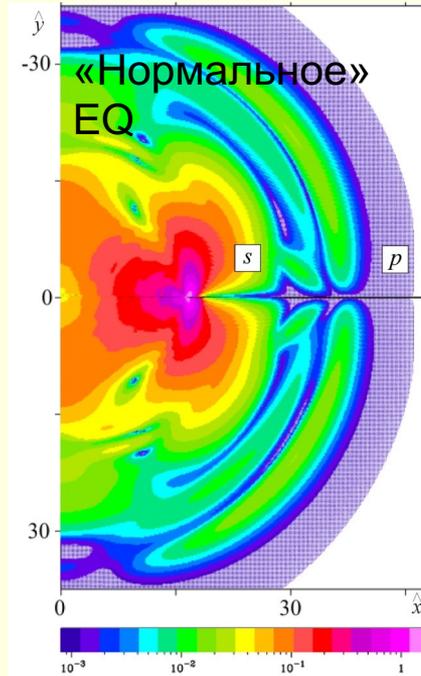
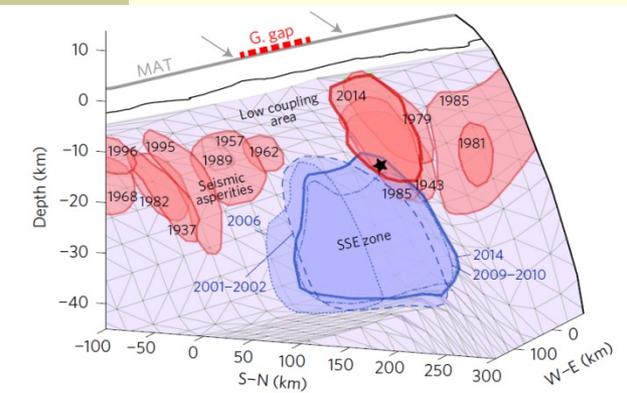
Заключительная стадия подготовки скользящего – снижение жесткости разлома  
(Контроль спектрального состава сейсмического фона в низкочастотной области).



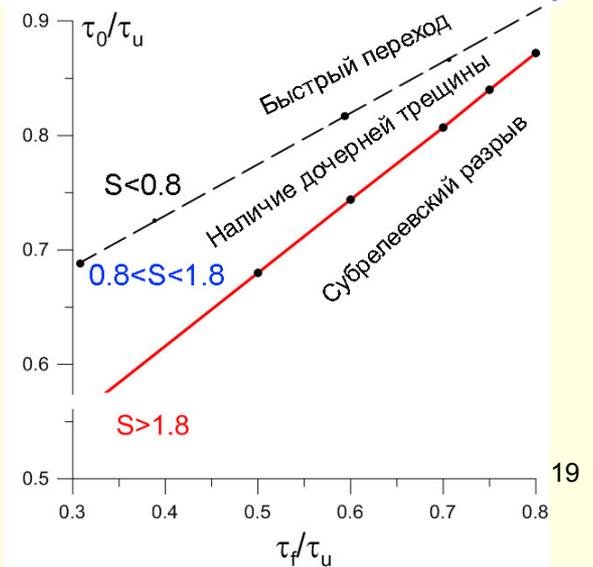
Нормированная спектрограмма сейсмического сигнала, зарегистрированного на станции LCO перед Чилийским землетрясением Mw8.3, 16.09.2015г. Белой линией представлен спектральный центроид, рассчитанный в частотной области 0.01 – 0.5 Гц. (Беседина и др., 2019)

# Распространение разрыва, режимы скольжения

После старта разрыв либо затухает, либо распространяется вдоль поверхности скольжения, что определяется размером участка инициирования, взаиморасположением asperities, законами трения, параметрами НДС.

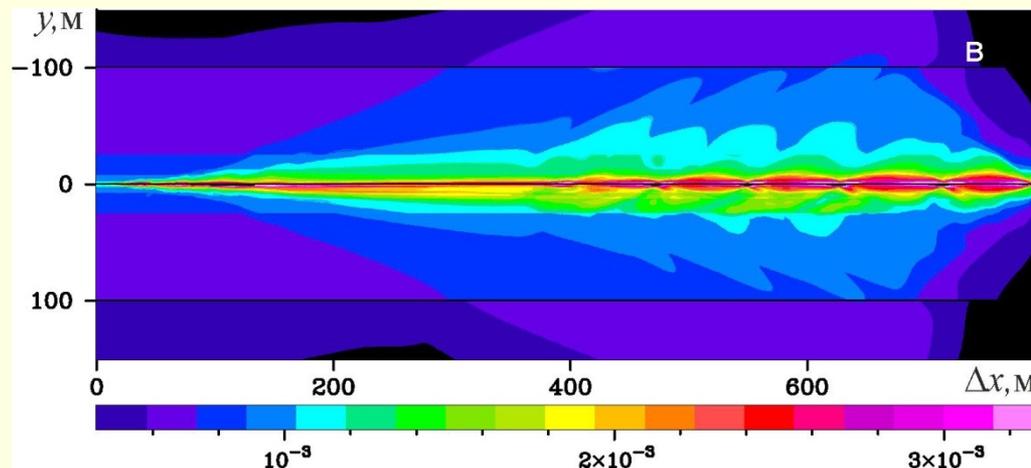
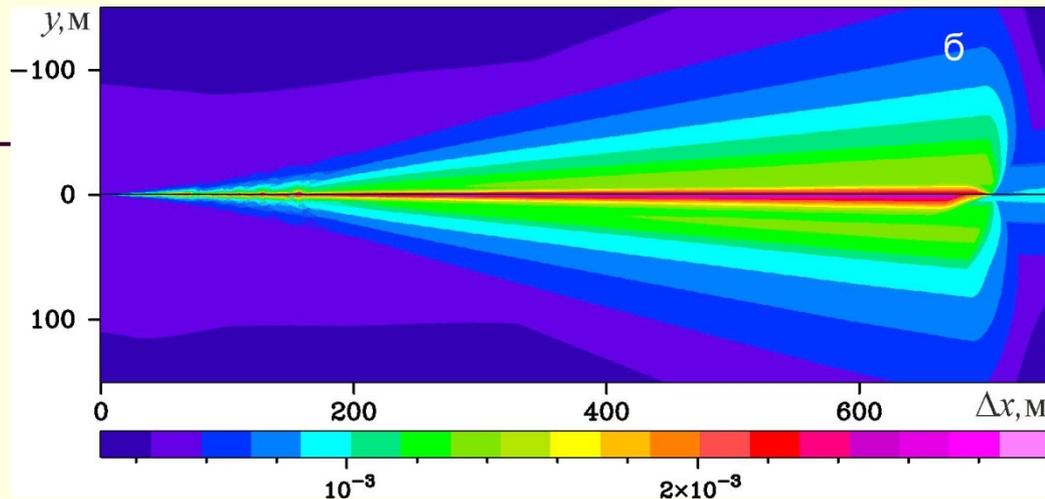


Slow Slip Event





# Развитие нарушенной зоны



пространственное распределение максимальной достигнутой величины интенсивности сдвига в момент времени 235 мс для распространения разрыва по границе однородных блоков (б) и при наличии ослабленной зоны (в)

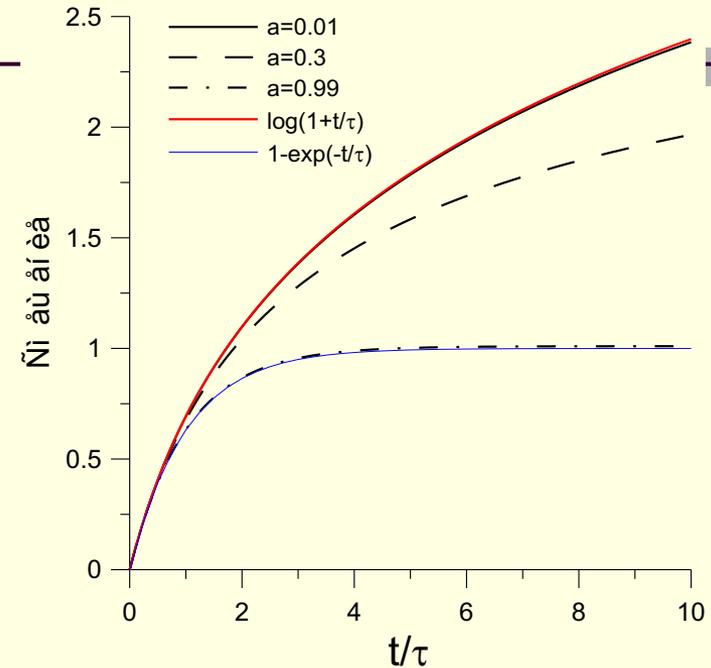
# Постсейсмический слип

При  $a \rightarrow 1$  (14)  $\rightarrow$  к (6)  
 При  $a \rightarrow 0$  (14)  $\rightarrow$  к (10)

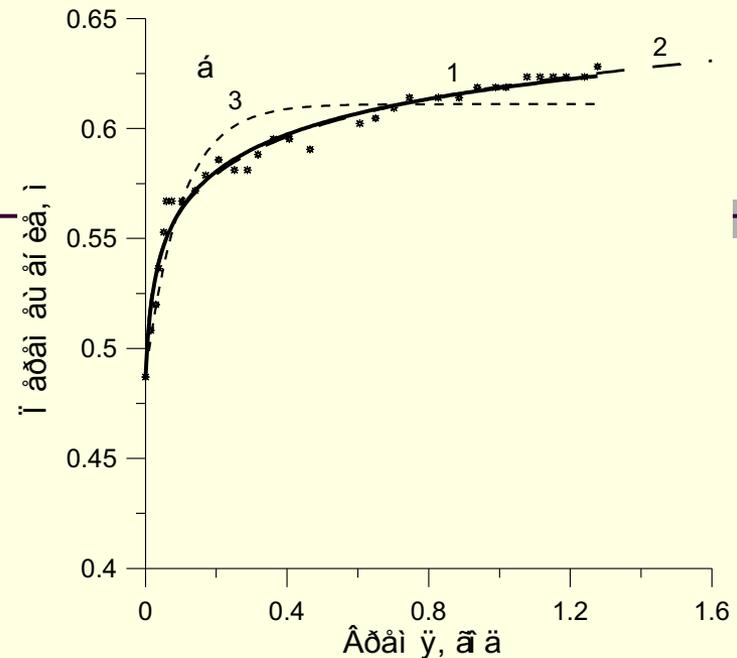
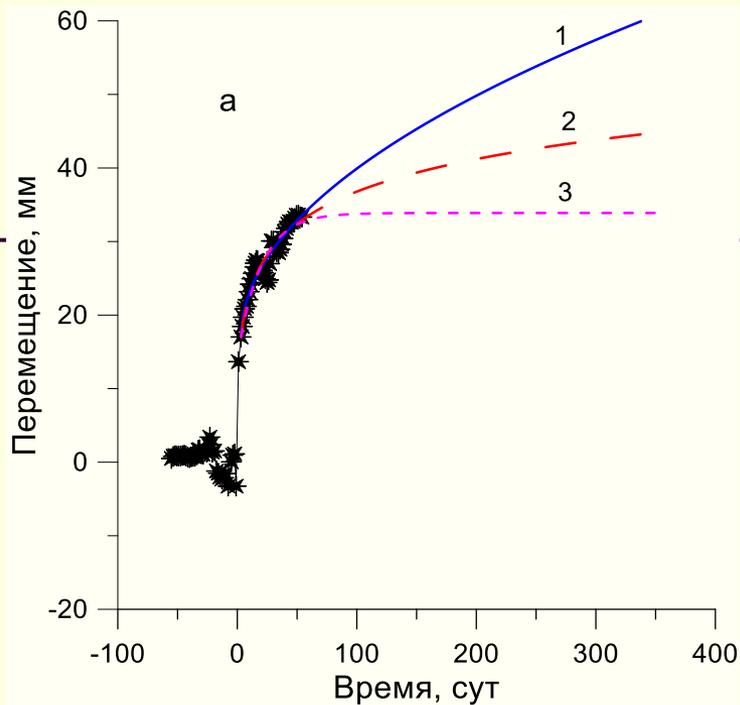
$$W(t) = V_0 \tau \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (6)$$

$$W(t) = \int_0^t \frac{V_0}{1 + \frac{t}{\tau}} dt = V_0 \tau \cdot \ln\left(1 + \frac{t}{\tau}\right) \quad (10)$$

$$W(t) = \frac{\tau V_0}{a} \left\{ 1 - \left[ 1 + (1-a) \frac{t}{\tau} \right]^{\frac{a}{a-1}} \right\} \quad (14)$$



Если при малых временах ( $\tau/t < 1$ ) все возможные типы реологических зависимостей практически идентичны, то с увеличением времени наблюдения их асимптотика радикально различается. Имея достаточно длинный ряд измерений параметров межблоковых перемещений, можно судить о реологии процесса скольжения.



Результаты аппроксимации экспериментальных данных различными функциями.

а – Кронотское землетрясение 5.12.97, станция ESSO

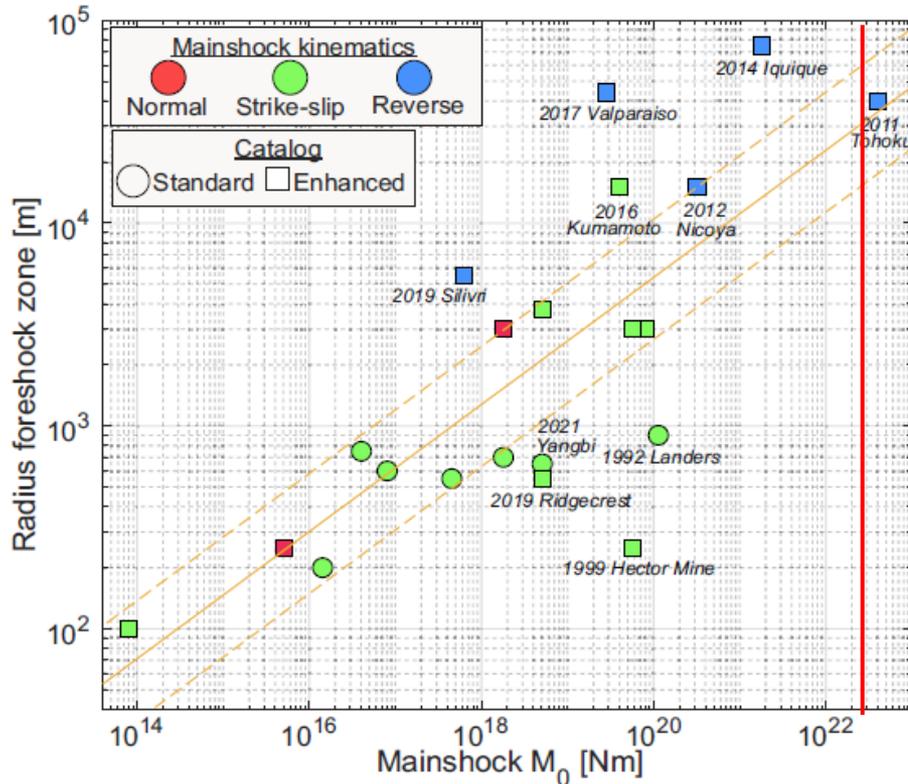
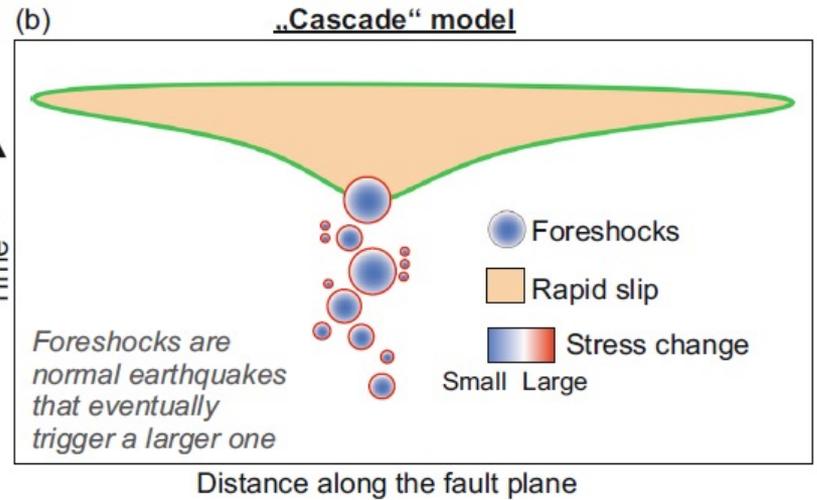
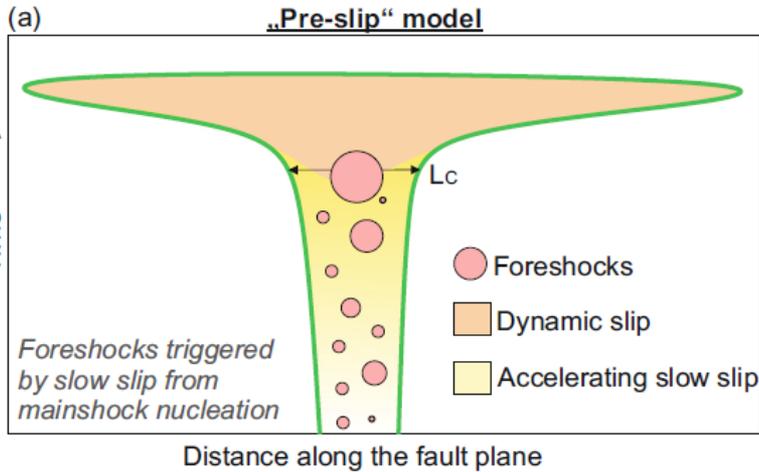
1 – функция (14)  $a=-1,03$ , коэффициент корреляции  $R=0,92$ ; 2 – функция (10)  $R=0,9$ ; 3 – функция (6)  $R=0,87$

б – землетрясение 23.06.01 в Перу, станция AREQ

1 – функция (14)  $a=0,08$ ,  $R=0,97$ ; 2 – функция (10)  $R=0,96$ ; 3 – функция (6)  $R=0,84$

Для проявления значимых различий на Камчатке необходимо иметь измерения длительностью  $\sim 200$  дней. На аналогичных аппроксимациях для землетрясения в Перу, где измерения велись в течение длительного времени, различия в ходе зависимостей проявляются очень отчетливо.

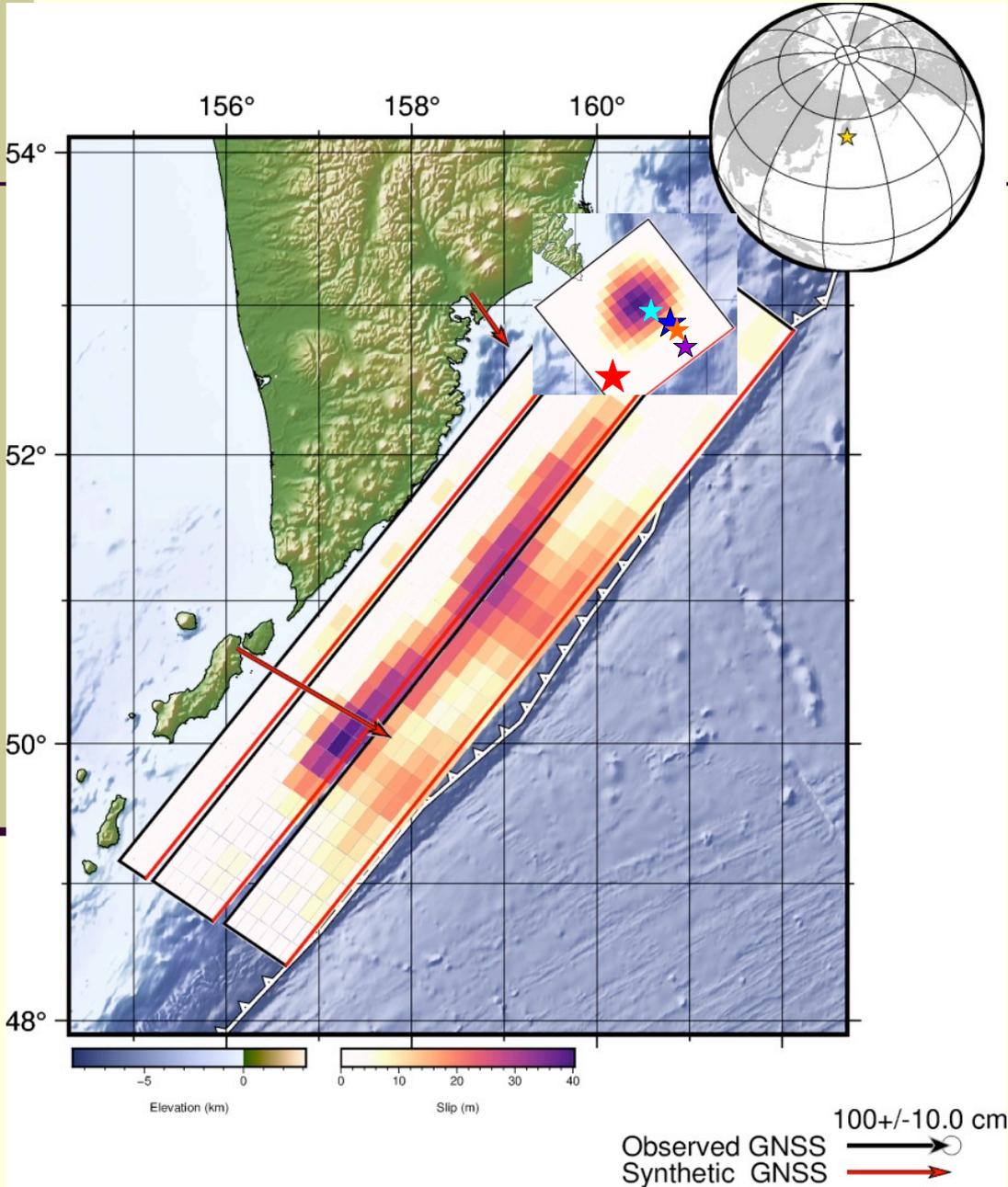
# Форшоки



Martínez-Garzón, 2024

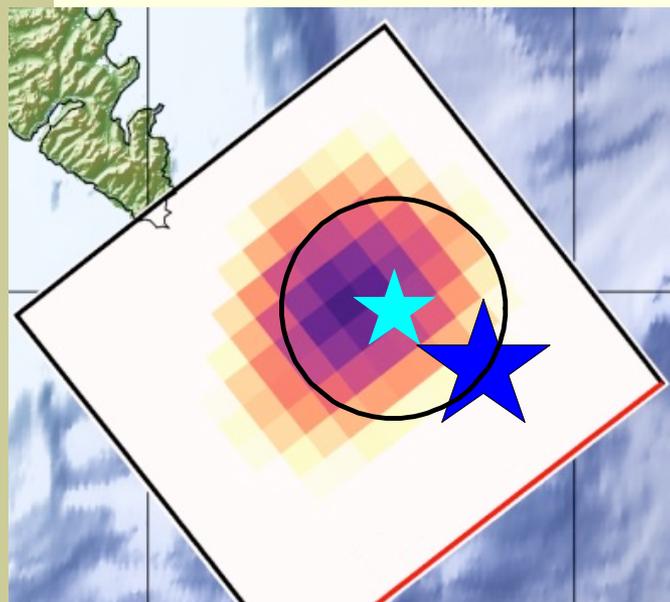
Радиус зоны форшоков от  $M_0$  главного толчка.

# Камчатка 2025



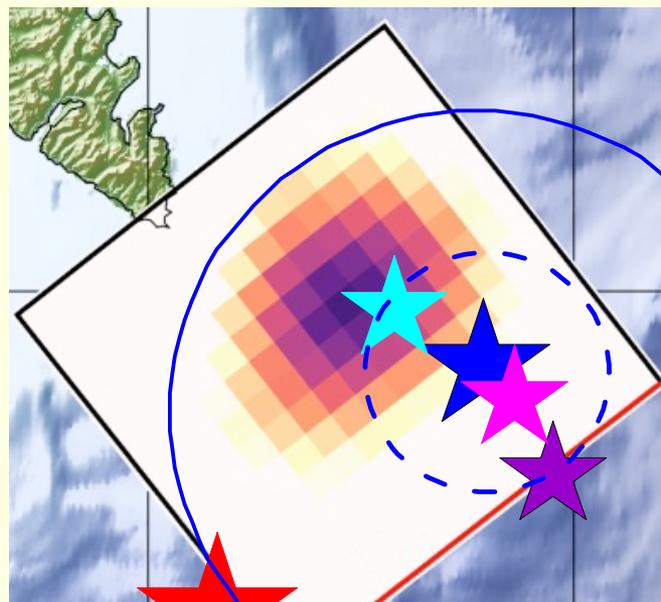
- ★ 1 Mw6.6 20.07.2025
- ★ 2 21мин Mw7.4
- ★ 3 39мин Mw6.6
- ★ 4 54мин Mw6.5
- 29.07.2025
- ★ 10 9д17ч Mw8.8

# Оценка вариаций статических и динамических напряжений от форшоков Камчатских событий



$\Delta\tau=0.09\text{MPa}$  - вариация Кулон  
 $\varepsilon=10^{-4}$ ;  $\Delta\sigma_d=3.5\text{MPa}$  - динамика

1-2 11,7км  
 2-3 17,8км 2-4 8.1км  
 2-10 48км



- ★ 1 Mw6.6
- ★ 2 21мин Mw7.4
- ★ 3 39мин Mw6.6
- ★ 4 54мин Mw6.5
- ★ 10 Mw8.8 9д17ч

Воздействие 2 на 4 и на 3

**Воздействие 2 на 10**  
 $\Delta\tau=0.07\text{MPa}$   $\varepsilon=10^{-4}$   
 $\Delta\sigma_{\text{dyn}}=3.1\text{MPa}$

$\Delta\tau$ 0,97 МПа	0,26 МПа
$\varepsilon$ $2,2 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-4}$
$\sigma$ 7,1МПа	5,3МПа

# Выводы

---



1. Налицо готовность научного сообщества к постановке и проведению согласованных исследований, направленных на построение комплексной, основанной на физических принципах, модели деформационных процессов в разломных зонах, происходящих на протяжении всего цикла их эволюции.
2. Явное включение всех пространственно-временных масштабов и соответствующих физических и химических процессов в единую модель едва ли возможно в обозримом будущем. Тем не менее, наблюдается тенденция перехода от исследования отдельных эффектов к изучению взаимодействий соответствующих процессов в нескольких пространственных и временных масштабах с целью определения потенциальных взаимосвязей различных явлений.
3. Есть надежда, что существует все же ограниченное количество ключевых факторов, которые должны быть включены в будущую комплексную модель.