Д.ф.-м.н., Ребецкий Ю.Л., reb@ifz.ru

Москва, ИФЗ РАН, лаб. *Тектонофизики*

Лаборатория тектонофизики
ИФЗ РАН

РАЗЛИЧНЫЕ МОДЕЛЬНЫЕ И ФЕМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НА ОЧАГ МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И РЕАЛЬНЫЕ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

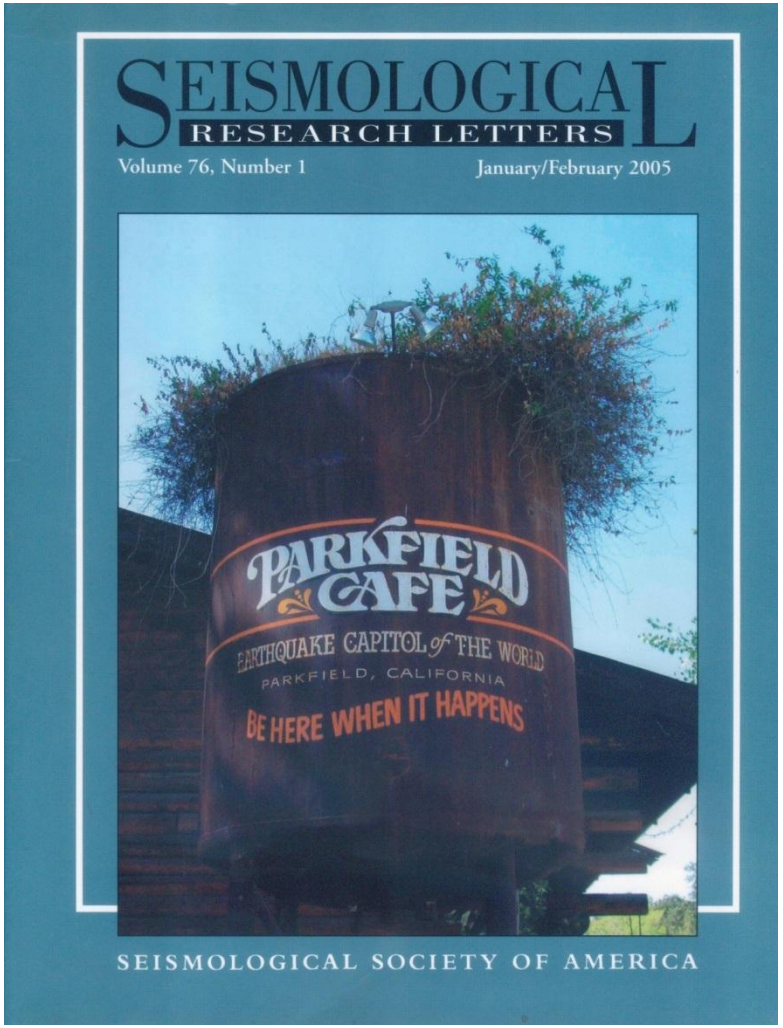
Geller RJ, Jackson DD, Kagan YY, Mulargia F (Earthquakes Cannot Be Predicted. Science. 1997)

Для того чтобы крупные землетрясения были предсказуемыми, они должны быть необычными событиями, происходящими из конкретных физических состояний.

Тем не менее, консенсус недавнего совещания [HN5] заключался в том, что Земля находится в состоянии самоорганизованной критичности [HN16], где любое небольшое землетрясение имеет некоторую вероятность каскадирования в большое событие.

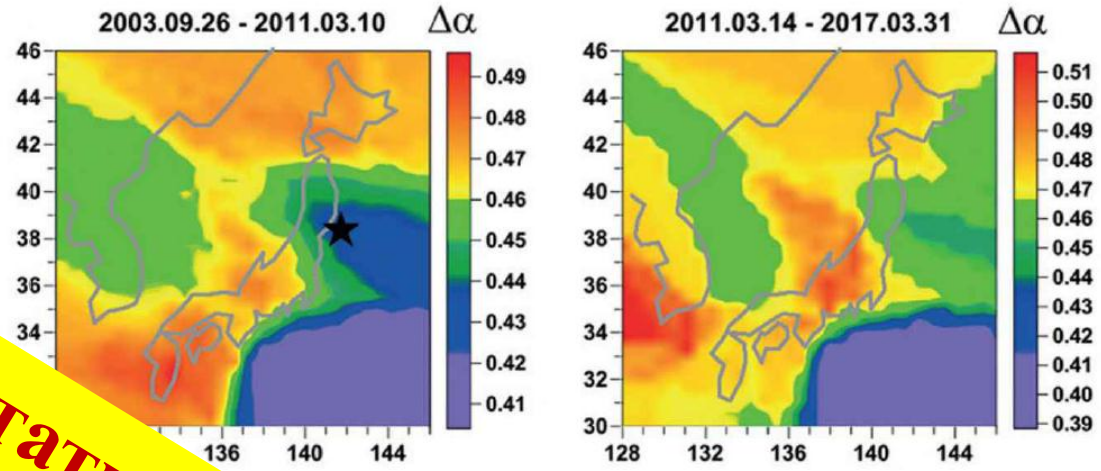
Картина предполагаемых предвестников, как правило, сильно варьируется от одного землетрясения к другому, и **предполагаемые аномалии часто наблюдаются только в одной точке, а не во всем эпицентральном регионе. …..**

Поэтому представляется неразумным вкладывать значительные средства в мониторинг возможных прекурсоров

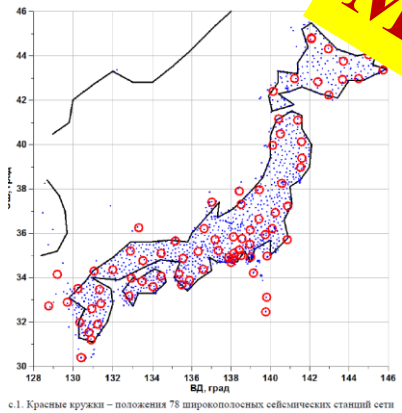


Дрожь Земли – пример удачного прогноза

А.А.Любушин. Циклические свойства сейсмического шума в проблеме прогноза сильнейших землетрясений на японских островах.



широкополосные сейсмо… (78)
и GPS (1341) станц…

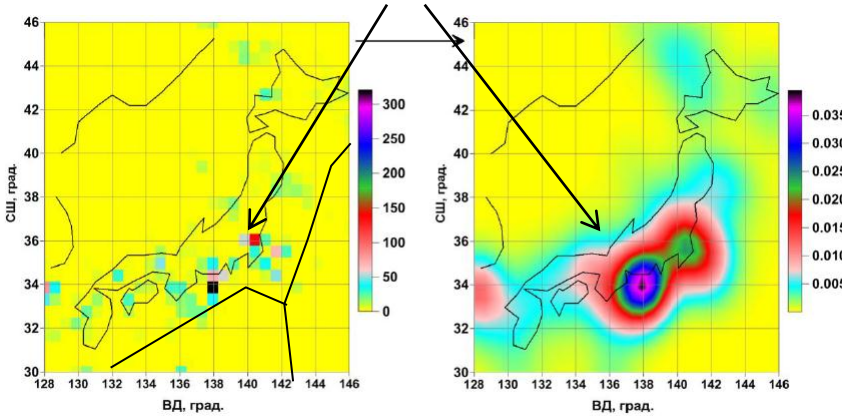


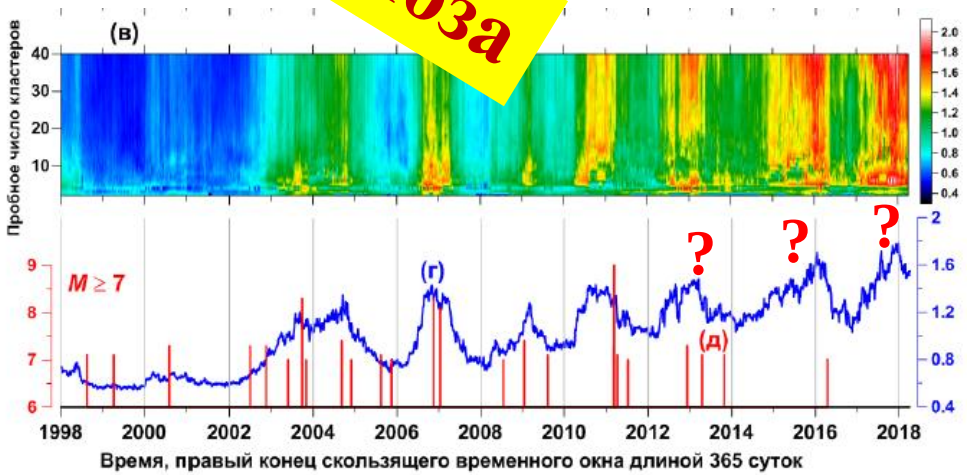
с.1. Красные кружки – положения 78 широкополосных сейсмических станций сети

Малая статистика прогноза

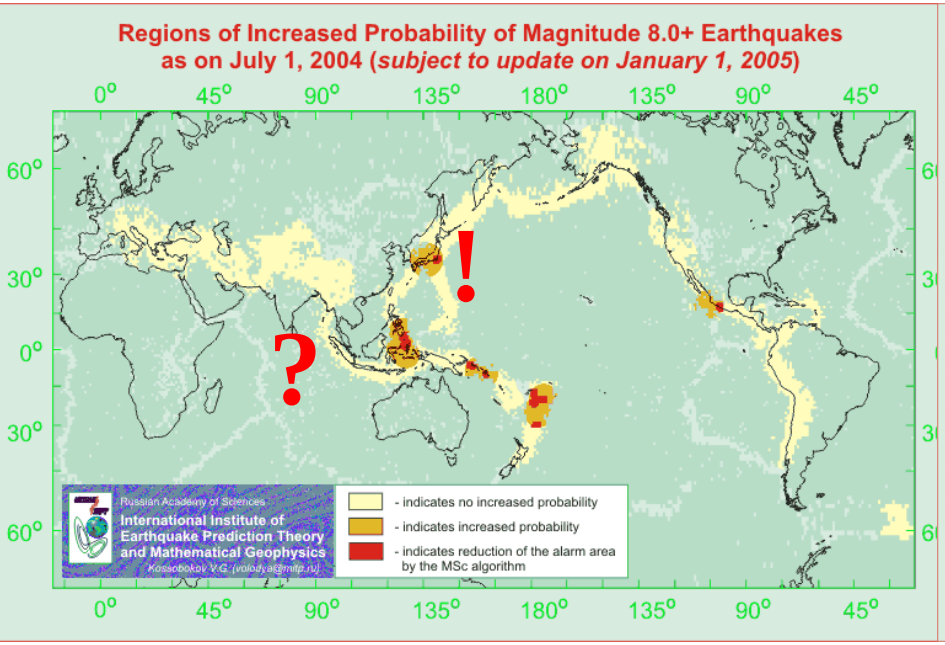
Си… сейсмического шума представлена как сле… модации блочной среды коры.

Локализация дрожи Земли в районе океанского желоба Нанкай

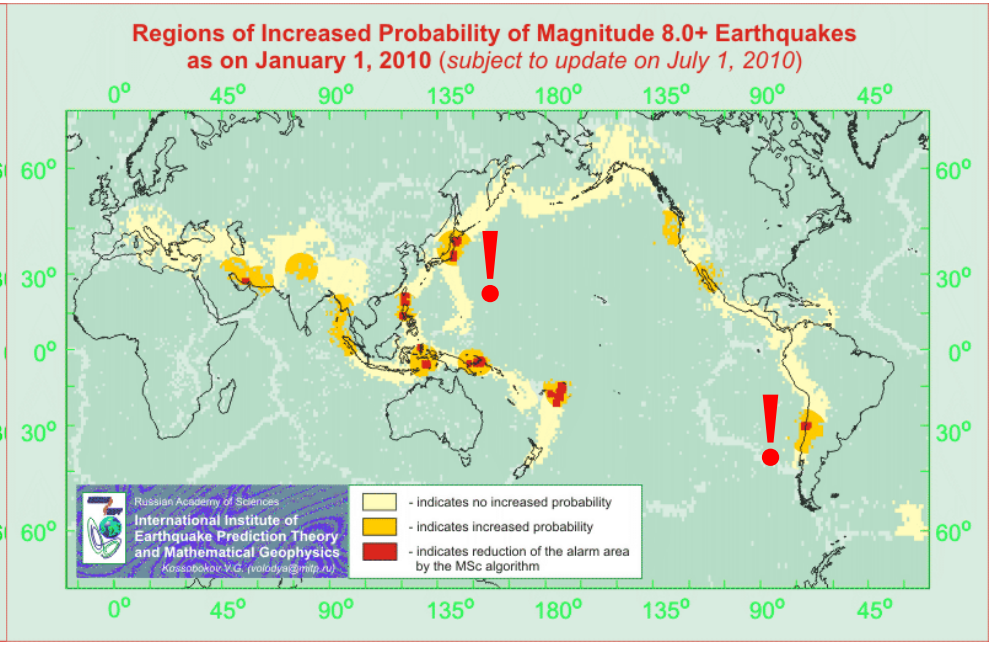




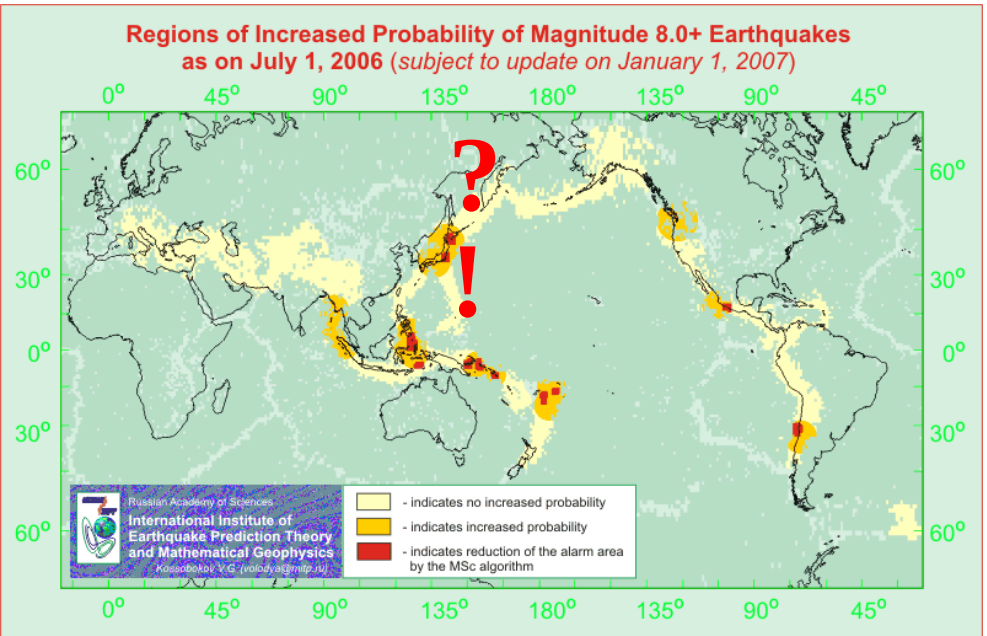
Sumatra-Andaman earthquake 26.12.2004 $M_w = 9.0$



Chilean – Maule earthquake 27.02.2010 $M_w = 8.8$



Simushir earthquakes 15.11.2006 и 13.01.2007 $M_w = 8.3, 8.1$



Tohoku earthquake 7.03.2011 $M_w = 9.0$

Область будущего землетрясения Тохоку была указана системой прогонза как опасная с 2001 года. В начале 2011 года прогноз был переведен в ошибочный и был снят.

Через 70 дней произошло катастрофическое землетрясение Тохоку – **казус Тохоку.**

Kosobokov:
http://www.mitp.ru/ru/predictions.html

- **Теория предсказывает существование фазового пространства информативных признаков, значения которых в периоды, предваряющие катастрофу, существенно отличаются от значений во времена, когда катастрофа маловероятна. (Кособоков)**

Длительное существование сейсмических предвестников сильного землетрясения и их расположение только в части области будущего сильного землетрясения говорит о неоднородности очага.

Отсутствие сейсмических предвестников перед рядом сильных землетрясений может говорить о том, что часть области будущего сильного землетрясения, в которой располагается эпицентр землетрясения (зона предвестников), может быть достаточно малой и поэтому не представленной в каталогах землетрясений.

Зону зарождения сильного землетрясений можно рассматривать как очаг триггерного землетрясения, а возможность его реализации в виде сильного землетрясения зависит от готовности основной - большей его части .

Все это вместе (триггерность, длительность предвестников) дает право характеризовать область будущего сильного землетрясения как метастабильную.

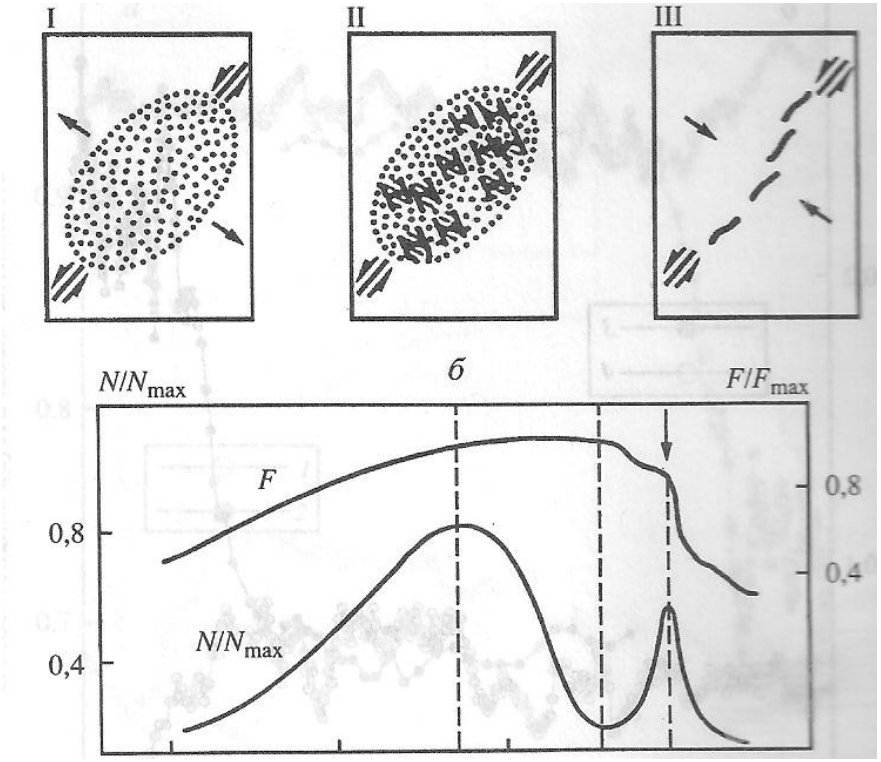
Мифы в физике очага землетрясений

1. Чем больше землетрясение, тем **выше уровень сдвиговых напряжений** в очаге и больше сброшенные напряжения (Буллен, Ризниченко, Беньофф, Гзовский и др.).

2. Землетрясения самоподобно масштабируются в диапазоне от микротрещин до мегаземлетрясений – **масштабная инвариантность** [Стаховский, Успехи ФН, 2017 и др.].

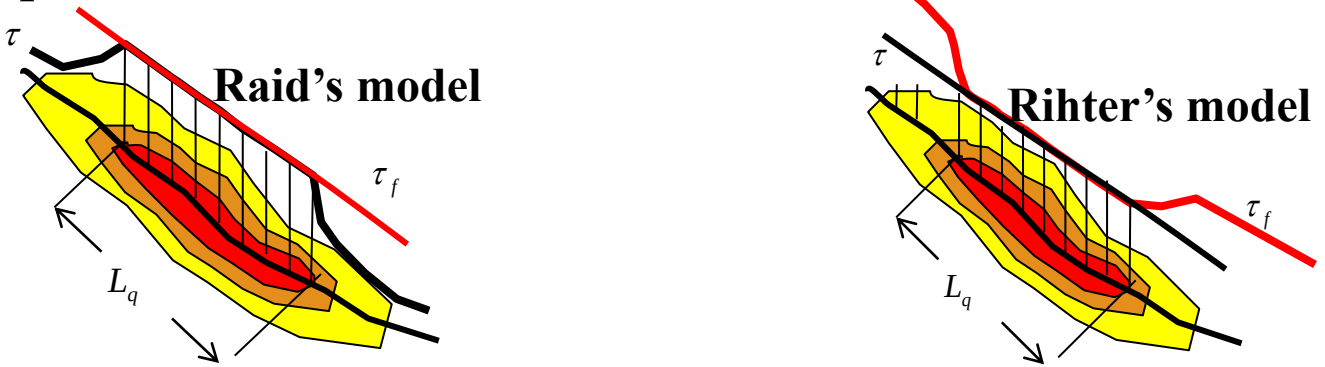
- 3. **Площадь распределения** и интенсивность предвестников характеризует размер будущего очага землетрясения (см. обзор А.Я.Сидорина [1992]).

О моделях очага землетрясения



Разновидности моделей очага сильного землетрясения

Принципиальные механические модели очага определяли возможность формирования крупномасштабного хрупкого разрушения в зонах разломов (модели упругой отдачи в виде ***жесткого и прочного*** [Reid, 1910], а также ***мягкого и малопрочного*** [Richter, 1958] включений.



Физические и морфоструктурные модели очага объясняют состояние и взаимосвязь физических и механических процессов, происходящих в разломах и приводящих к возникновению землетрясения: ***ЛНТ модель*** [Mjachkin et al., 1975] , ***дилатансионно-диффузионная модель*** [Scholz et al., 1973], ***модель неустойчивого скольжения*** [Brace, Byerlee, 1966]), ***зоны асперити*** [Lay, Kanomory, 1981, 1982] и др.

Сейсмологические модели очаг дают возможность объяснить наблюдаемые амплитудно-частотные диапазоны излучения очагов землетрясений.

Физические модели землетрясения с квазиоднородным очагом

Мячкин, Соболев – ЛНТ модель

В среде нагруженной до предельного уровня напряжений происходит лавинообразное нарастание дефектов (базис – теория Журкова для конструкционных материалов), завершающееся сильным землетрясением

Шольц, Стюарт ??????? - ДД модель

В области повышенных девиаторных напряжений происходит дилатансия горных пород, обеспечивающая увеличение прочности горных пород за счет падения флюидного давления (базис – эксперименты по разрушению образцов). После восстановления давления флюида (миграция из соседних областей) возникает сильное землетрясение.

Добровольский - модель консолидированного включения

Формирование (на стадии подготовки) и распад (на стадии разрушения) консолидированной области в виде совокупность блоков, с упрочнившимися между собой связями. После достижения предельного напряженного состояния происходит сильное землетрясение.

Гольдин - модель переупаковки блочной среды

Землетрясение рассматривается как акт разрушения ранее существующей и образовании новой плотной упаковки блоков, в результате которого в сейсмических волнах рассеивается накопленный избыток внутренней энергии упругих деформаций.

Эксперименты с точечным очагом

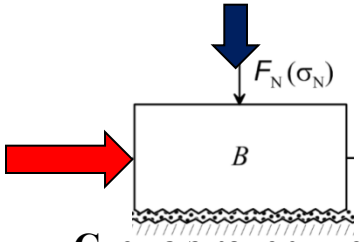
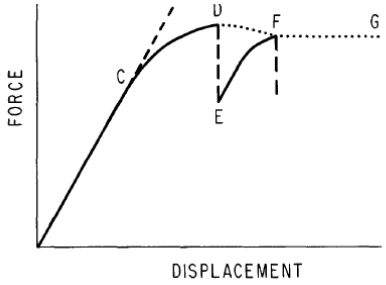
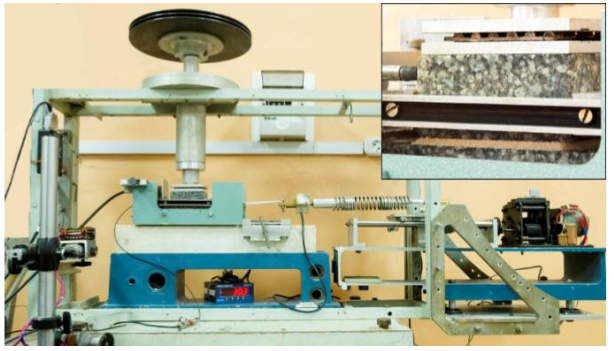


Схема экспериментов Байерли и Брэйса



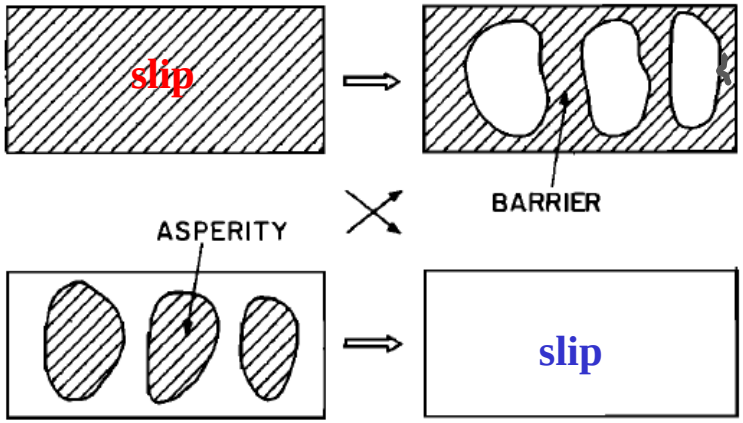
Все лабораторные эксперименты по изучение формирования очага землетрясения вышли из экспериментов Байерли и Брэйса – явление Stick - slip.



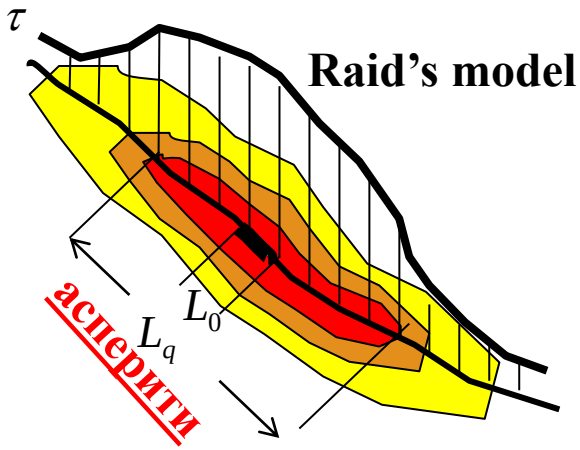
Лабораторная установка Г.Г.Кочаряна в ИДГ РАН

Физические модели землетрясения с квазиоднородным очагом

А) Очаг – область повышенной шероховатости разлома (**asperity model**), запрещающий развитие скольжения **(жесткое включение)**. Разрушение такой зоны происходит при землетрясении.
Было показано [Lay and Kanomory, 1981, 1982; Kostrov, Das, 1983, 1986], что в различных зонах субдукции соответствуют различные распределения неровностей – шероховатости разлома.



Б) Очаг в большей части область медленного скольжения **(мягкое включение)**, имеющая малый участок повышенной прочности – **барьерная модель** [Das, Aki, 1971; Mikumo, Miyatake, 1978; Костров, 1978; Aky, 1984]. Разрушение малого запертого участка вызывает землетрясение
Внутри очаговой зоны имеется множество слабых барьеров разрушения, сопровождающихся превращением энергии упругой деформации в сейсмическую и тепловую (трение, пластическая деформация).



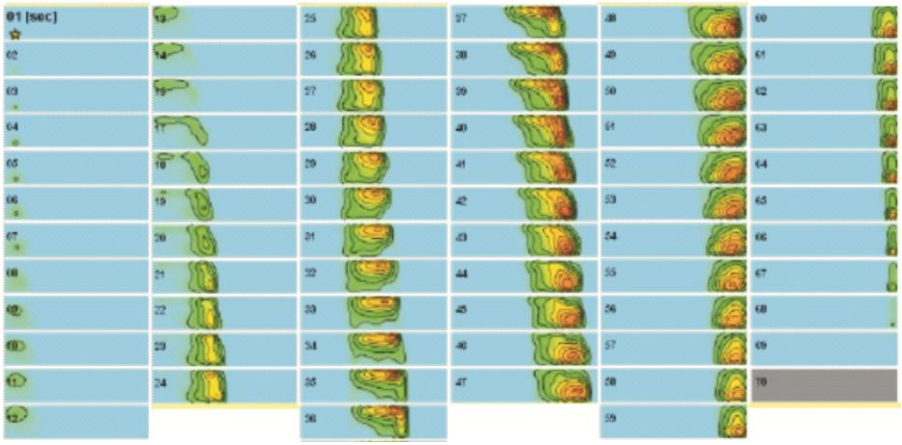
В **модели асперити** закон трения R&S замедляет скорость фрикционным поведением (сейсмический разрыв может зарождаться и легко распространяться), а в **модели барьеров** закон трения R&S замедляет распространение сейсмических разрывов [Scholz, 1998].

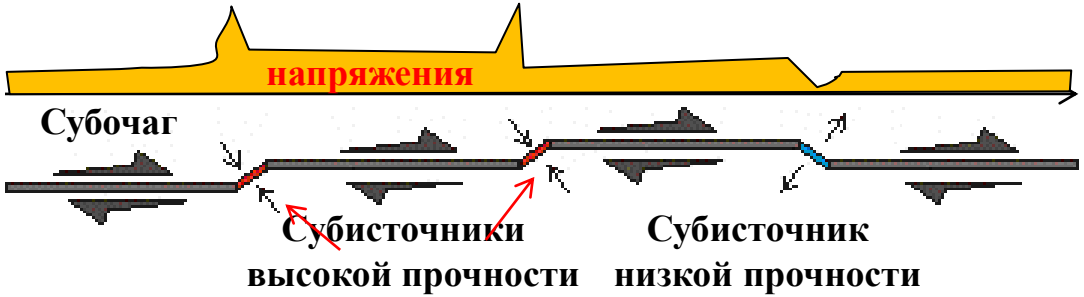
Сейсмологические модели очага землетрясения

Создание кинематической модели очага с амплитудно-частотными особенностями, подобными природному.

Основной элемент формирование очага – это локализация хрупкого разрушения в ***узкой бегущей полоске*** или «импульсе подвижки» (slip pulse).

В работах [Гусев, 1988; Гусев, Гусева, 2014; Gusev, 1989; Day et al., 2008] кроме **субчагов** – областей большой площади и высокой прочности (асперити), являющихся источником низкочастотных сигналов, введено понятие **субисточников**

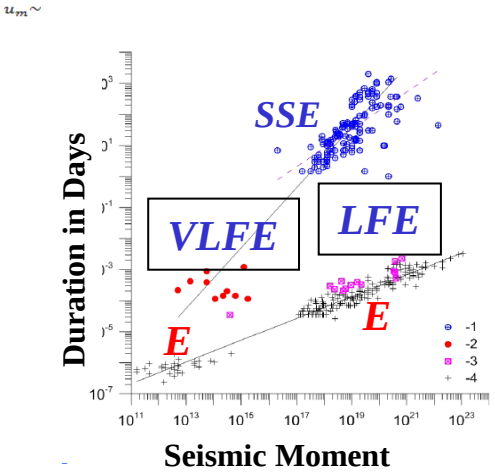




Субисточники , занимающие малые площади разлома, имеющих как высокую (**барьеры**), так и низкую прочность (**триггеры**) и генерирующих при разрушении высокочастотные сигналы.

Таким образом, А.А. Гусевым фактически было предложено **совместить модель асперити и барьеров в единую модель**.

Природные явления, приводящие диссипации упругой энергии



Кочарян, Остапчук

[Wei et al., 2013]

A – **область стабильного скольжения** - Creep;

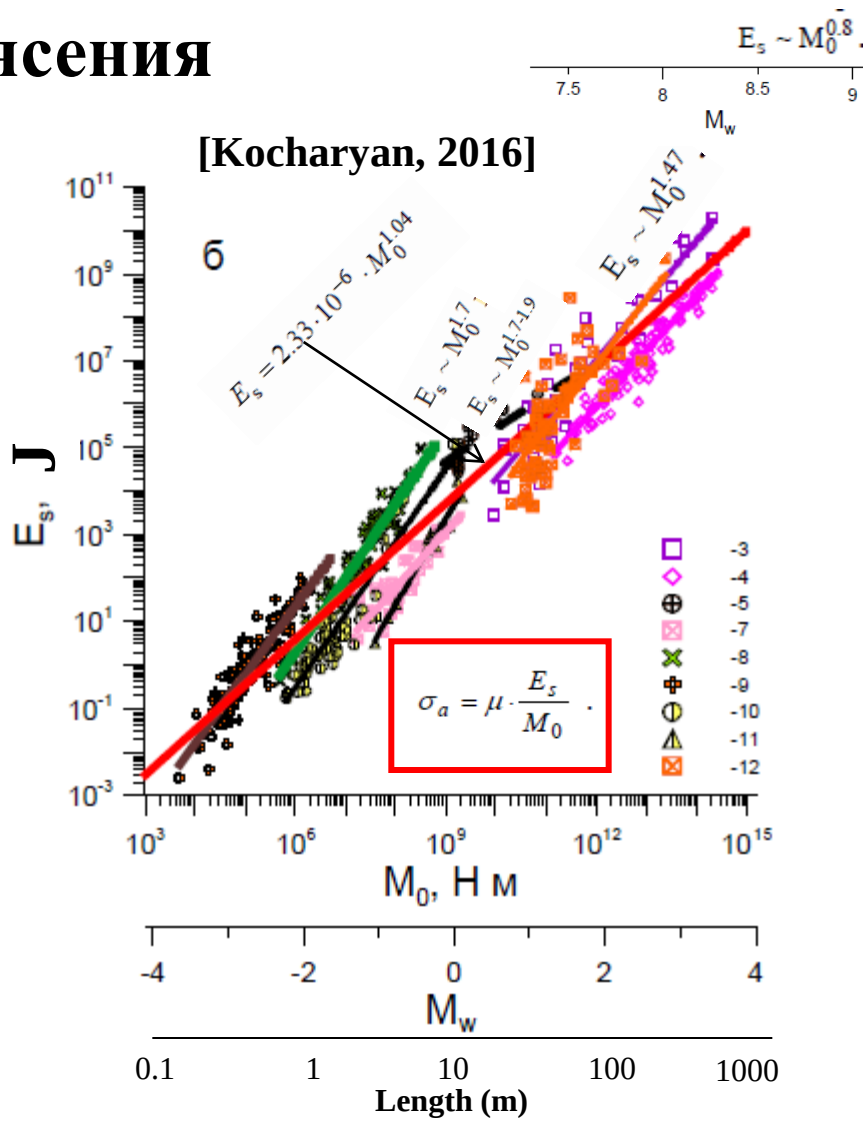
B – **область прерывистого скольжения** - Earthquake;

C – **область условно-стабильного скольжения** – SE (тихие землетрясения, SSE (медленные события).

D – **треморы**

Мегаземлетрясения

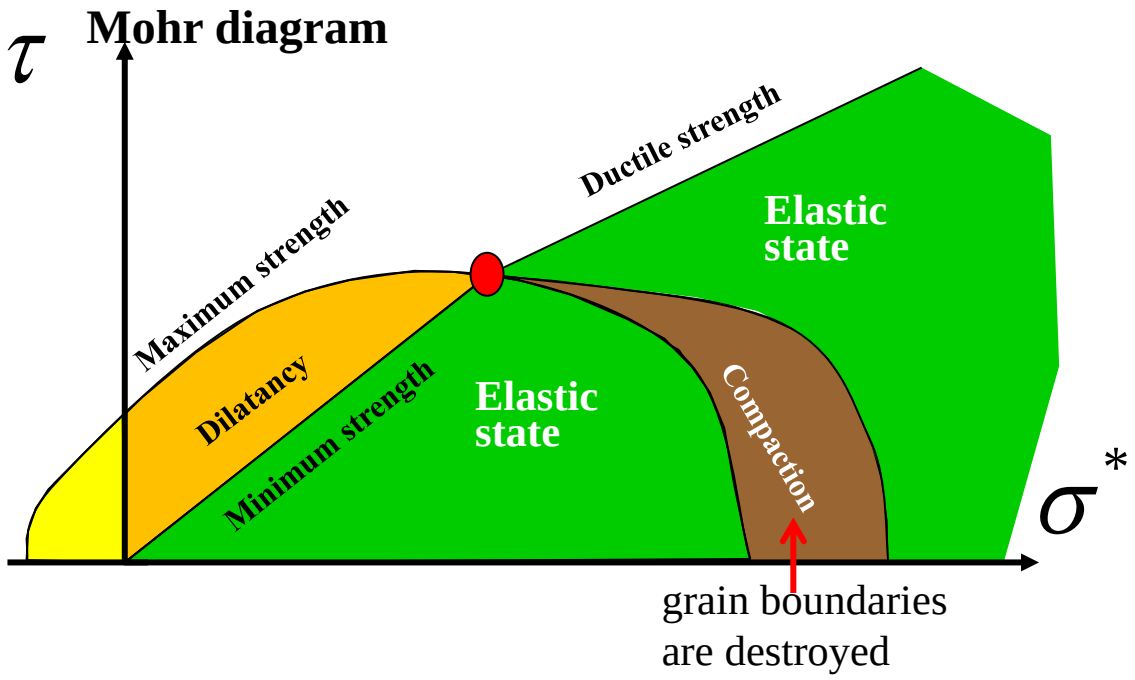
Принято считать, что хрупкое разрушение в коре развивается **самоподобно** и что механика крупного и слабого землетрясения одинаковая.



Есть принципиальная разница между землетрясениями с магнитудами **M > 8.0**, которые причисляются к катастрофическим, и землетрясениями относительно малых магнитуд **M < 6.0**. Первые имеют характерный **размер *б*ольший мощности коры** и уже поэтому взаимосвязь их линейных размеров с энергией, выделившийся в сейсмических волнах, должна быть иной, чем для землетрясений малых магнитуд. Для них может быть **особый путь к прогнозу.**

Б*о*льшая часть мегаземлетрясения с магнитудами **M > 8.5** происходит в **переходных зонах – зонах субдукции** литосферных плит (активные континентальные окраины), характеризующихся квазиоднородным механизмом формирования деформационных структур литосферы.

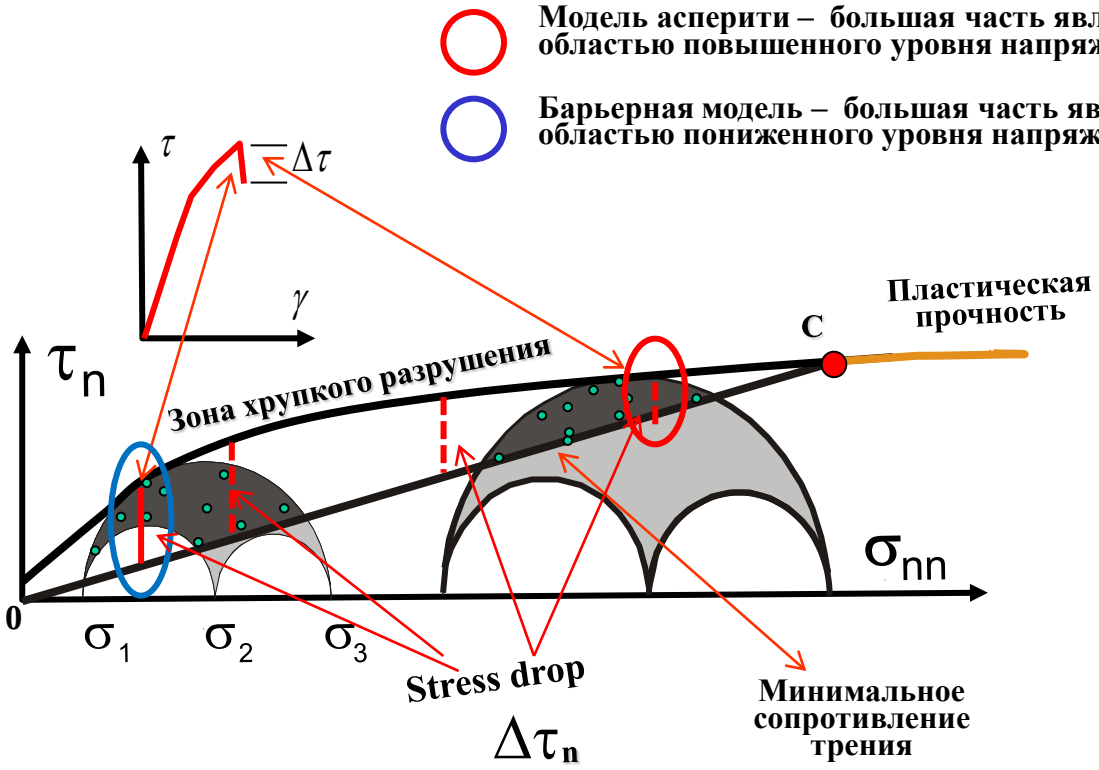
Эффективность сброса напряжений в очаге землетрясения

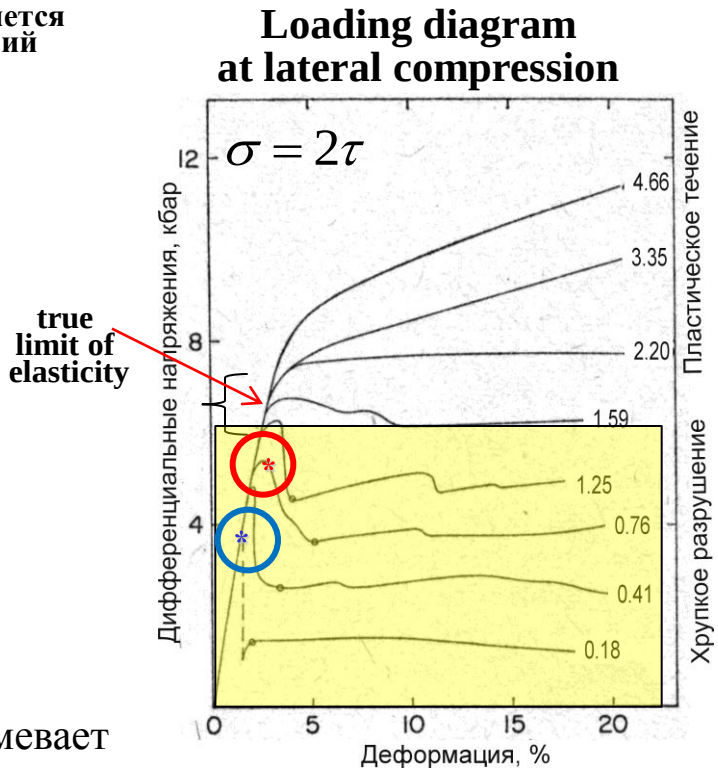


Актуальные модели очага на диаграмме Мора

Эксперименты по разрушению образцов породы [Byerlee, 1968, 1978; Brace, 1967; Mogi, 1964; Ставрогин, Протосеня, 1992; и др.] показали, что хрупкая прочность пород зависит от **уровня изотропного давления,** отвечающего за трение на разломе**.**

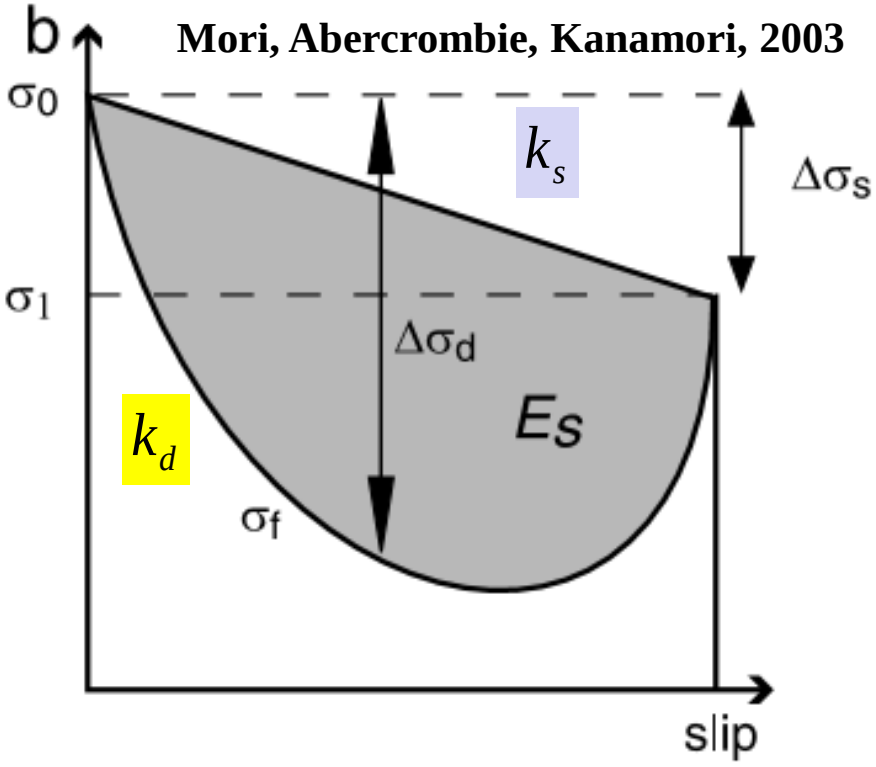
Критическое состояние пород формируется **как при высоком так и при низком уровне девиаторных напряжений**, которым отвечает соответствующий уровень изотропного давления.

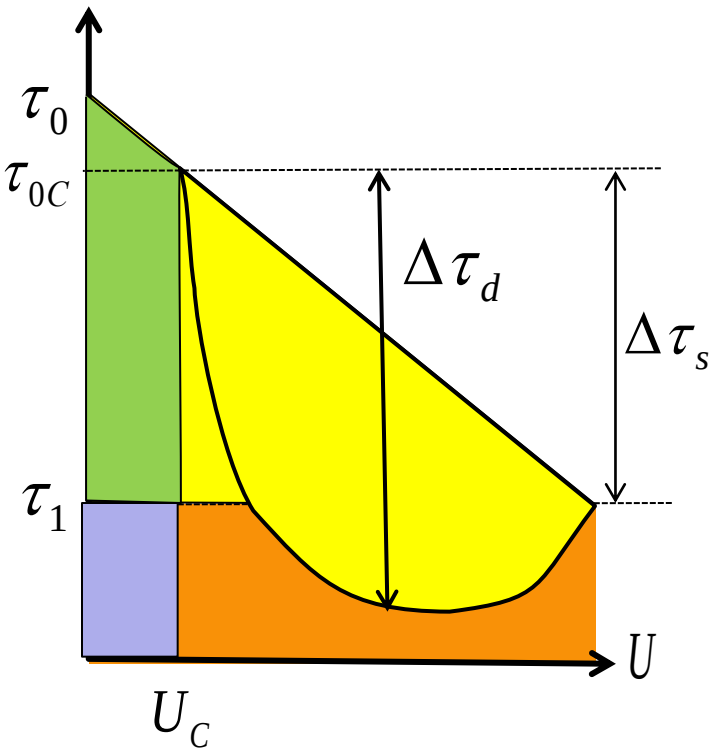




Существование сейсмических событий автоматически подразумевает

Соотношение выделяющейся энергии и сброшенных напряжений





Считается, что для увеличения сейсмической энергии, выделяющейся из очага землетрясения, необходимо существенно понизить динамическое трение относительно статических его значений.

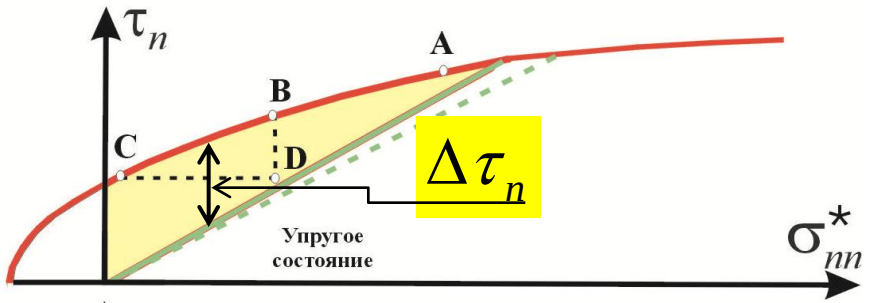
Предваряющее землетрясение медленное скольжение может составлять до 10-20% от сейсмического скольжения

Баланс энергии при землетрясении

Энергия сейсмических волн

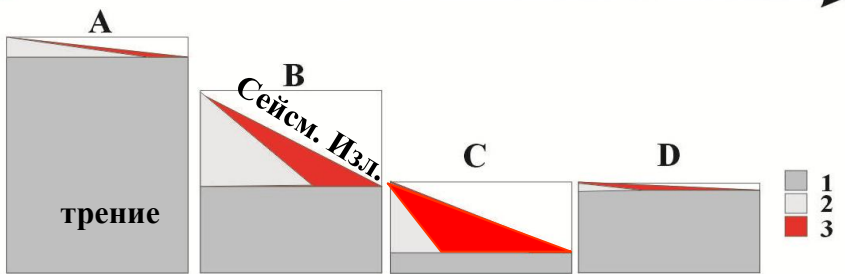
$$E_q = \tau_a \bar{U}_s \Omega_s,$$

L^2



Снятая в очаге упругая энергия

$$E_e = -(\tau_n^0 - 0.5\Delta\tau_n)\bar{U}_s\Omega_s$$



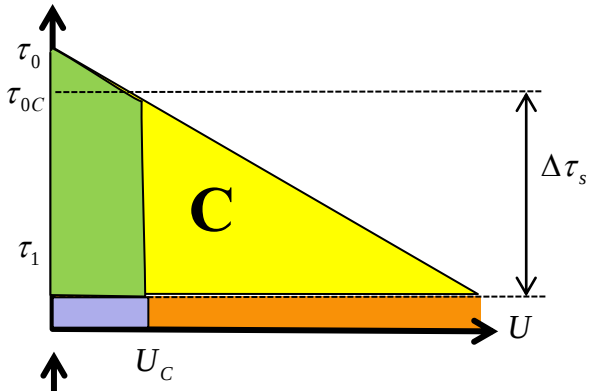
Тепло на разрыве

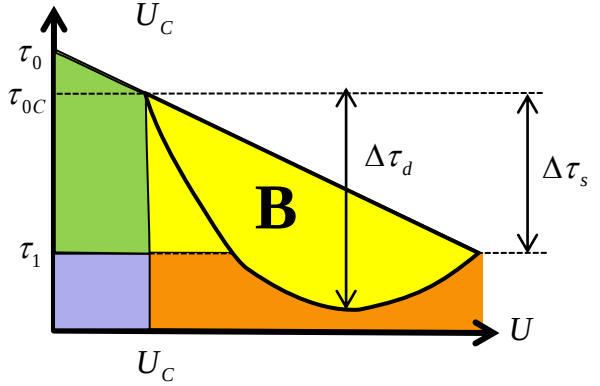
$$E_H = -k_k \sigma_{nn}^0 \bar{U}_s\, \Omega_s$$

Энергия хрупкого разрушения

$$E_f = \tau_f \bar{U}_s\, \Omega_s$$

Энергия форма изменения $W_e = \frac{\tau^2}{G_e}\left(1 + \frac{\mu_\sigma^2}{3}\right)V_q$





$\tau_n^0 = \tau_f - k_f \sigma_{nn}^0$ – критерий хрупкой прочности,

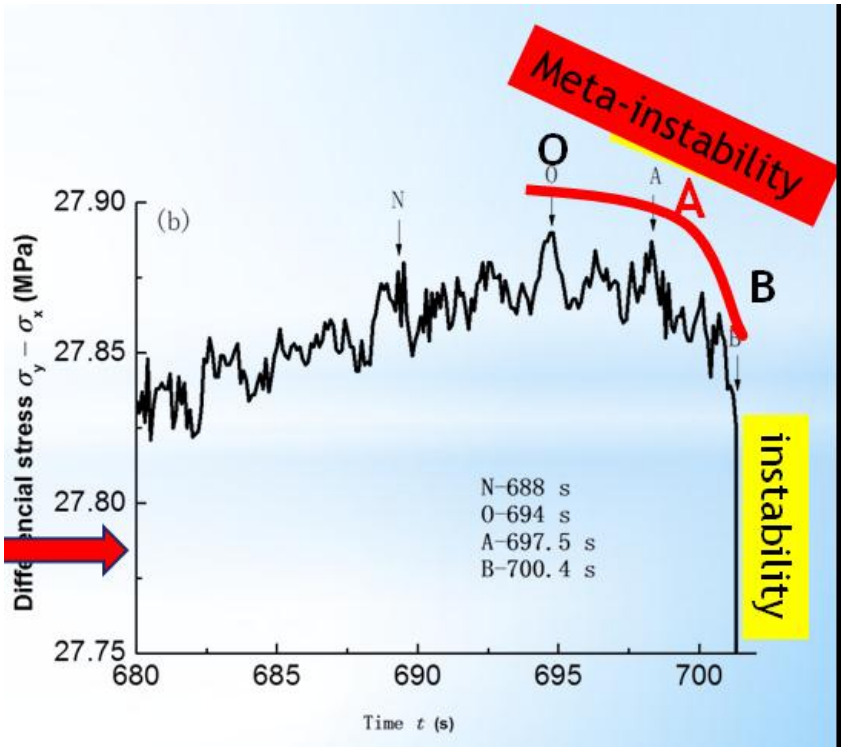
$\tau_a = 0.5\Delta\tau_n$ – кажущиеся напряжения,

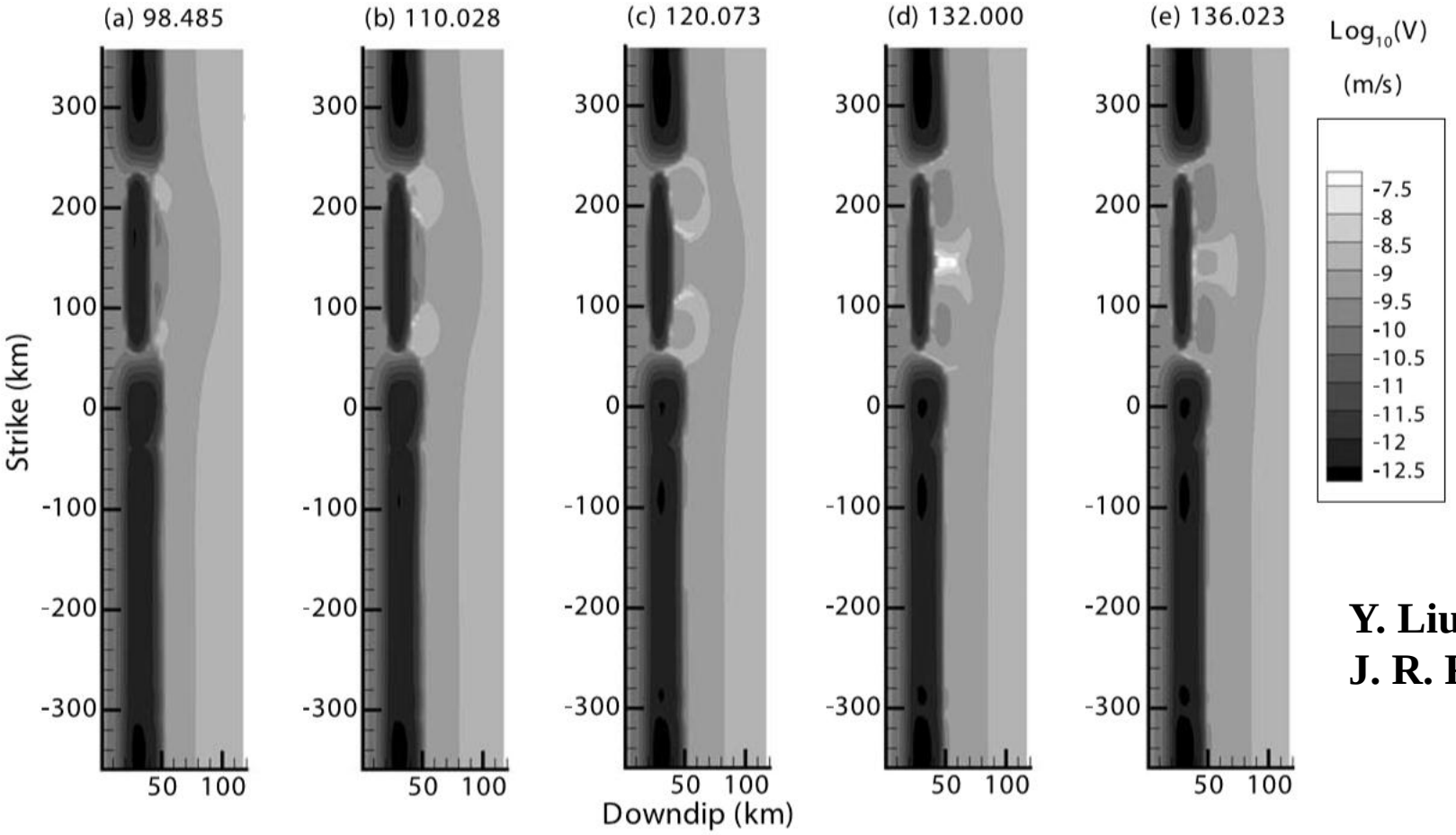
$\Delta\tau_n$ – сброшенные касательные напряжения на разрыве,

τ_n^0, σ_{nn}^0 – касательные и эффективное нормальное напряжения на разрыве, действовавшие до его активизации,

$\bar{U}_s$ и Ω_s – среднее смещение на разрыве и площади разрыва.

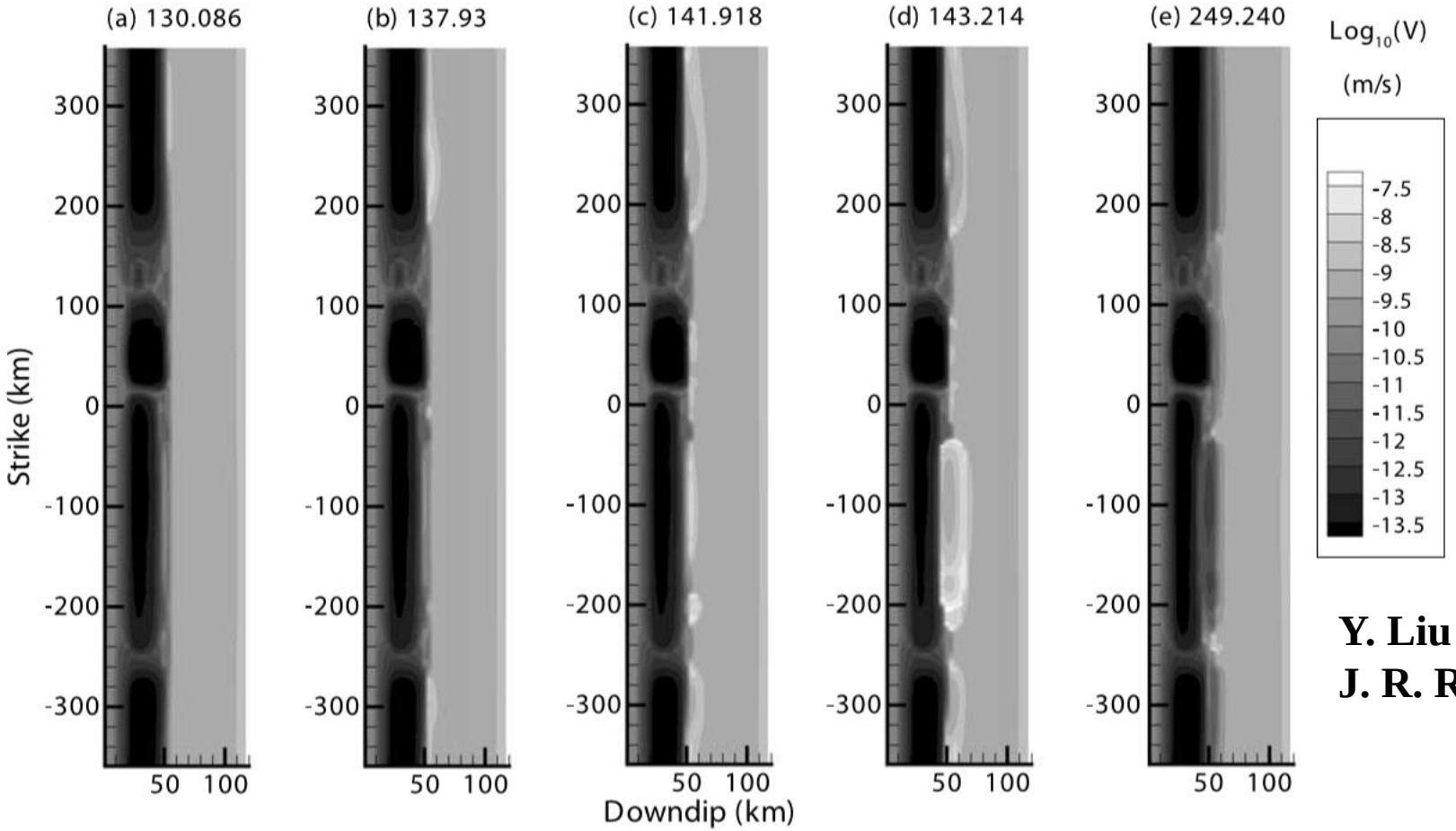
Геомеханическое моделирование неустойчивого скольжения (переходный процесс) в переходных зонах





Y. Liu and J. R. Rice (2005)

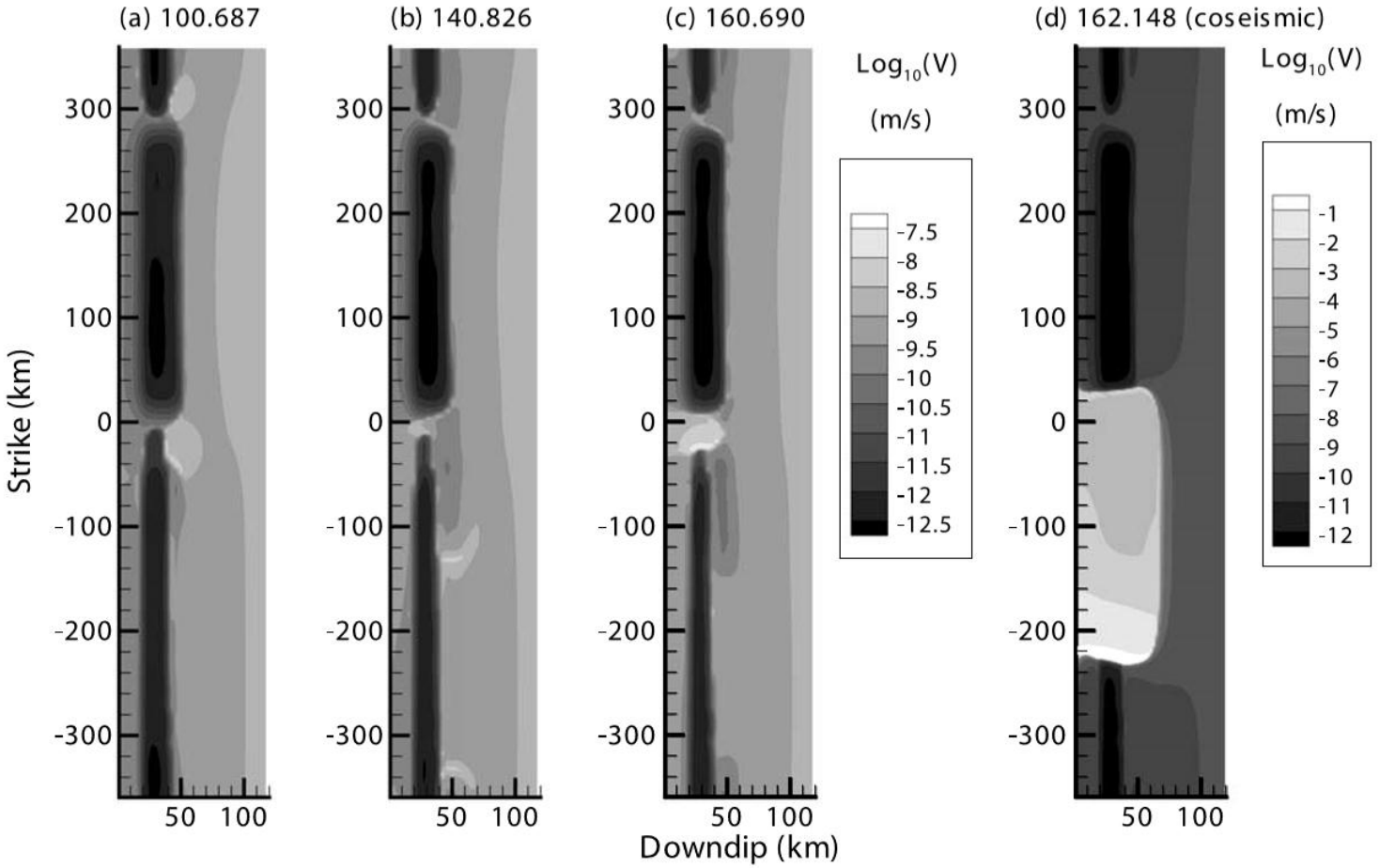
Переходный процесс начинается в промежутках между двумя прочно запертыми областями (a), через 98 лет после сейсмического события, которое разорвало большую часть разлома (вдоль простирания от 40 до 360 км).
Пара скользящих фронтов перемещается навстречу друг другу вдоль разрыва (b, c).
Фронты скольжения соединяются в центре и достигают максимальной скорости скольжения около 10^{-7} м/с (d). После этого переходный процесс в течение следующих нескольких лет исчезает (e). **Сильного землетрясения не происходит.**
Средняя скорость миграции вдоль простирания составляет 3 км/год. Весь процесс ограничен глубинами ниже надежно запертого района 60 до 240 км. **Длительность процесса около 35 лет.**



Y. Liu and J. R. Rice (2005)

Вблизи позиции 300 км вдоль простирания и на глубине 50 км (a) начинает развиваться **переходный процесс** в виде небольшой области со скоростью скольжения около 10^{-8} м/с. Эта область запускает **второй переходный процесс** (b) вблизи 200 км вдоль простирания. Далее в ближайшие 4 года (c) переходные процессы появляются вдоль все зоны на глубине 50 км с аналогичными сдвиговыми скоростями.

Сейсмический "разрыв‘ распространяется вдоль простирания (d) на месте развития небольшого по длине переходного процесса (-100 км). Асейсмически ”разорванные” области блокируются через 106 лет (e). **Землетрясение происходит через 4-5 лет** после начала формирования зоны скольжения.



Y. Liu and J. R. Rice (2005)

Переходные процессы, устойчиво развивавшиеся на позиции 300 и 0 км, постепенно затухают (a). Возникают два фронта скольжения **переходных процессов, которые** двигаются друг к другу (b).

Участок ускоренного скольжения, появившийся в позиции 0 км (c), постепенно становится настолько доминирующими в регионе, что переходные фронты подавлены до встречи друг с другом.

Этот участок ускоряющегося скольжения быстро превратился в большое **сейсмическое событие** (очаг 250 км).

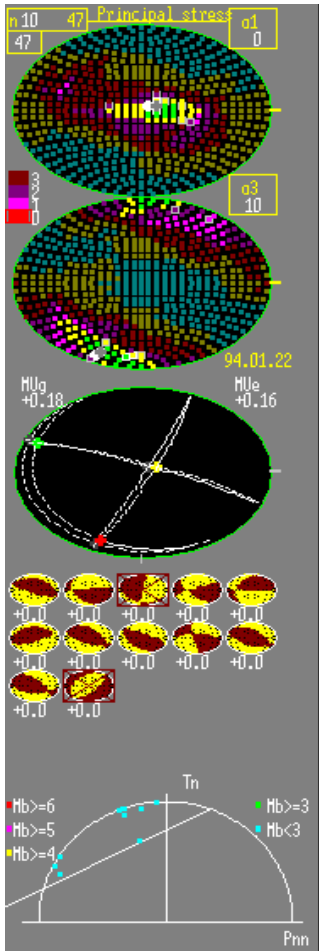
Землетрясение происходит через 1.5 года после начала формирования зоны скольжения.

- Возможность смены «спонтанного» фрикционных свойств (скоростного ослабления, скоростного упрочнения) в зонах гетерогенного скольжения и изменения напряжений вдоль простирания, по-видимому, является причиной возникновения **асейсмического скольжения** .
- Районы разломов с **пониженной интенсивностью блокировки**, которые естественным образом возникают из-за **неоднородности вдоль простирания** истории скольжения, могут стать потенциальными местами зарождения будущих крупных сейсмических событий.
- Наши симуляции предполагают эту гипотезу, хотя **детальная механика в настоящее время далека от ясности**.
- **Liu, Y., and J. R. Rice (2005)**

- С позиции **модели асперити** за определенное время до землетрясения **шероховатость** с *низкой скоростью сейсмического скольжения* (10^{-11}-10^{-12} м/сек) **превращается в свою противоположность –** зону *асейсмического ускоренного скольжения* (10^{-7}-10^{-8} м/сек) со сниженным уровнем напряжения.
- **Ю.Л. Ребецкий (2019)**

15:03:32

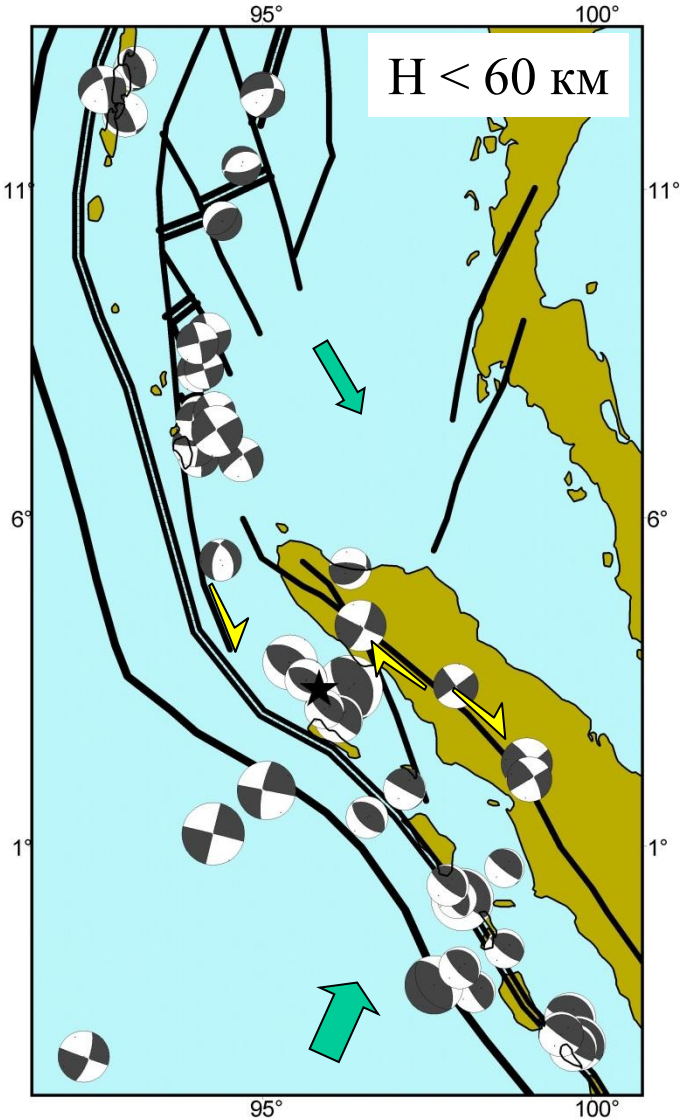
Результаты тектонофизических исследований сейсмоактивных регионов



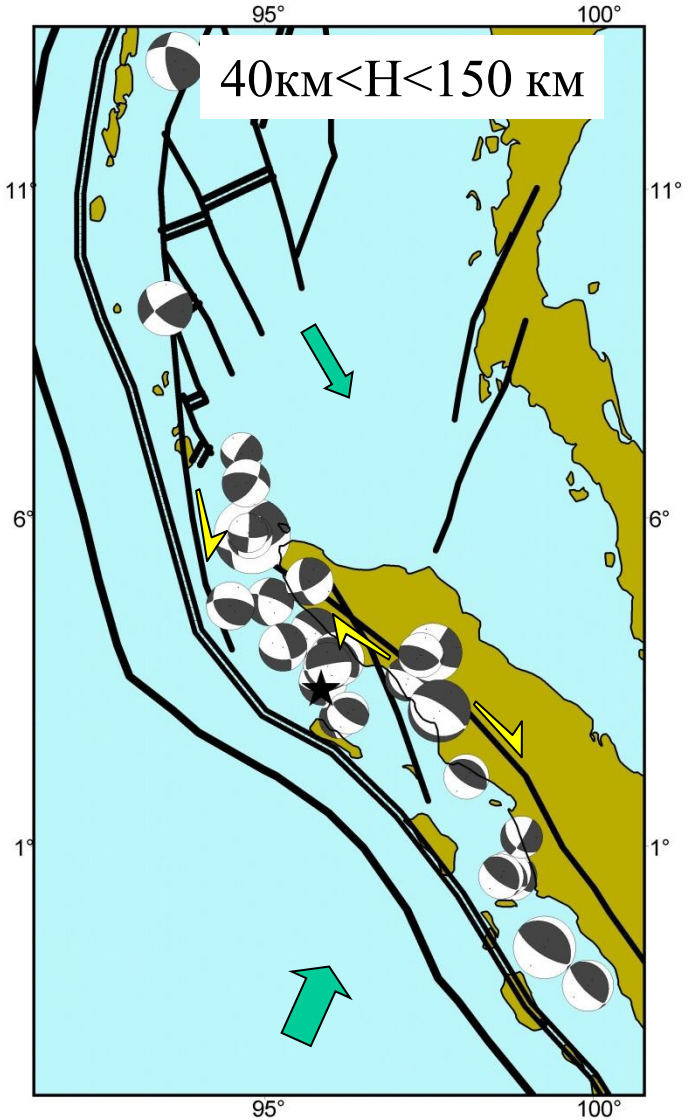
Sumatra-Andaman earthquake M=9.1, 26/12/2004

15:03:32

Western Wing of the Sunda's Arc



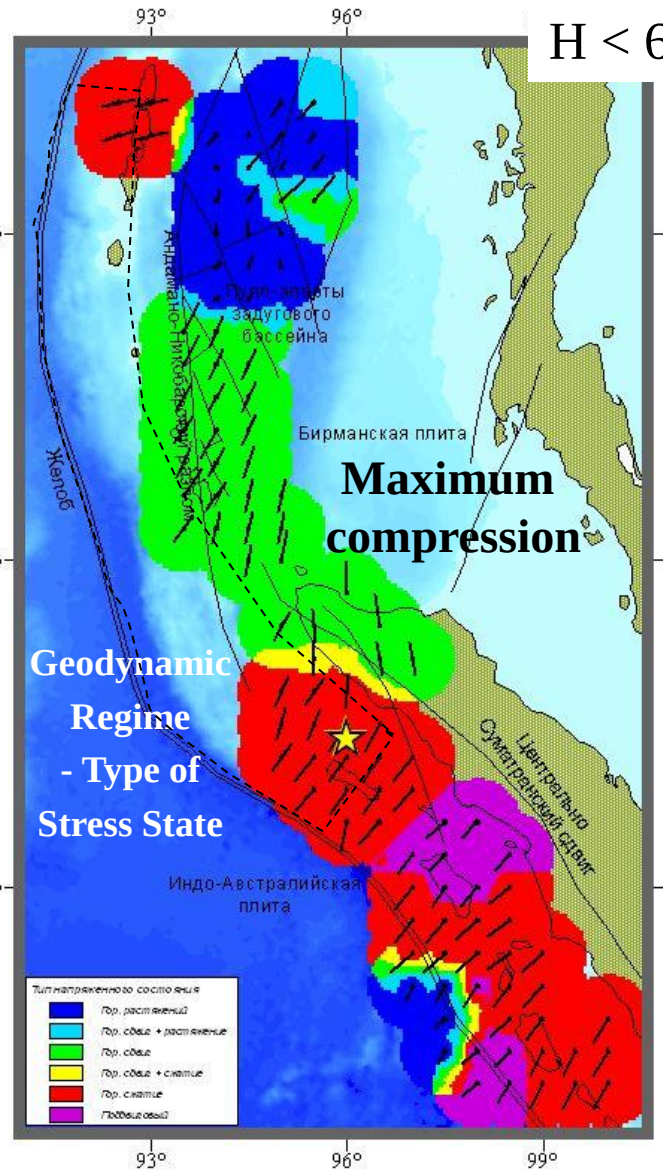
219 CMT solution
с 4.7<M_w<6.3.



80 CMT solution
с 4.9<M_w<6.5.

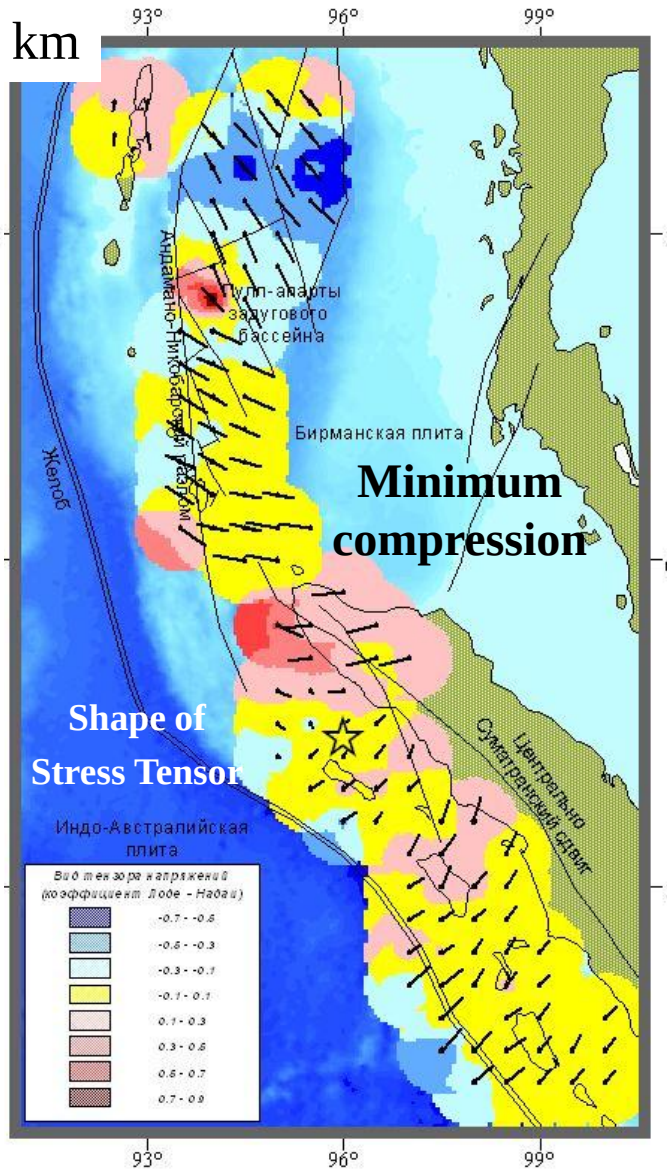
Principal Stress Axis for the Crust of Western Wing of the Sunda's Arc

H < 60 km



Maximum compression

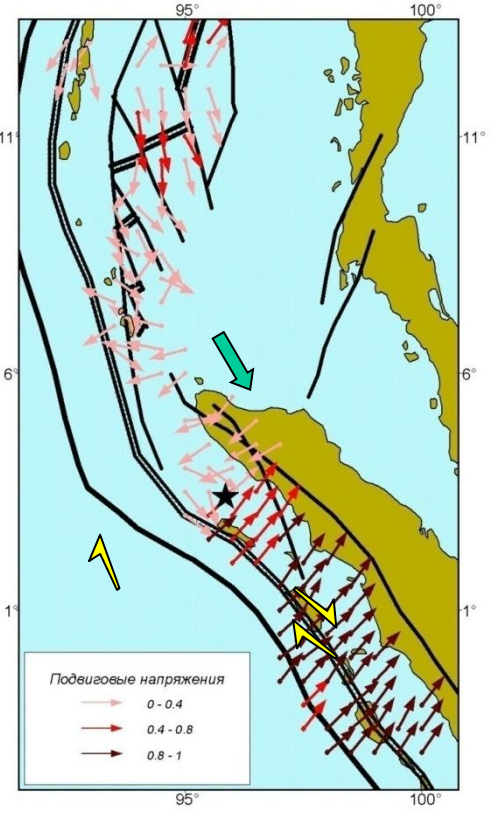
Geodynamic Regime - Type of Stress State

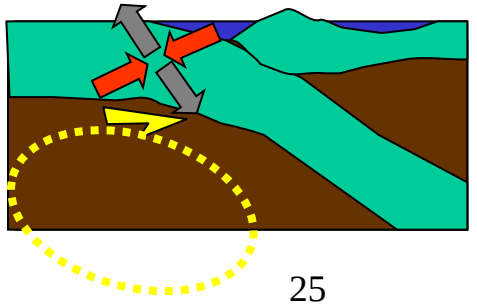


Minimum compression

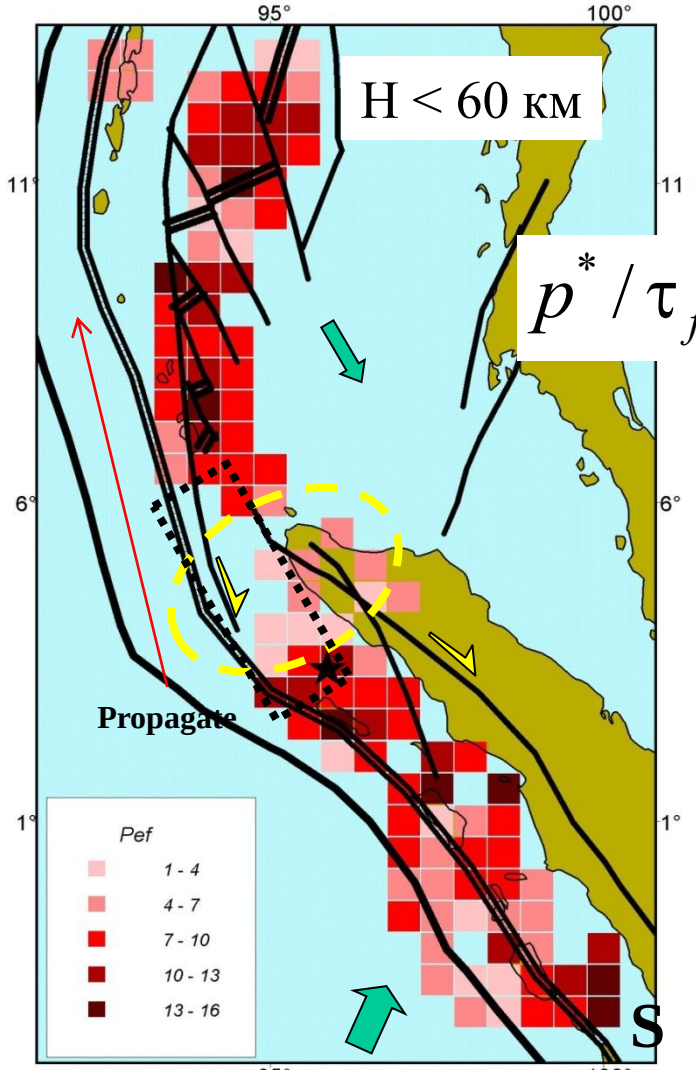
Shape of Stress Tensor

Underthrusting shear stresses

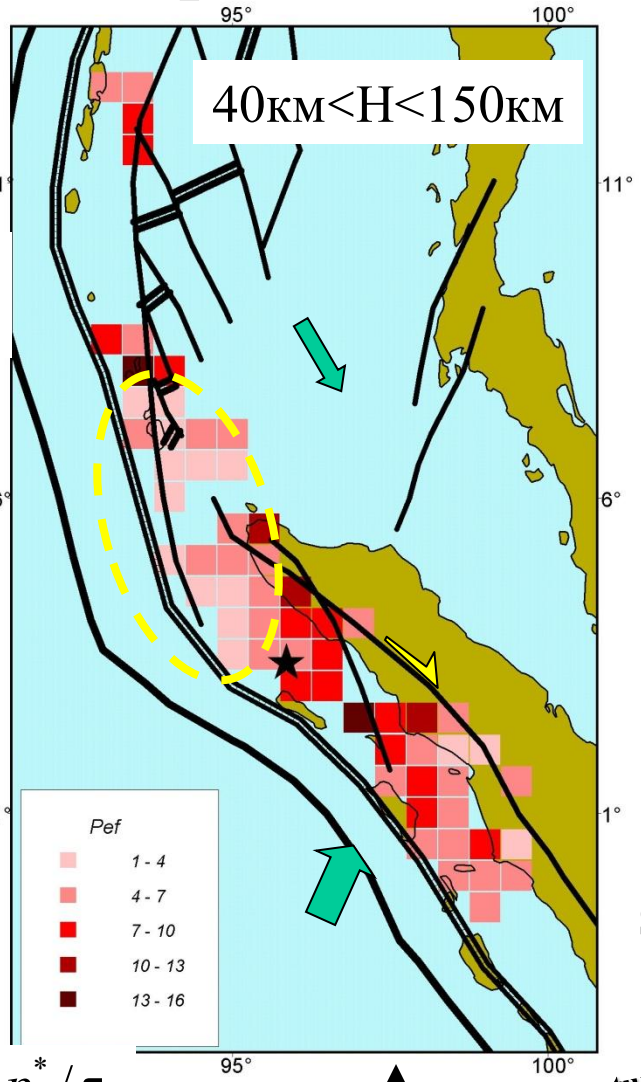


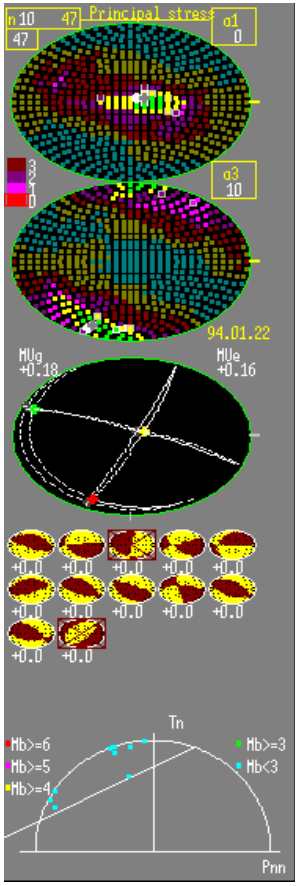


Sumatra-Andaman earthquake 2004, M=9.1

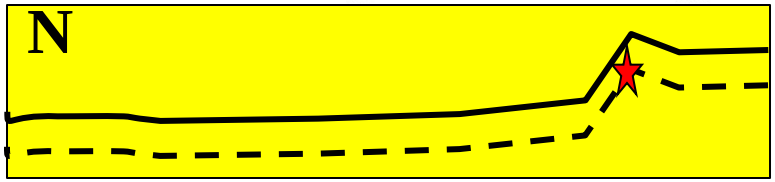


p^* / τ_f





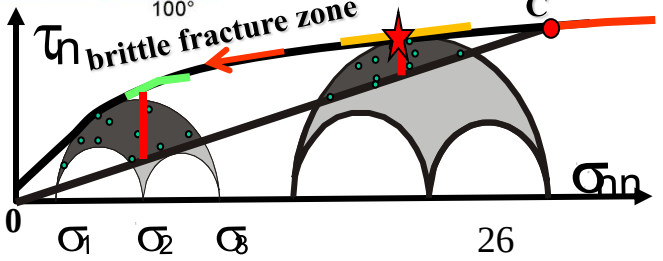
Stress averaging scale - 50-70 км (crust)



p^* / τ_f

τ / τ_f

are coupled



Maule (Chile) earthquake 27.02.2010 M=8.8

Effective pressure

p^* / τ_f

M=8.8

Pef
1 - 5
5 - 10
10 - 15

S

15:03:32

Simushir earthquake 15.11.2006 M=8.3

p^* / τ_f

Areas of high intensity of effective pressure

Area of low intensity of effective pressure

1994

S

Относительное эффектиное давление
0.7 - 3
3 - 6
6 - 9
9 - 12
12 - 15
15 - 18
18 - 21
21 - 24
> 24

p^* / τ_f

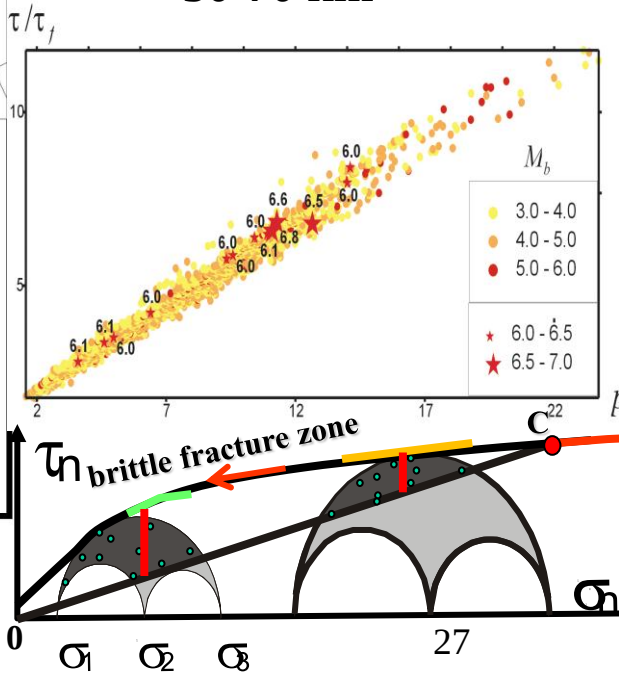
τ / τ_f

are coupled

Катастрофическое землетрясение происходит в области низкого уровня напряжений и ограничено участками повышенного уровня напряжений

Землетрясения средних магнитуд игнорируют области повышенного уровня напряжений.

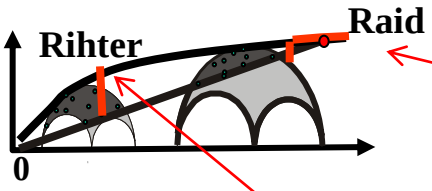
Averaging of stress – 50-70 km

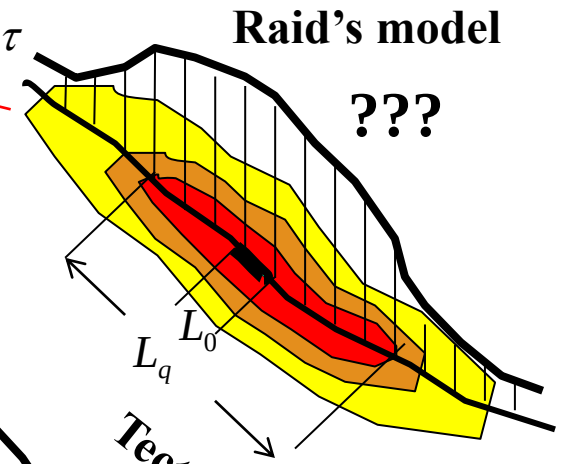


15:03:32

Одномерная модель подготовки очага катастрофического землетрясения

Одномерная тектонофизическая модель источника катастрофического землетрясения



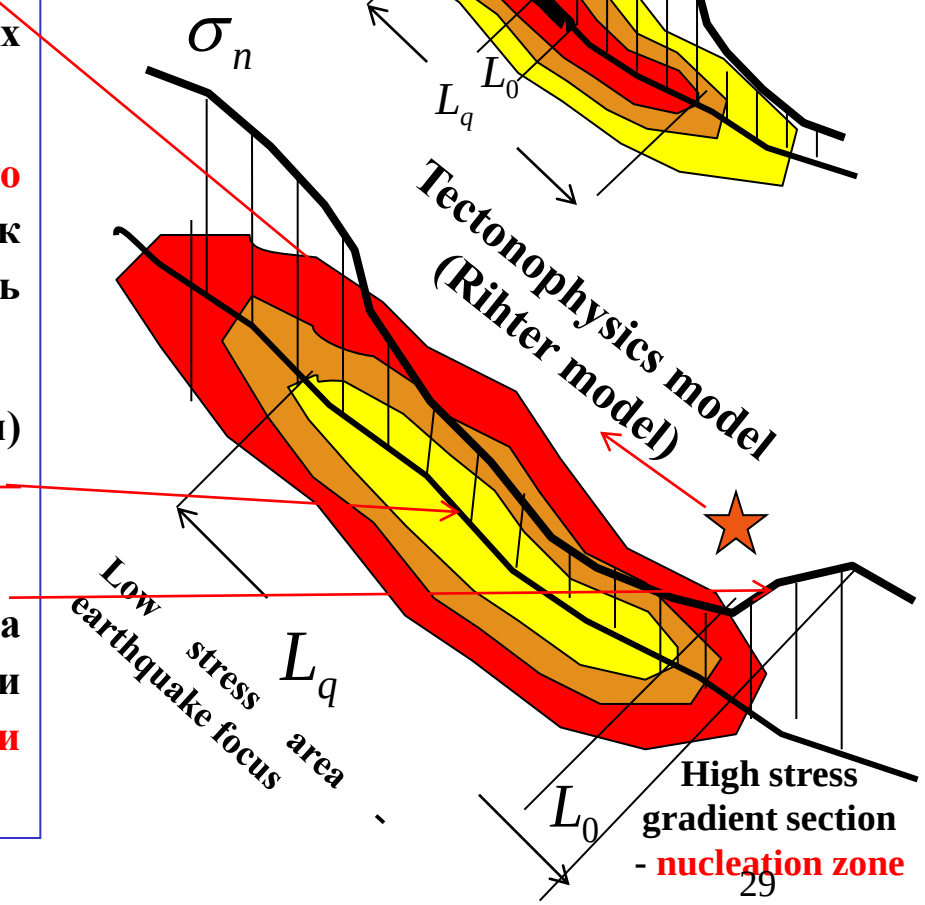


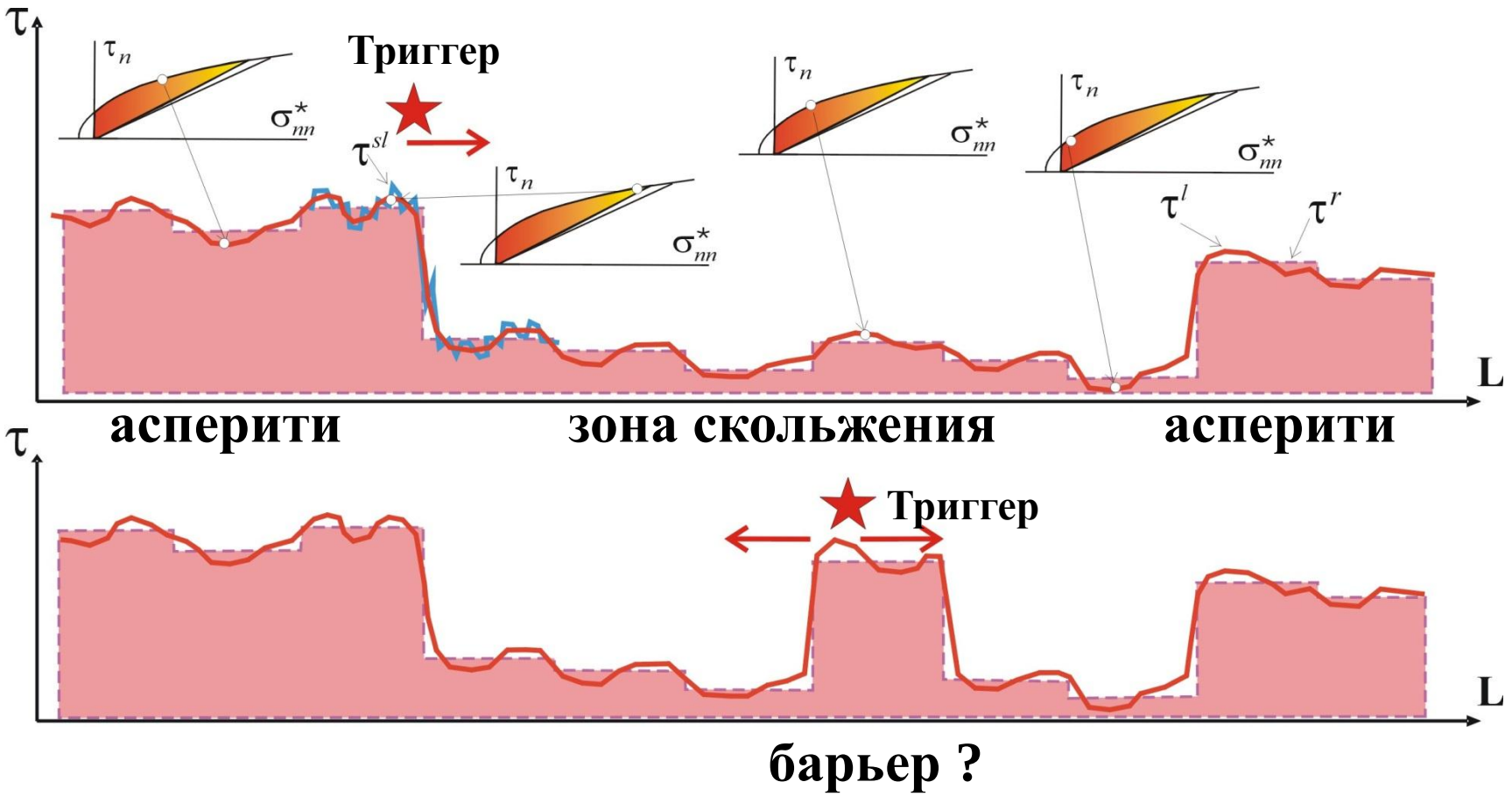
Необходимым условием возникновения сильных землетрясений (магнитудой Mw> 8) является:

A. существование сильно неоднородного напряженного состояния, близкого к напряжению текучести (Кулона-Мора), вдоль разломной структуры регионального уровня.

B. наличие большого региона (более 200 км) среднего или низкого эффективного давления – *мягкое включение* (модель Рихтера).

C. формирование сегмента градиента напряжений высокого уровня (краевые или внутренние зоны фокуса) на границе или внутри очага - зона нуклеации (Lq/10).





Протяженные зоны (200 и более км) высокого и низкого уровня эффективного давления связаны не с процессами в скольжения в зоне разлома, а **геологическим процессами в литосфере и нижележащей мантии** **(Ребецкий, 2004, 2005)**

Могут также существовать **альтернативные** или, возможно, дополняющие друг друга механизмы для естественно наблюдаемых переходных процессов, на основе эпизодического введения **метаморфических флюидов** при высоком давлении вдоль границы субдукции.

Y. Liu and J. R. Rice (2005)

Выводы из тектонофизической модели

Результаты геомеханического регионального моделирования показывают:

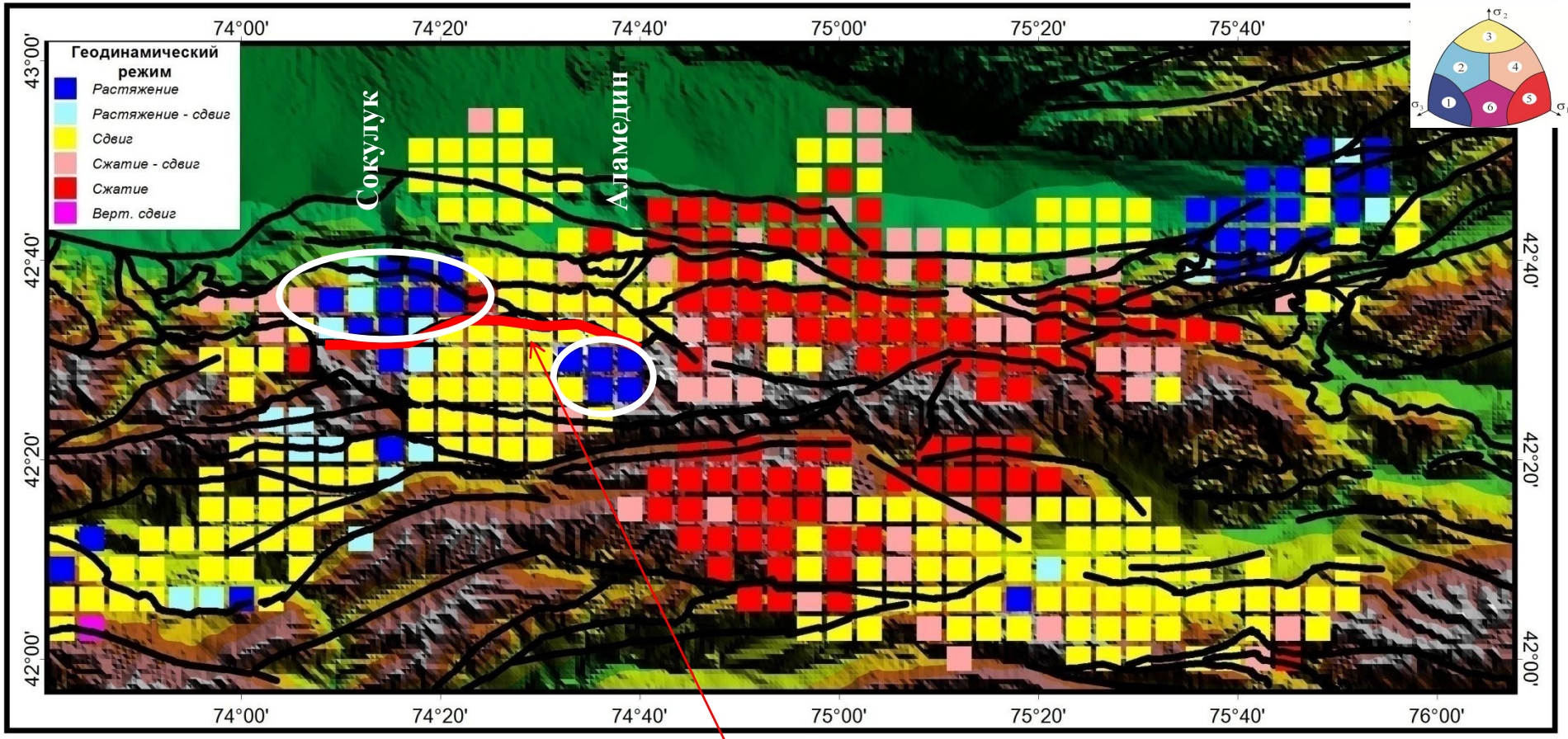
1) Задолго до землетрясения область подготовки очага представляет собой **зону асперити,** существование которой длится **десятки лет и более.**
2) Развитие неустойчивого скольжения в зонах асперити может превращать их в **зоны ускоренного скольжения за времена в первые годы – десятки лет.**

3) Зоны ускоренного скольжения в итоге могут стать источником **мегаземлетрясения.**

Одномерная тектонофизическая модель источника подготовки сильного землетрясения показывает:

1) Зона подготовки очага мегаземлетрясения в большей своей части является участком субдукции **с повышенной скоростью скольжения (переходный процесс) и пониженным уровнем напряжений,** существующей как минимум первые десятки лет и возможно больше.
2) **Место триггера** мегаземлетрясения в зоне пониженных напряжений связано с наличием внутреннего или граничного барьера – **участка локального максимума напряжений,** а **зоне зарождения** отвечает участок наибольшего градиента напряжений.
3) **Среднесрочный прогноз** мегаземлетрясения связан с исследованием зон ***зарождения*** землетрясений, т.е. участка высокого градиента напряжений – это место триггерного землетрясения с магнитудой 5.0-6.0

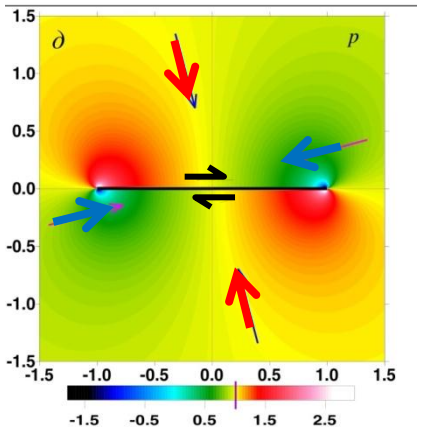
ТИП НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

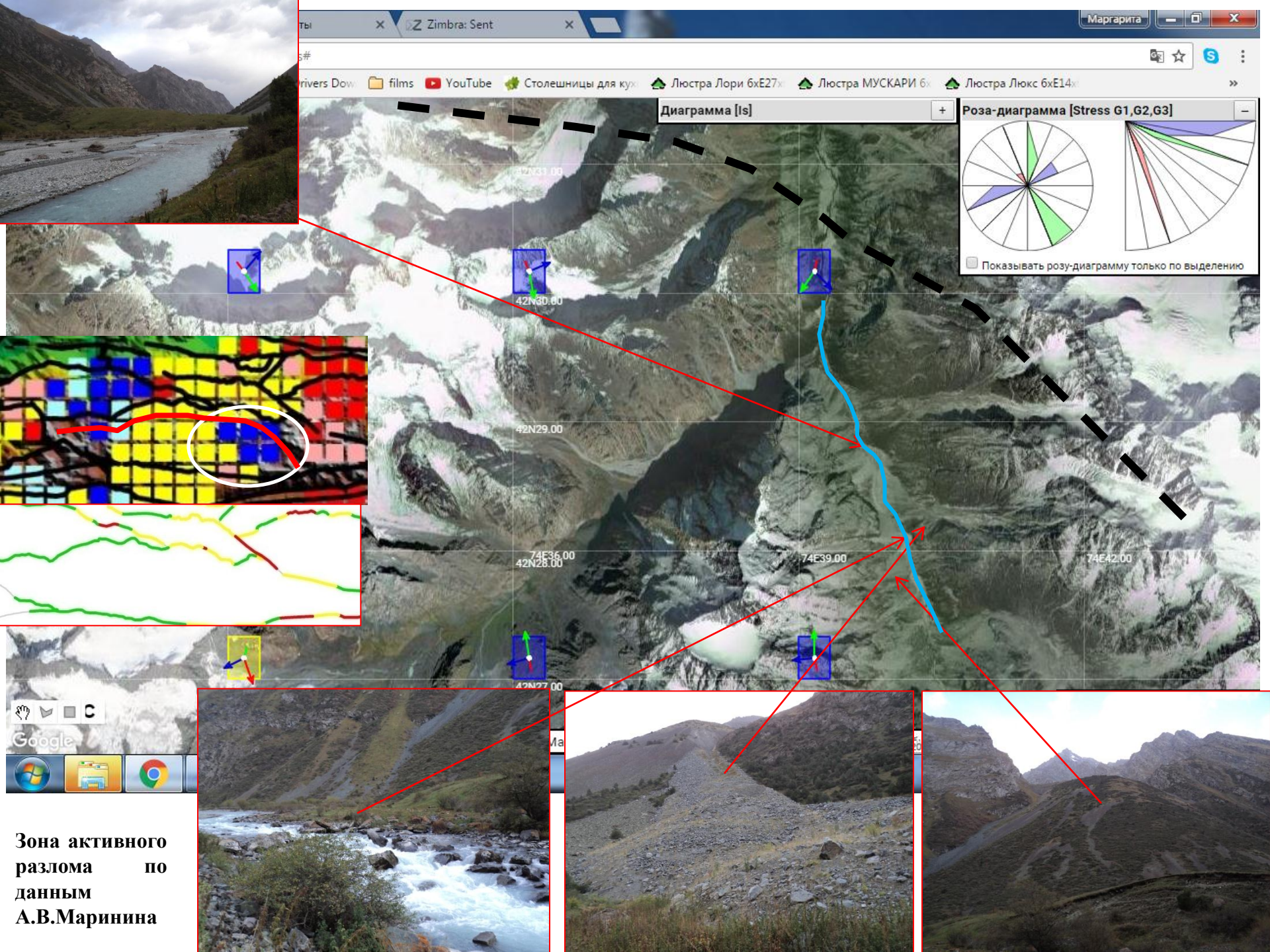


Верховой разлом

Данные о геодинамическом типе напряженного состояния позволили выявить на северном склоне Киргизского хребта в междуречье **Аламедин – Сокулук** активный безымянный разлом - «Верховой» (погружение на юг , угол 40 град).

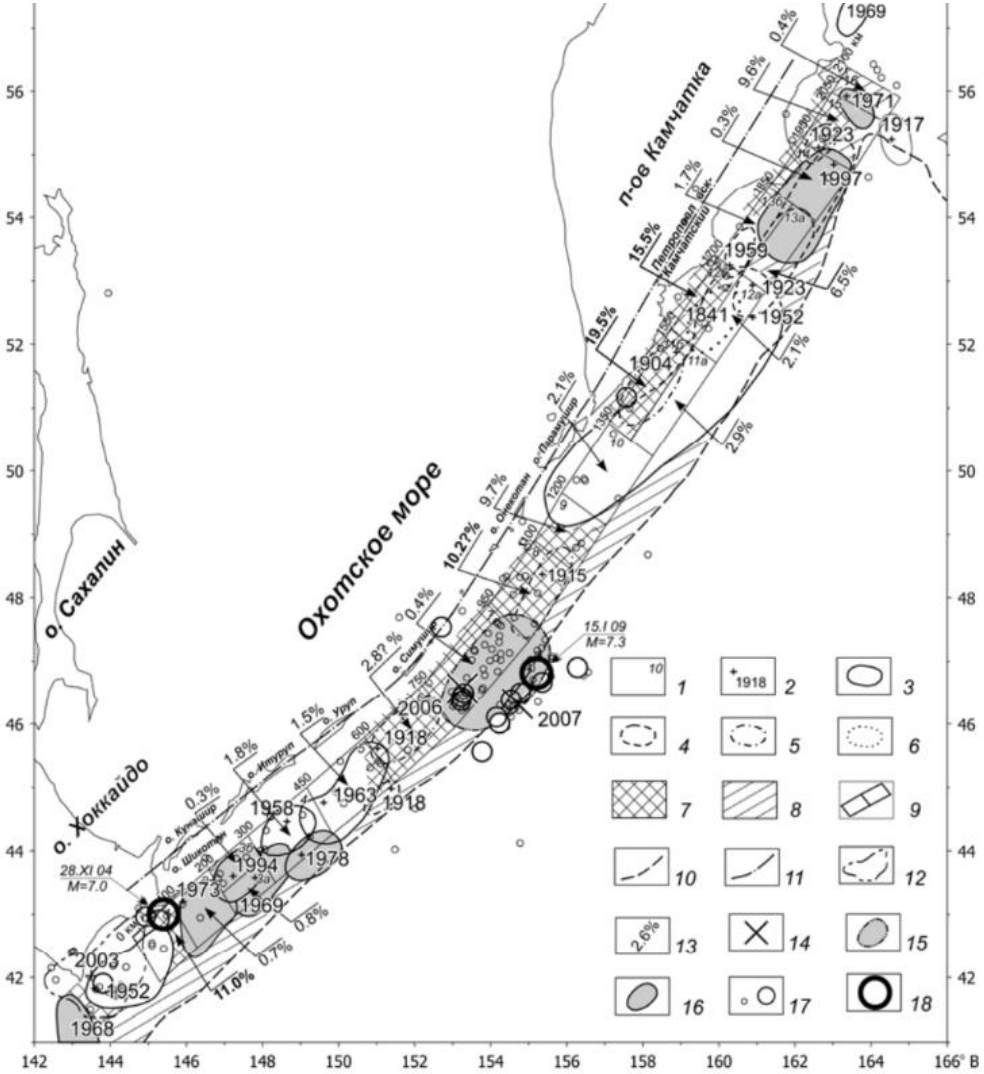
Зоны горизонтального растяжения характеризуют сектора растяжения правосдвигового разлома по Д.Н.Осокиной [1987].

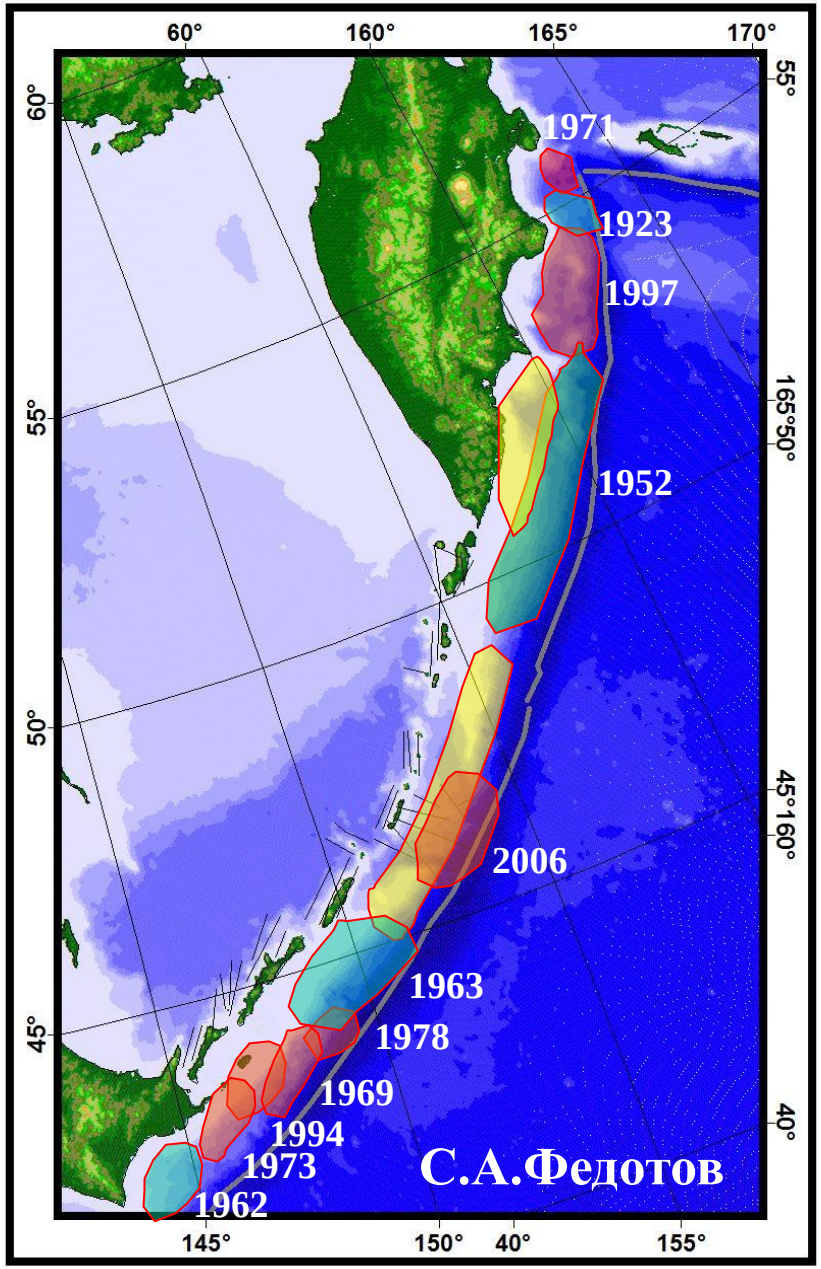




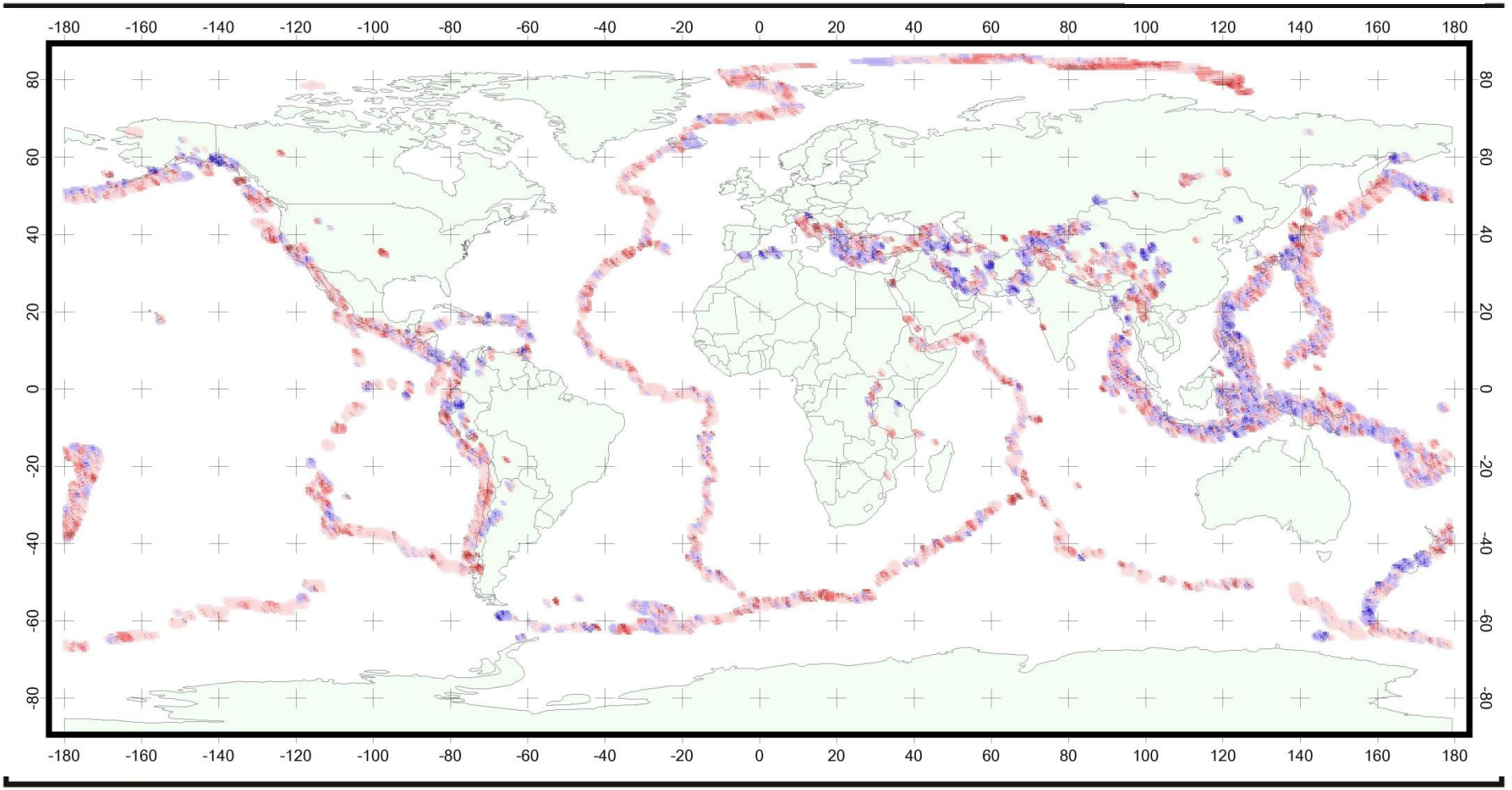
Зона активного разлома по данным А.В.Маринина

Сейсмические Бреши 1 рода для Курило-Камчатской сейсмофокальной области





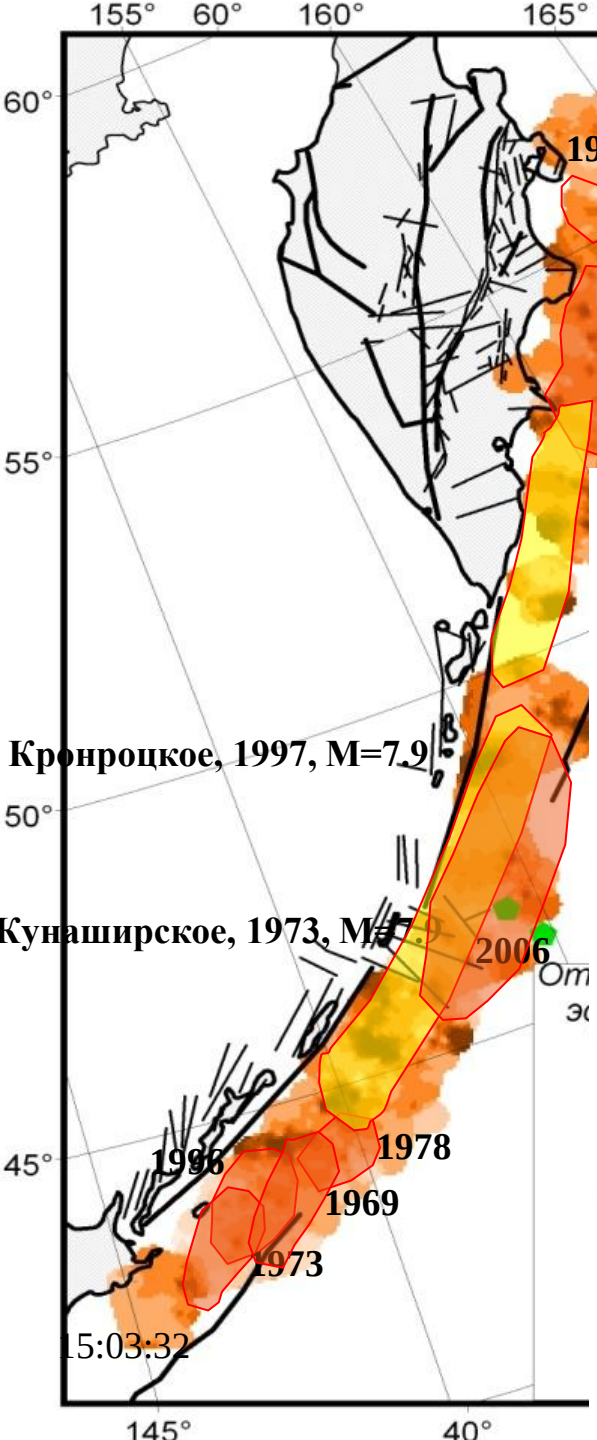
Поле глобальных напряжений напряжение горизонтального сжатия нормированное эффективное давление

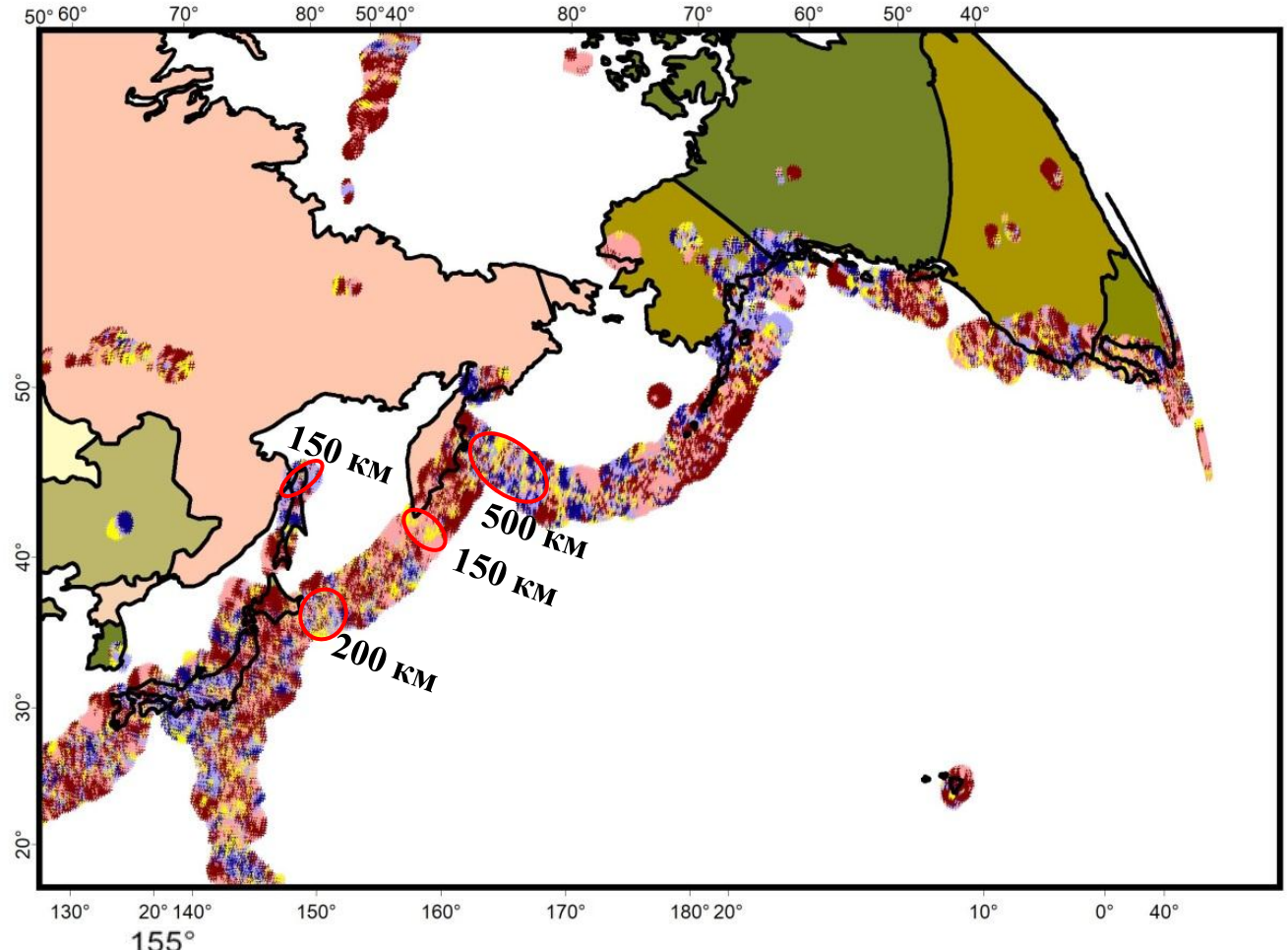


35000 фокальных механизмах землетрясений каталога Global CMT Project (4.0<=M<=6.5) для верхнего слоя литосферы 0-60 км

Уже произошедшие землетрясения игнорировали области высокого уровня напряжений.

Можно предположить, что выделенные ранее С.А.Федотовым области в Средних Курилах и для северного сегмента Камчатки могут быть реализованы в виде нескольких





15:03:32
15-05-18 05:33

Прогноз землетрясений

- Существует положительный опыт среднесрочного прогноза **региональных среднесильных** (M = 5.0-6.0) землетрясений в Иркутске и на Камчатке.

- Тектонофизические исследования природного напряженного состояния показали существование особой закономерности в области подготовки **мегаземлетрясений** (M > 8.0), происходящих в переходных зонах, что позволяет говорить о возможности долгосрочного прогноза. Для таких землетрясений также можно указать пути среднесрочного прогноза.

- Вероятно самой большой сложностью является прогноз места **сильных землетрясений** с 6.5 < M < 8.0.

- Развитие технологий прогноза землетрясений не должно происходить **без развития фундаментальных знаний** о закономерности формирования очага.

Что следует из существующих моделей подготовки очага землетрясения

1. Область подготовки сильного землетрясения представляет собой область наибольших значений максимальных касательных напряжений (в сравнении с окружающими областями), способных спровоцировать начало процесса лавинообразного нарастания дефектов (ЛНТ - модель) или дилатансионные процессы (упрочнение) и последующее изменение флюидного режима (ДД - модель).

2. Магнитуда землетрясения прямо связана с линейным размером области высоких значений напряжений, которую на стадии упрочнения следует рассматривать как жесткое включение, накапливающее энергию в упругих деформациях.

3. Величина сбрасываемых напряжений и сейсмическое излучение тем больше, чем выше значения напряжений в области подготовки землетрясения.

Прогностические характеристики

1. Участок наиболее высоких значений напряжений (центральная часть области подготовки) на стадии упрочнения определяет формирование области сейсмического затишья.

2. На начальной стадии локализации деформаций, а также стадиях упрочнения и последующего разупрочнения должны фиксироваться аномалии в перемещениях поверхности, масштаб проявления которых также отражает магнитудный уровень готовящегося землетрясения.

3. Изменение напряженно-деформированного состояния в области подготовки землетрясения должно отражаться в пространственных и временные аномалиях: электросопротивления, скорости сейсмических волн, уровня и химического состава подземных вод, электромагнитных параметров и др. косвенных предвестниках.

Liu Y. and Rice J. R. 2005
Aseismic slip transients emerge spontaneously in three-dimensional rate and state modeling of subduction earthquake sequences, *J. Geophys. Res.*.

Численное моделирование в условиях **Rate&State** зависимости трения показало возможность спонтанного возникновения асейсмического **переходного процесса ускоренного скольжения**, похожего (скорость скольжения и диапазон глубины залегания и др.) на наблюдаемые в зонах субдукции.

Установлено, что как **сейсмическому событию**, так и **ползучести на разрыве** предшествует **локализация скольжения** в узкой зоне разлома.

Локализованный участок оригинального асейсмического скольжения развивается и медленно увеличивается в размерах. Затем **за короткое время по сравнению с сейсмическим проскальзыванием** происходит переход от очень медленного проскальзывания **к сейсмическим скоростям**.

Показано, что вариация определяющих параметры модели (скорость скольжения и параметры состояния) позволяет получить не только **переход от медленного скольжения к сейсмическому событию,** но и объяснить другие нестандартные землетрясения: медленные, тихие землетрясения и др.

Ассейсмические зоны ускоренного скольжения называются **зонами нуклеации**.

- **Geller RJ, Jackson DD, Kagan YY, Mulargia F (1997) Earthquakes Cannot Be Predicted. Science 275: 1616.**

- **Для того чтобы крупные землетрясения были предсказуемыми, они должны быть необычными событиями, происходящими из конкретных физических состояний**. Тем не менее, консенсус недавнего совещания [HN5] (5) заключался в том, что Земля находится в состоянии самоорганизованной критичности [HN16], где любое небольшое землетрясение имеет некоторую вероятность каскадирования в большое событие.
- Картина предполагаемых предвестников, как правило, сильно варьируется от одного землетрясения к другому, и **предполагаемые аномалии часто наблюдаются только в одной точке, а не во всем эпицентральном регионе. ….. Поэтому представляется неразумным вкладывать значительные средства в мониторинг возможных прекурсоров**

- R.I.P. Yan. Y. Kagan 2011
- Модель сейсмической бреши (Федотов) была использована для прогнозирования крупных землетрясений в районе Тихоокеанского побережья. Однако тестирование этих прогнозов в 1990-х годах и позднее показало, что они выполнялись хуже, чем случайные прогнозы Пуассона (см. Rong et al., 2003 и ссылки там). Аналогичным образом, модель характерного землетрясения не выдержала статистических испытаний (см. Jackson and Kagan, 2011, и ее ссылки).

- **Liu, Y., and J. R. Rice (2005),**
- **Это говорит о том, что районы с пониженной интенсивностью блокировки, которые естественным образом возникают из-за неоднородности вдоль простирания истории скольжения, которая развивается, могут стать потенциальными местами зарождения будущих крупных сейсмических событий.**
- **Хотя в некоторых сейсмогенных зонах интенсивность блокировки снижается, вдоль простирания имеются длинные области, в которых переходная зона становится более жестко заблокированной после появления ряда переходных процессов. Поэтому может стать более трудным для большого сейсмического события зародиться вблизи нисходящего конца таких частей сейсмогенной зоны**
- Rachel E. Abercrombie1 and James R. Rice 2005
- локализованная область первоначально асейсмического скольжения развивается и медленно увеличивается в **размерах в течение времени, которое значительно длиннее, чем сейсмическое скольжение. Затем за короткое время по сравнению с сейсмическим скольжением происходит переход от очень медленных**