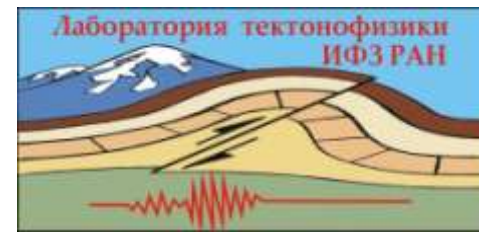




Д.ф.-м.н., Ребецкий Ю.Л., reb@ifz.ru

Москва, ИФЗ РАН, лаб. *Тектонофизики*

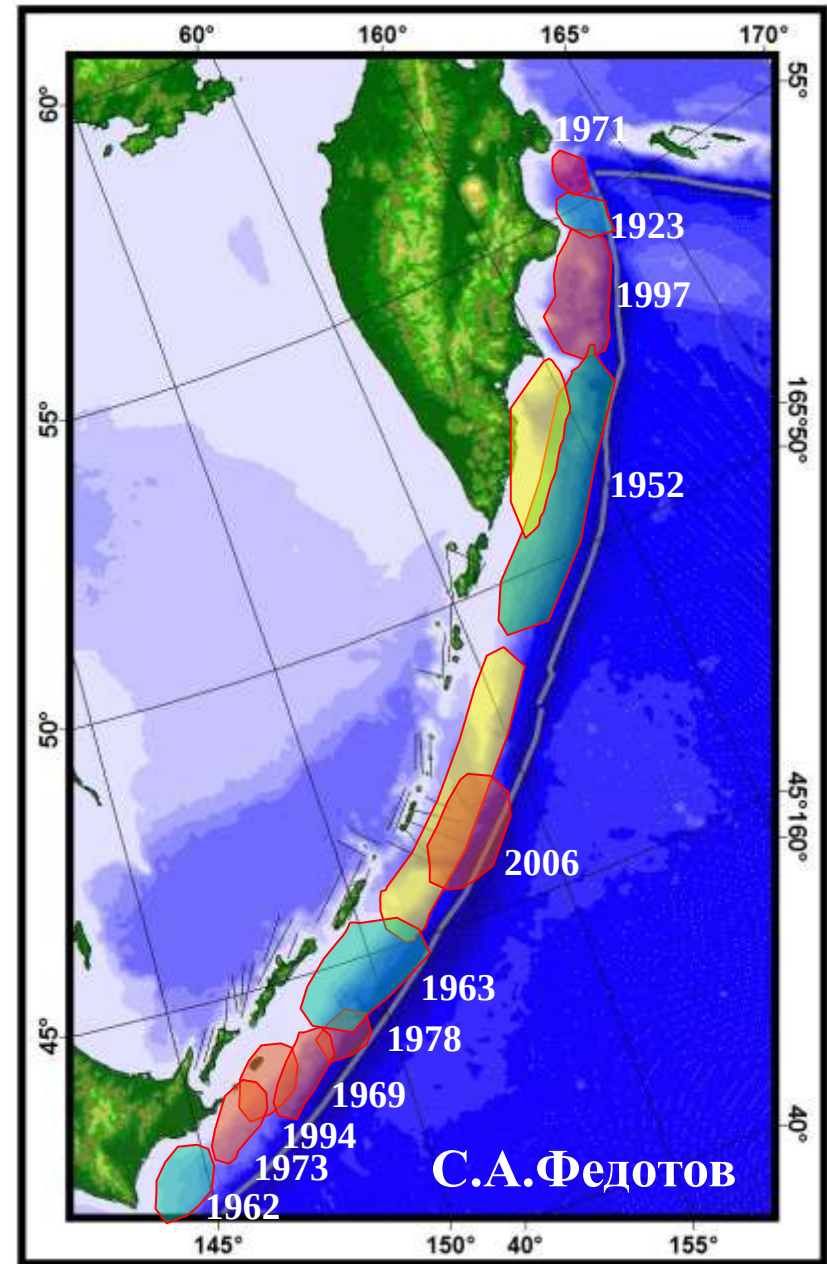
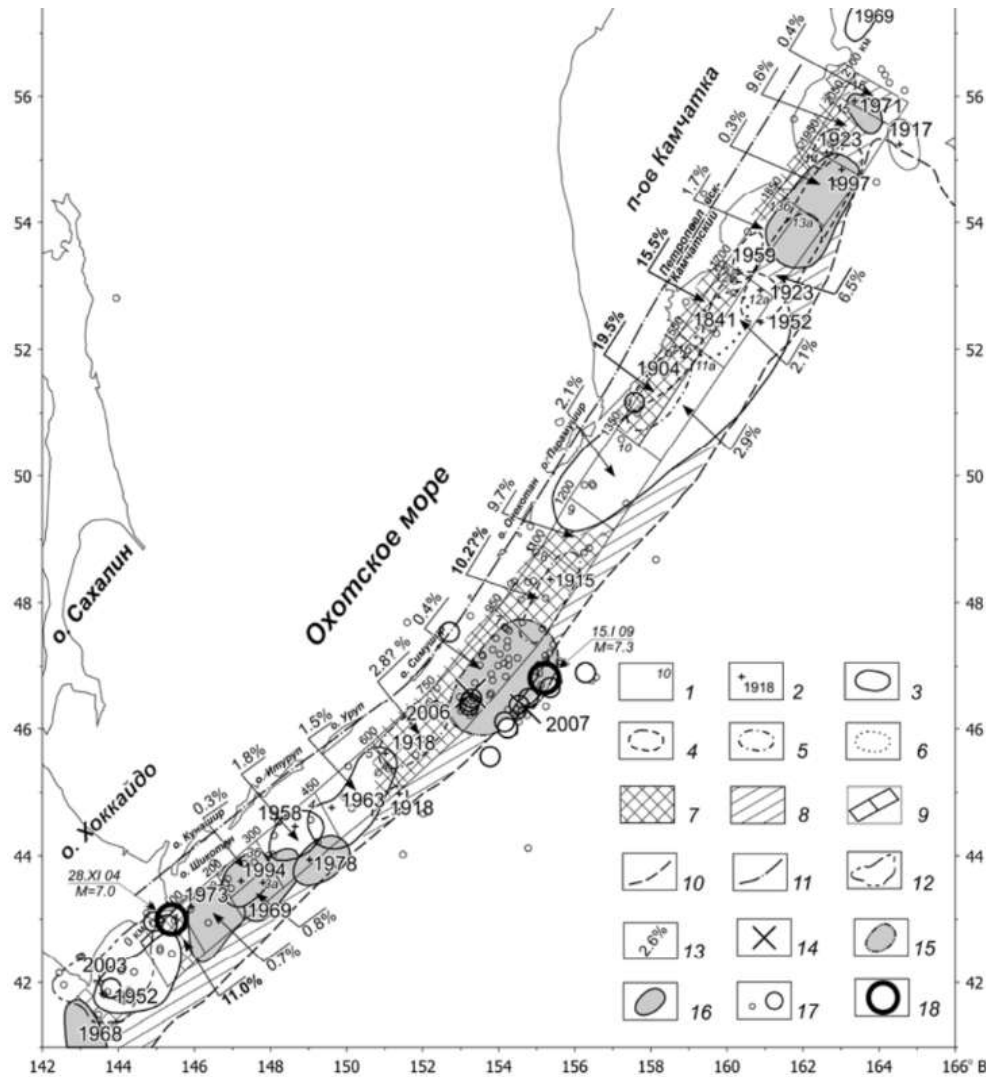


ВОЗМОЖНОСТИ ТЕКТОНОФИЗИКИ В ВЫДЕЛЕНИИ УЧАСТКОВ КОРЫ, ОПАСНЫХ ДЛЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ



12:26:00

Сейсмические Бреши 1 рода для Курило-Камчатской сейсмофокальной области



Мегаземлетрясения

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

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.

**Современное понимание
структуры очага землетрясения
и состояния сейсмогенного разлома**

«Асперити Модель» очага землетрясения

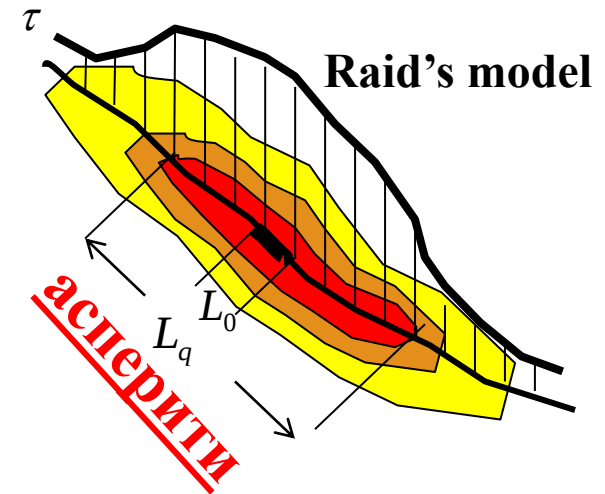
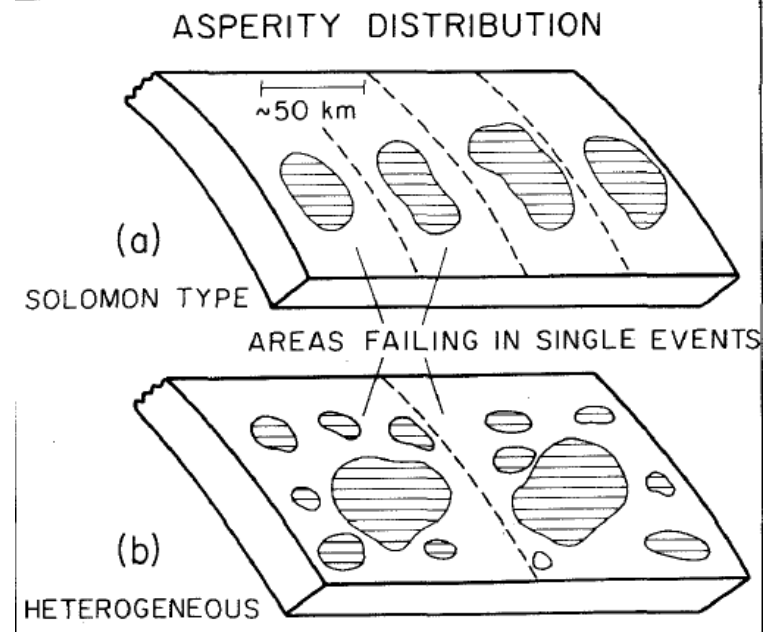
В зонах асперити согласно **теории Rate & State** трение повышенное, замедляющее скорость скольжения на разломе [Scholz, 1998].

Считается, что землетрясения **в зонах субдукции** лучше соответствуют модели неровностей [Lay и Kanamory, 1980].

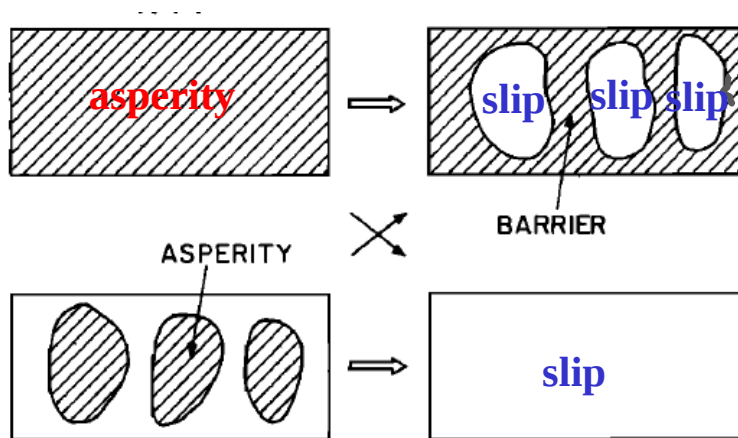
В этом случае в области очага землетрясения имеет место **повышенный уровень напряжений (жесткое включение)**, который снижается к его периферии.

Эта модель совпадает с **идеями Рэйда**, связывающей место будущего землетрясения с областью накопления упругой энергии сдвига (формоизменения).

Размер области **высокого уровня напряжений** прямо связывают с магнитудой землетрясения.



Концепция «Модели Барьеров»



В рамках приложения этой модели к очагу сильного землетрясения большая часть очага является **зоной пониженной прочности** (мягкое включение), где идет скольжение.

В рамках «**Барьерной Модели**» считается, что криповое или квазикриповое движение вдоль разрыва запирается на небольшом участке, имеющем повышенное сцепление.

Поскольку вне барьерного участка смещение бортов вдоль разлома продолжается, то **вблизи барьера повышается уровень напряжений**. За пределами этого участка уровень напряжений остается пониженным.

Модель барьеров в разломах развивалась [Das, Aki, 1971; Mikumo, Miyatake, 1978] прежде всего для объяснения природы **афтершкового процесса**

Геомеханическое моделирование неустойчивого скольжения (переходный процесс) в переходных зонах

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.*

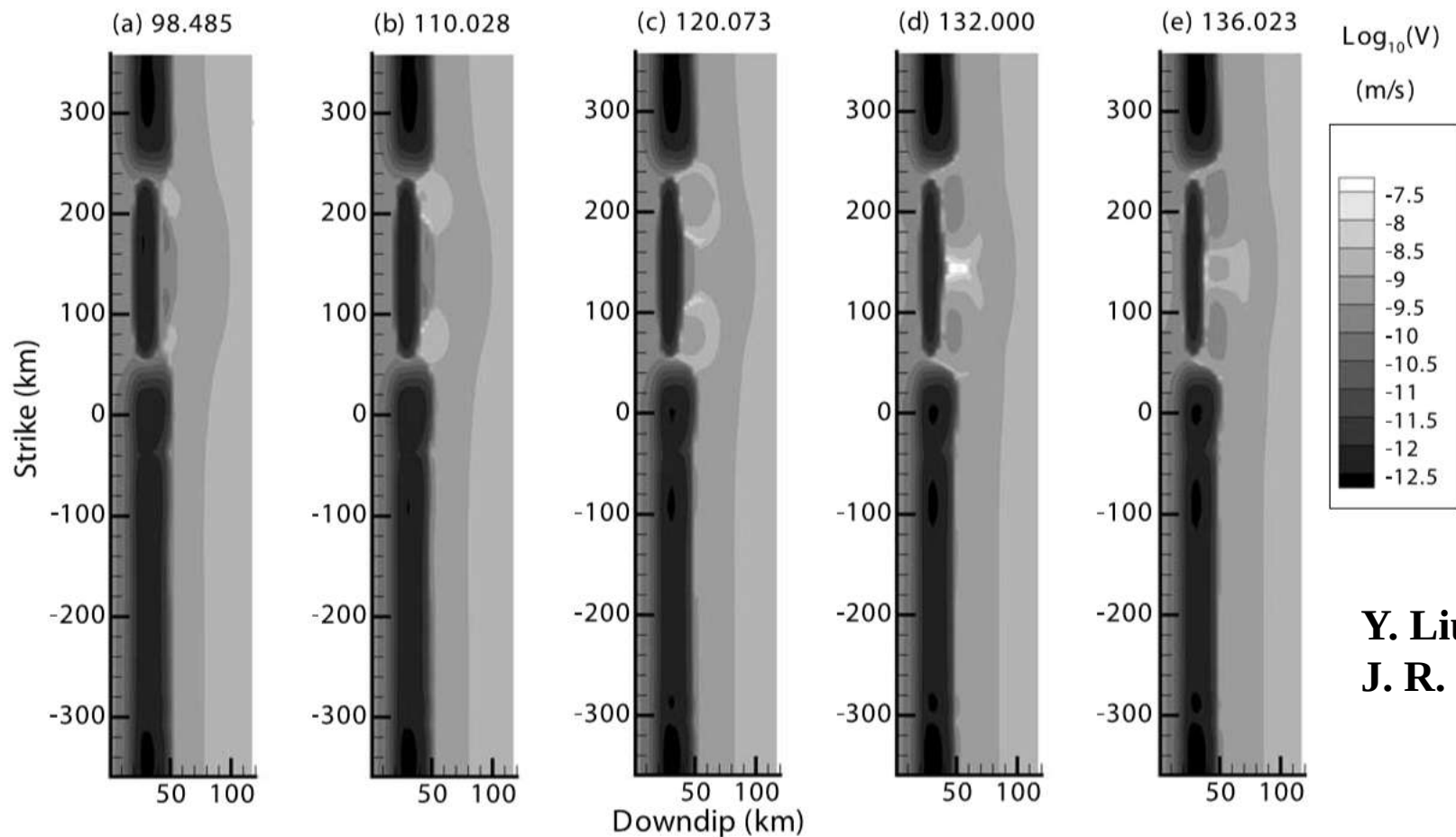
Численное моделирование в условиях **Rate&State** зависимости трения показало возможность спонтанного возникновения асейсмического **переходного процесса ускоренного скольжения**, похожего (скорость скольжения и диапазон глубины залегания и др.) на наблюдаемые в зонах субдукции.

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.

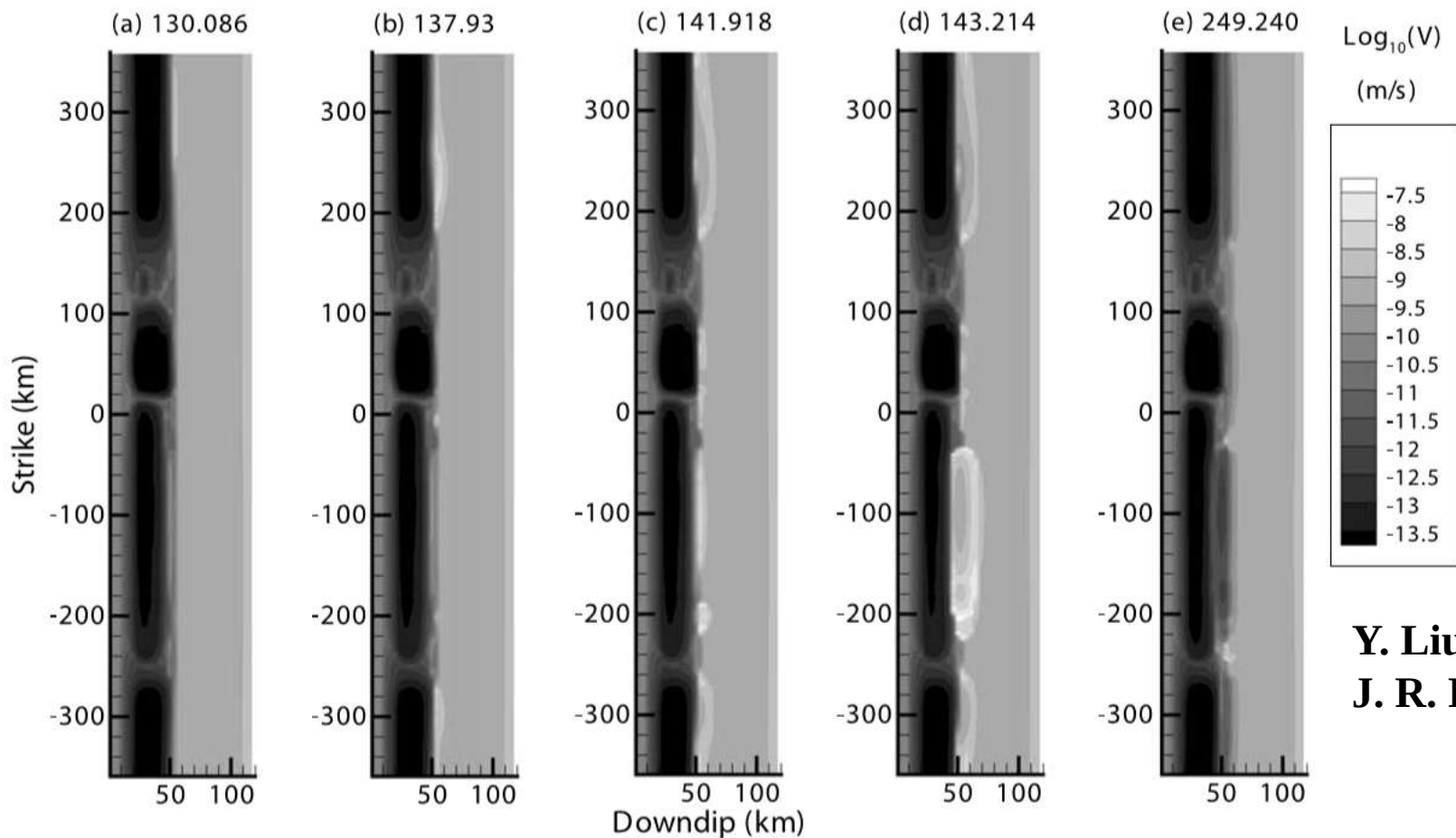
Асейсмические зоны ускоренного скольжения называются **зонами нуклеации**.



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

Переходный процесс начинается в промежутках между двумя прочно запертыми областями (а), 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.**

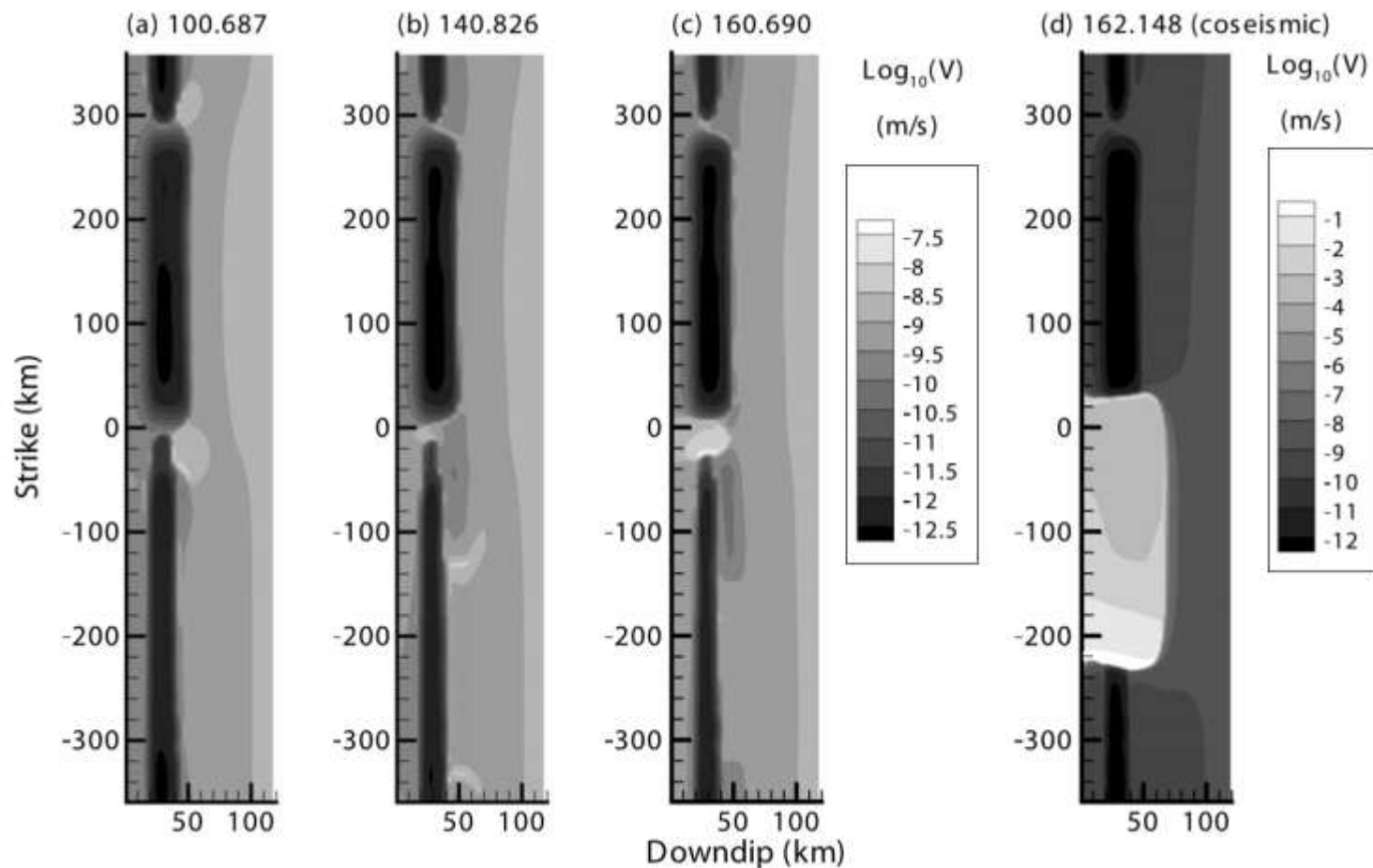
Средняя скорость миграции вдоль простирания составляет 3 км/год. Весь процесс ограничен глубинами ниже надежно запертого района 60 до 240 км. **Длительность процесса около 35 лет.**



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

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

Сейсмический "разрыв" распространяется вдоль простирания (д) на месте развития небольшого по длине переходного процесса (-100 км). Асейсмически "разорванные" области блокируются через 106 лет (е). **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)

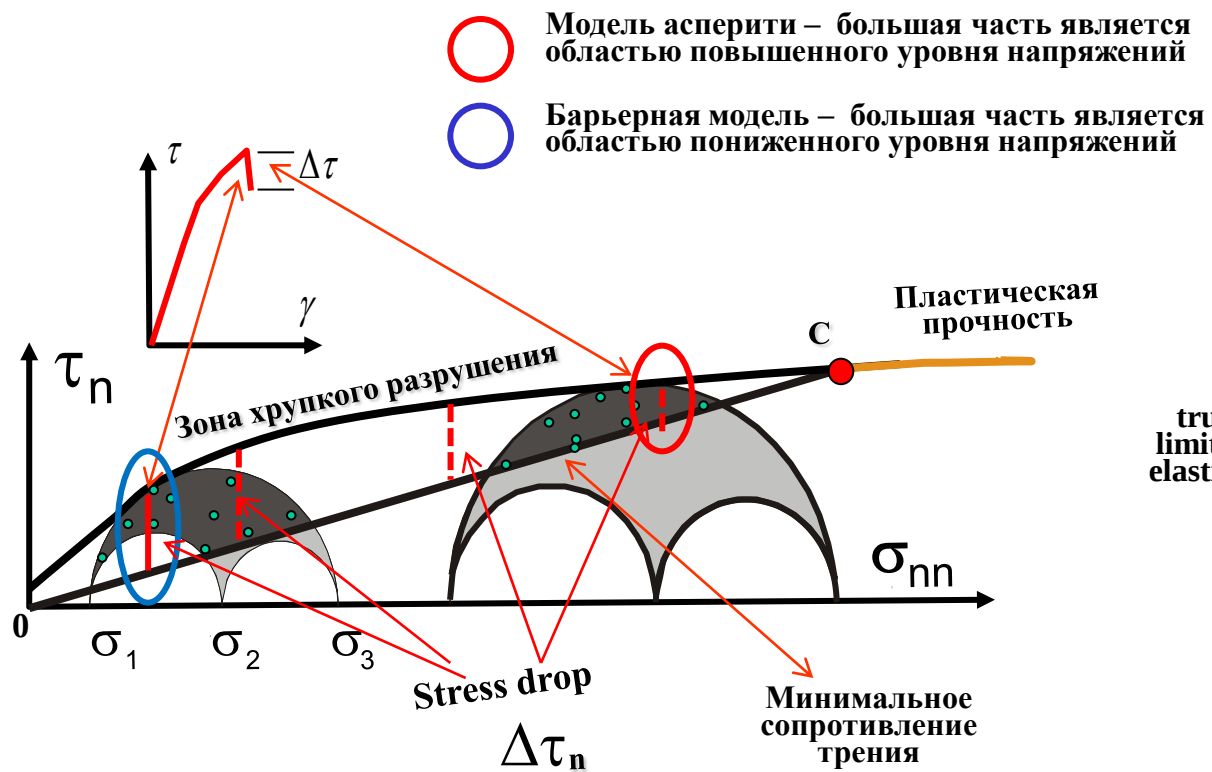
С позиции модели асперити за определенное время до землетрясения **шероховатость с низкой скоростью сейсмического скольжения** (10^{-11} - 10^{-12} м/сек) **превращается в свою противоположность** — зону асейсмического ускоренного скольжения (10^{-7} - 10^{-8} м/сек) со сниженным уровнем напряжения.

Ю.Л. Ребецкий (2019)

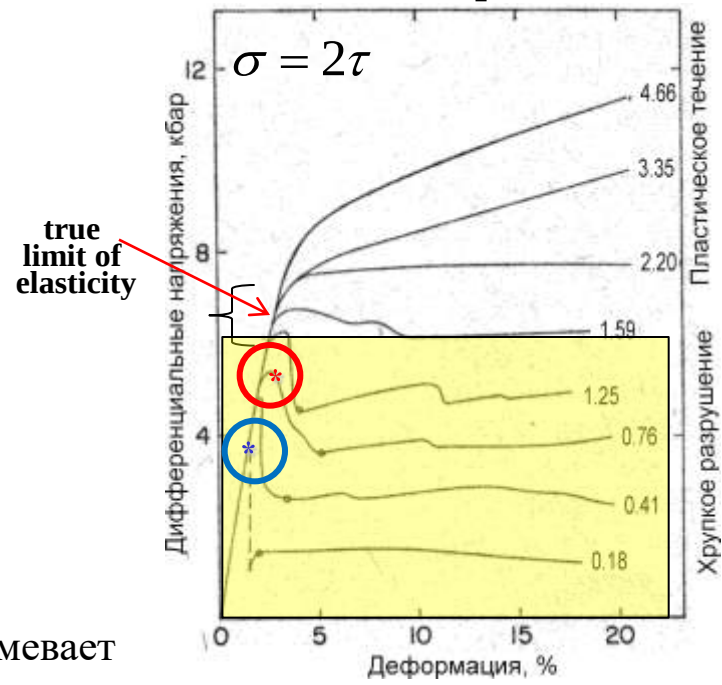
Актуальные модели очага на диаграмме Мора

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.



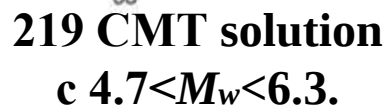
Loading diagram at lateral compression



Существование сейсмических событий автоматически подразумевает

Результаты тектонофизических исследований сейсмоактивных регионов

Western Wing of the Sunda's Arc



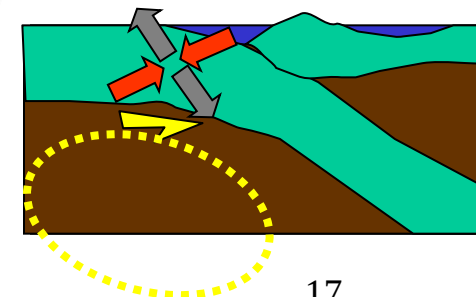
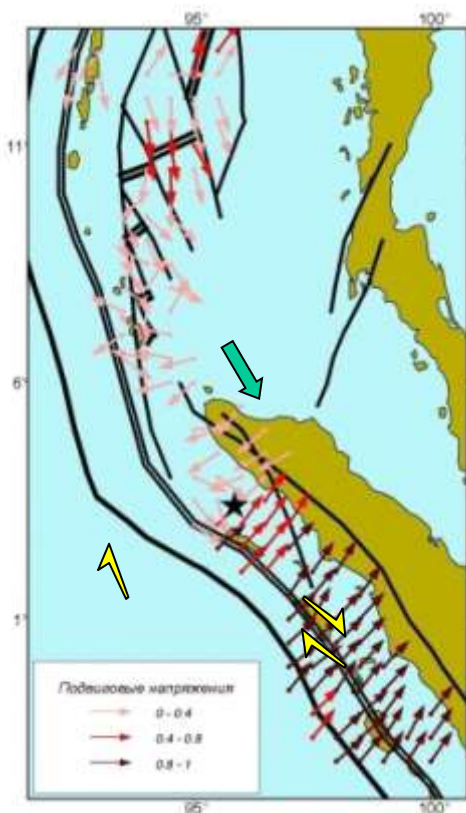
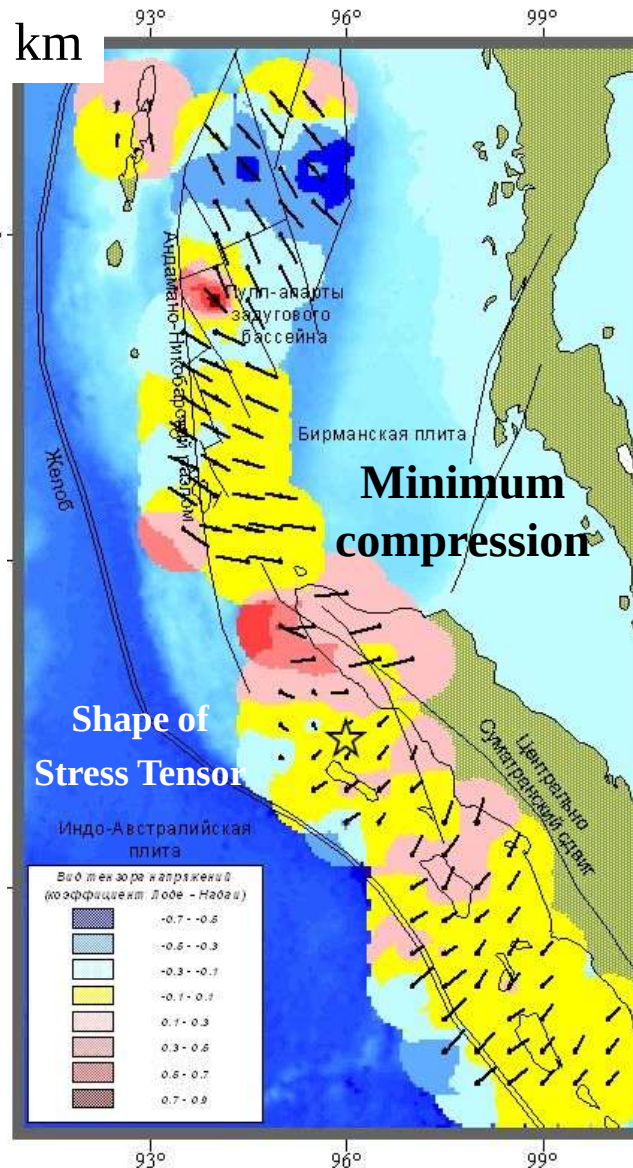
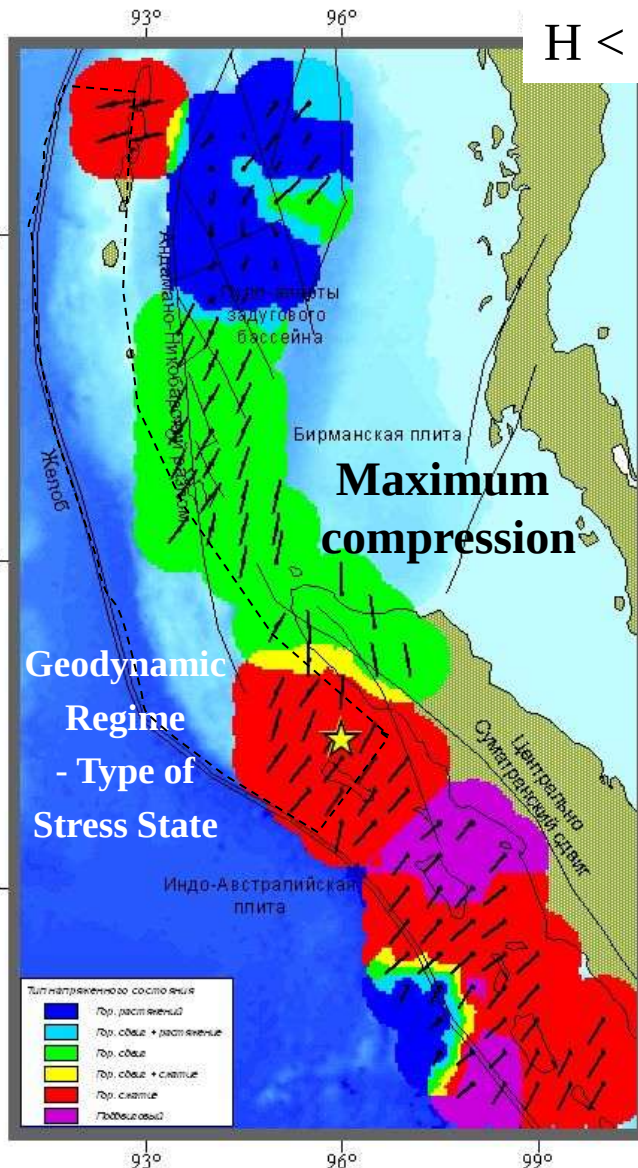
80 CMT solution
c $4.9 < M_w < 6.5$.



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

Underthrusting
shear stresses

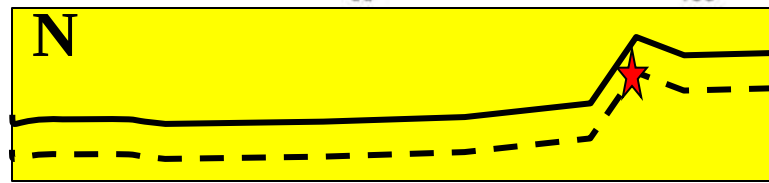
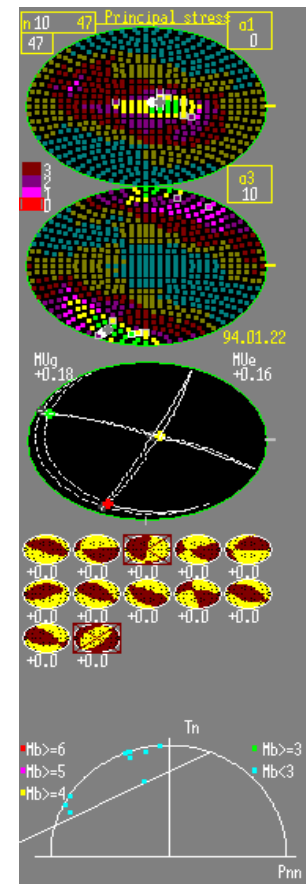
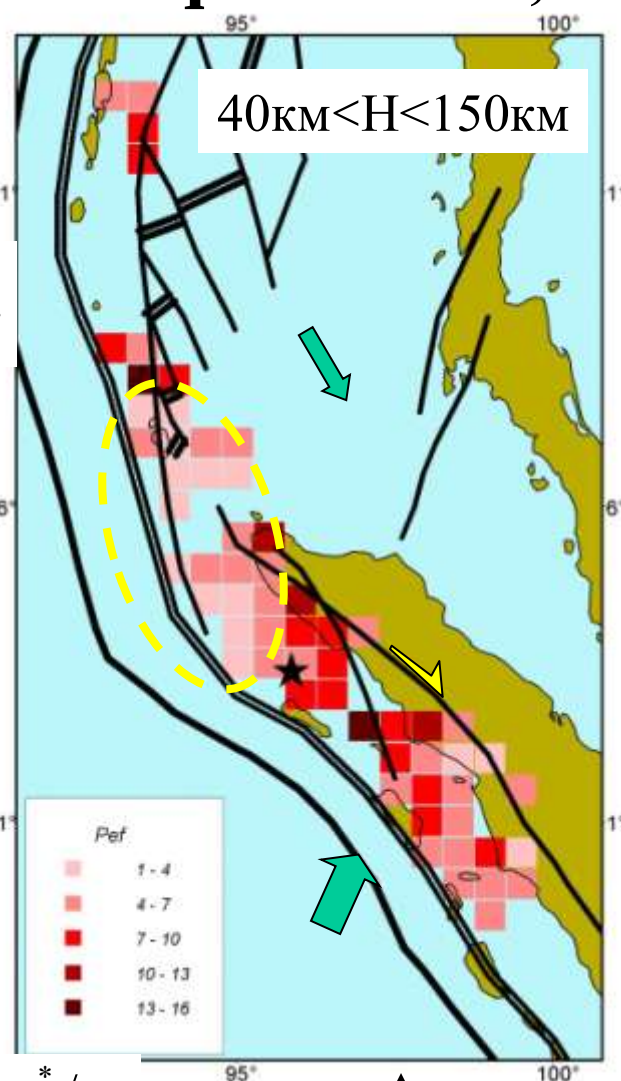
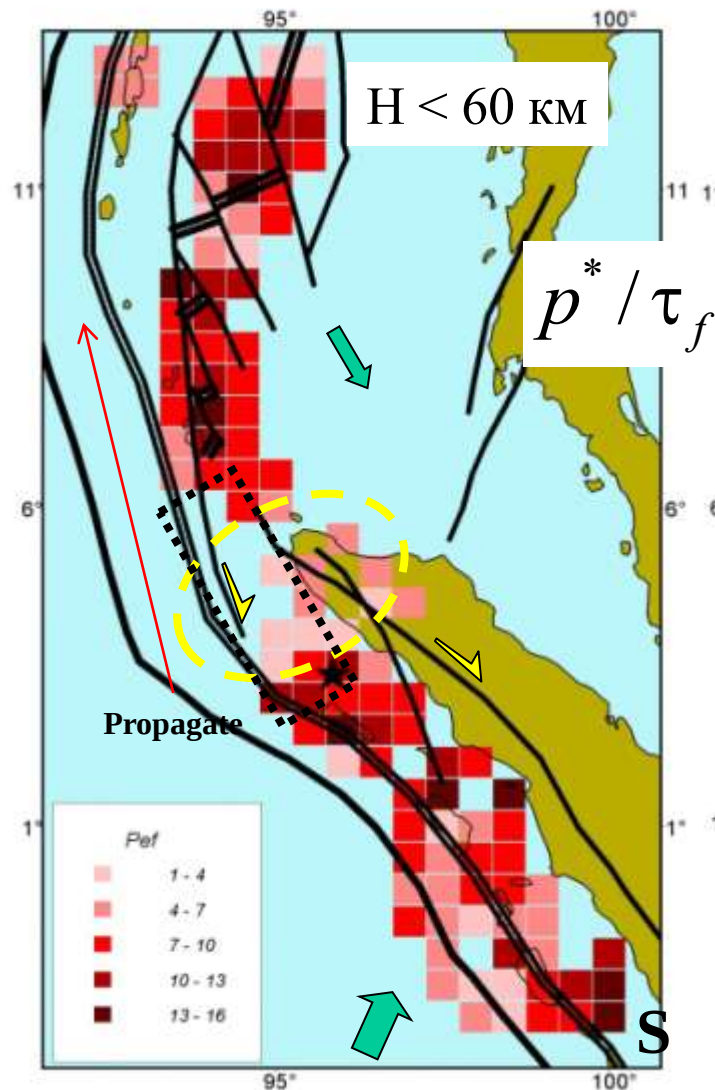
$H < 60 \text{ km}$



12:26:00

17

Sumatra-Andaman earthquake 2004, M=9.1

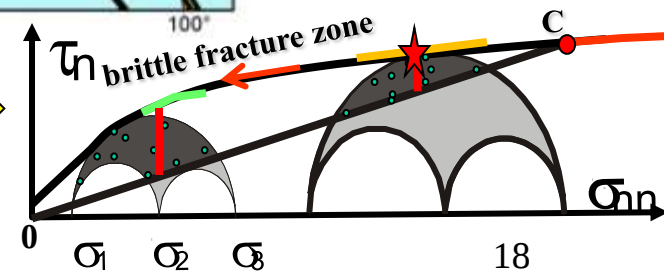


12:26:00

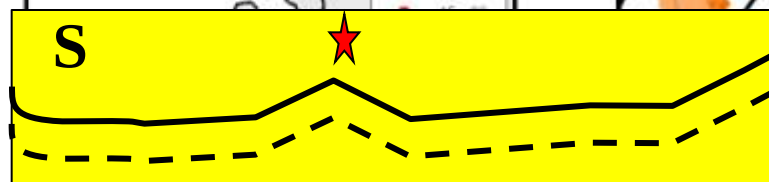
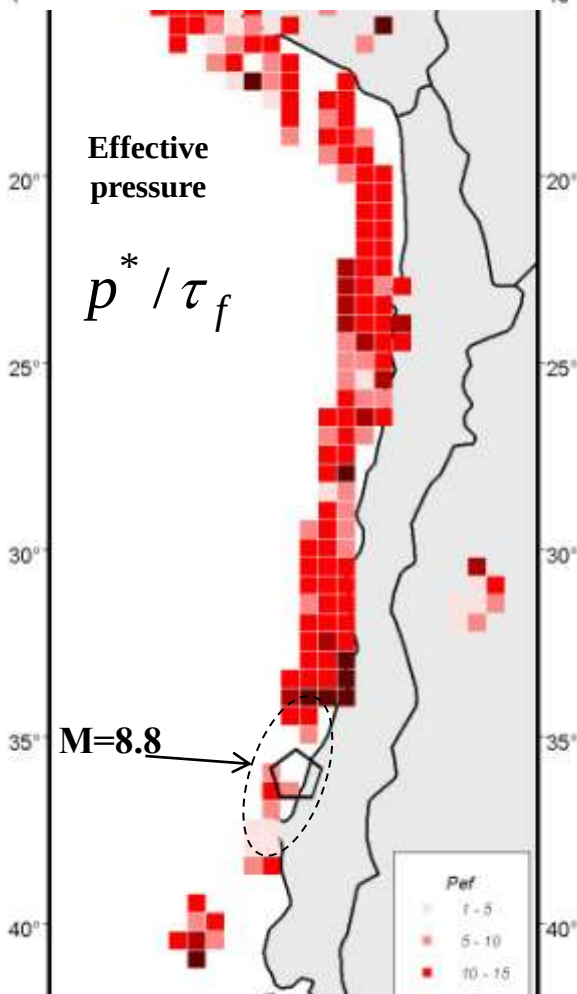
p^* / τ_f

τ / τ_f

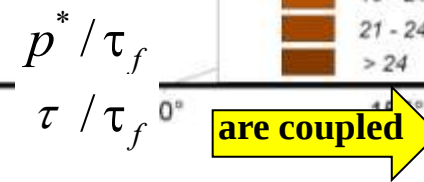
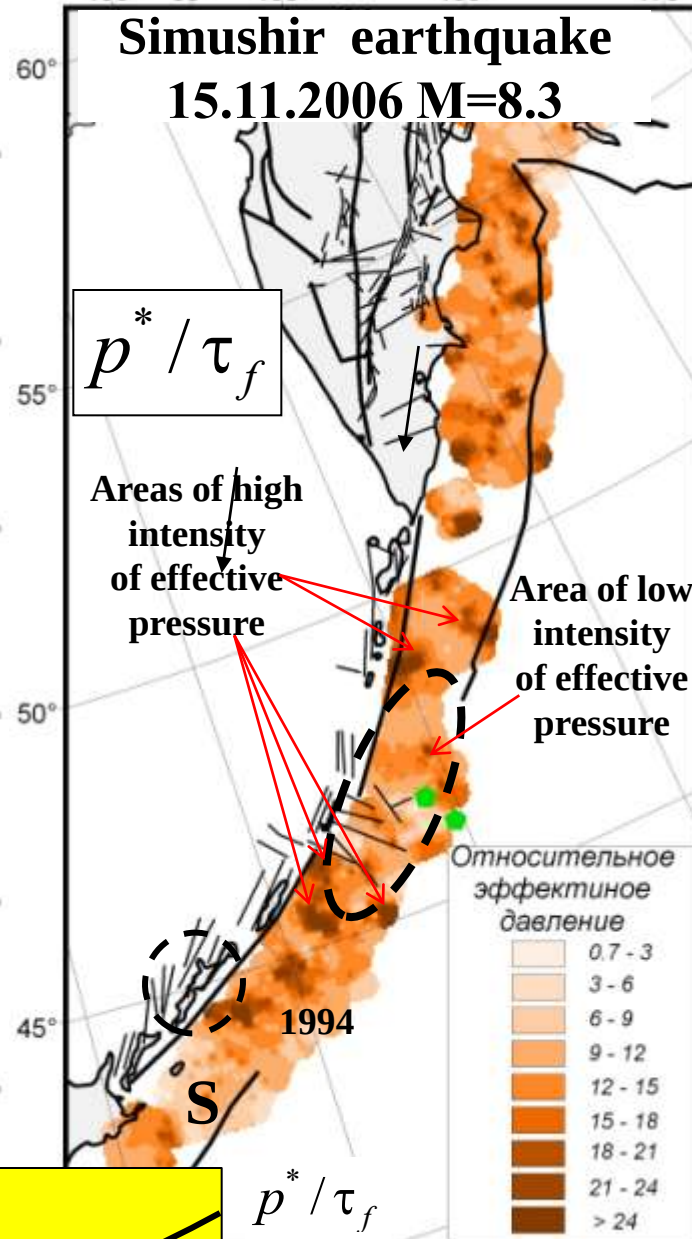
are coupled



Maule (Chile) earthquake 27.02.2010 M=8.8



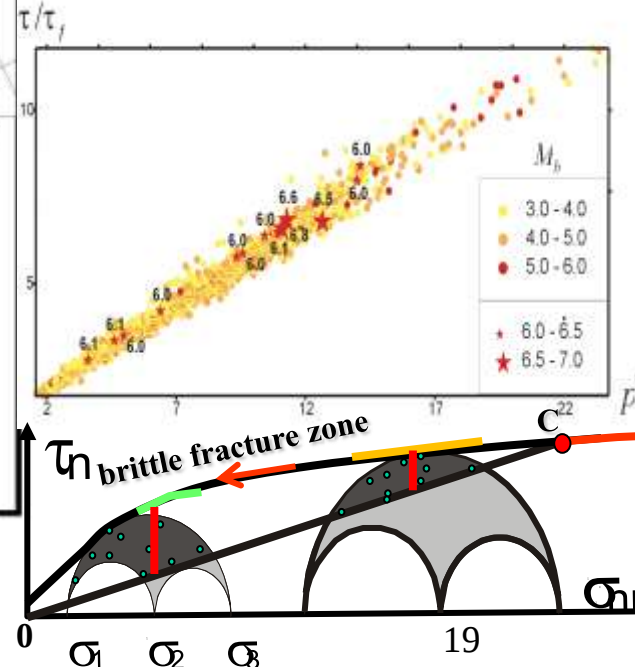
Simushir earthquake 15.11.2006 M=8.3



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

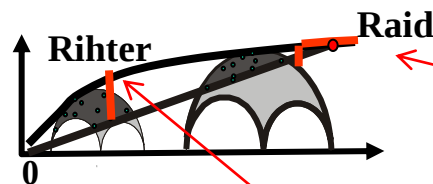
Землетрясения **средних магнитуд** игнорируют области повышенного уровня напряжений.

Averaging of stress
– 50-70 km



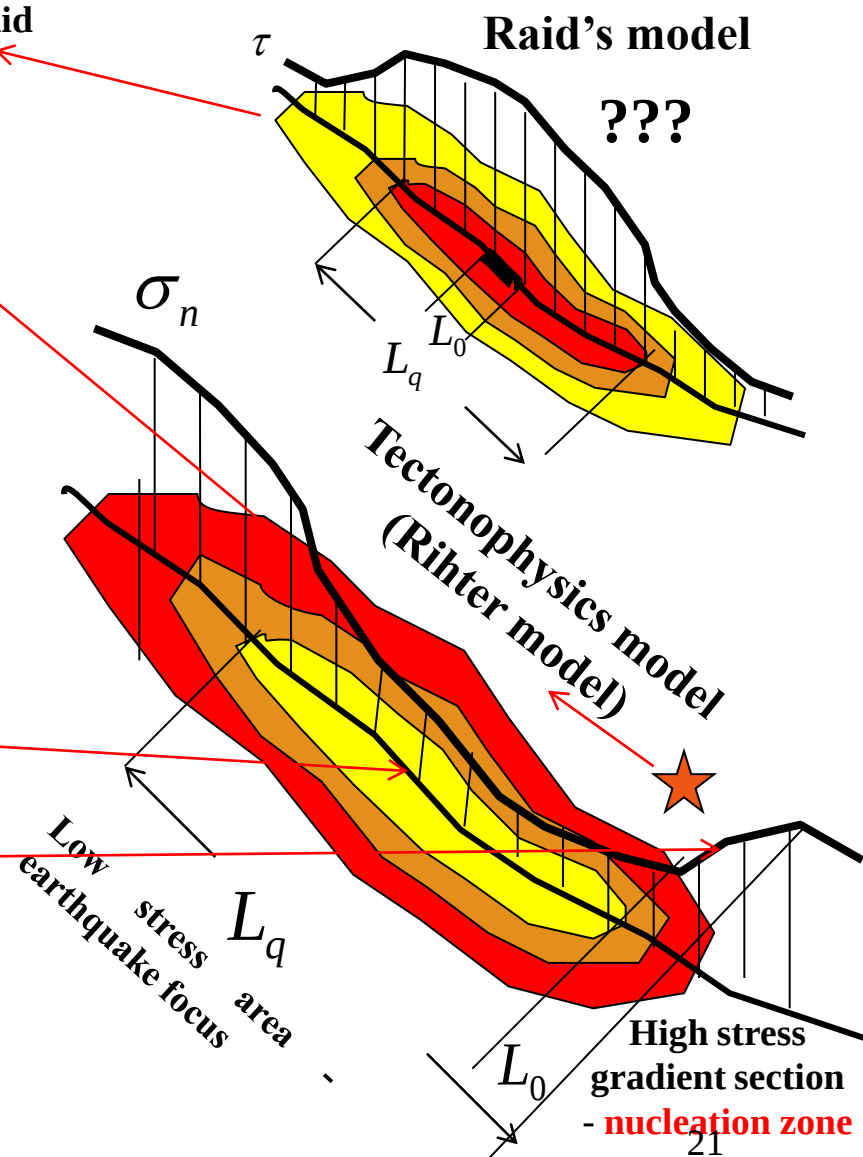
Одномерная модель подготовки очага катастрофического землетрясения

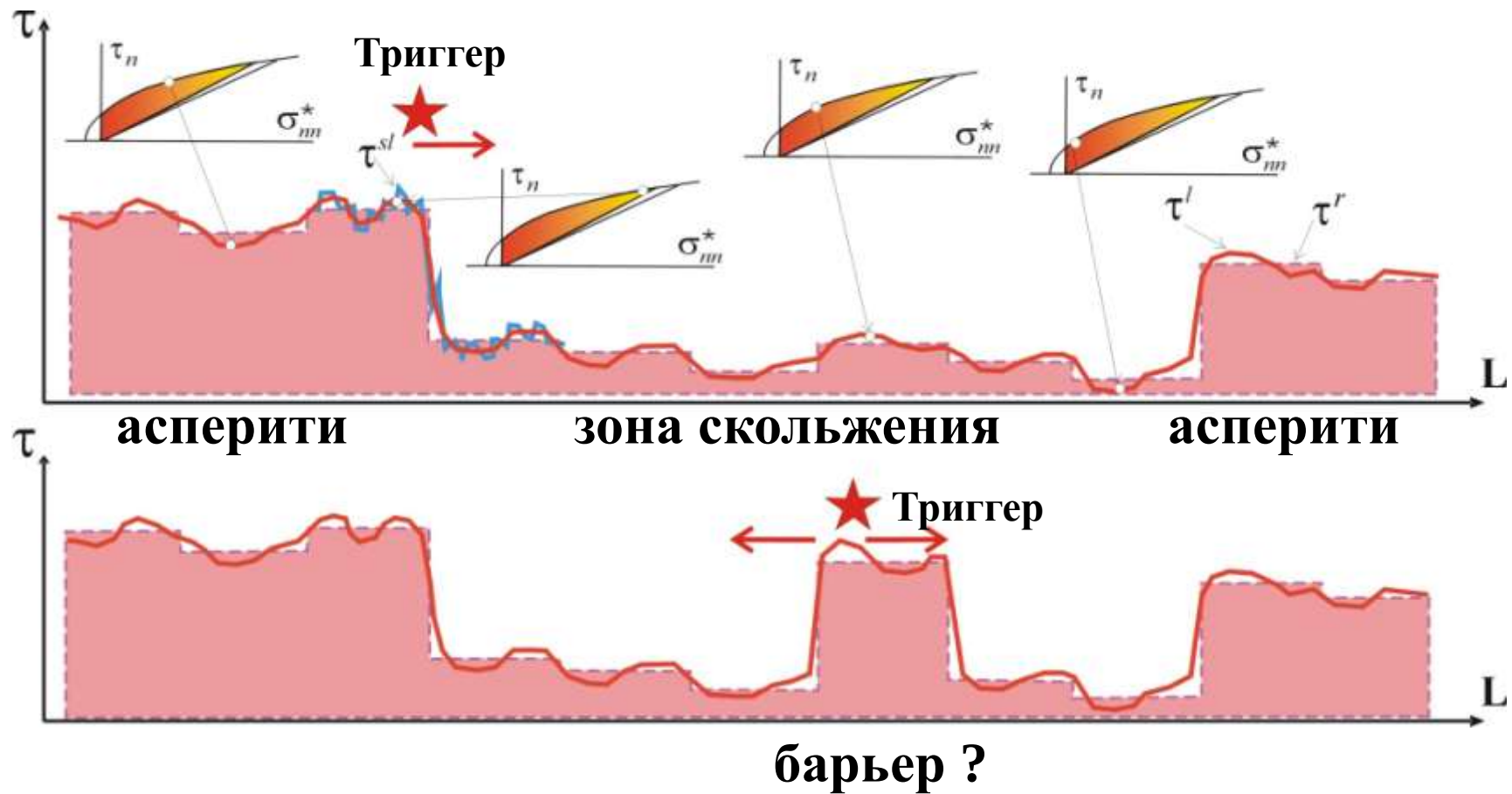
Одномерная тектонофизическая модель источника катастрофического землетрясения



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

- А. существование сильно **неоднородного напряженного состояния**, близкого к напряжению текучести (Кулона-Мора), вдоль разломной структуры регионального уровня.
- В. наличие большого региона (более 200 км) **среднего или низкого эффективного давления** - **мягкое включение** (модель Рихтера).
- С. формирование сегмента градиента напряжений высокого уровня (краевые или внутренние зоны фокуса) на **границе или внутри** очага - **зона нуклеации** ($L_q/10$).



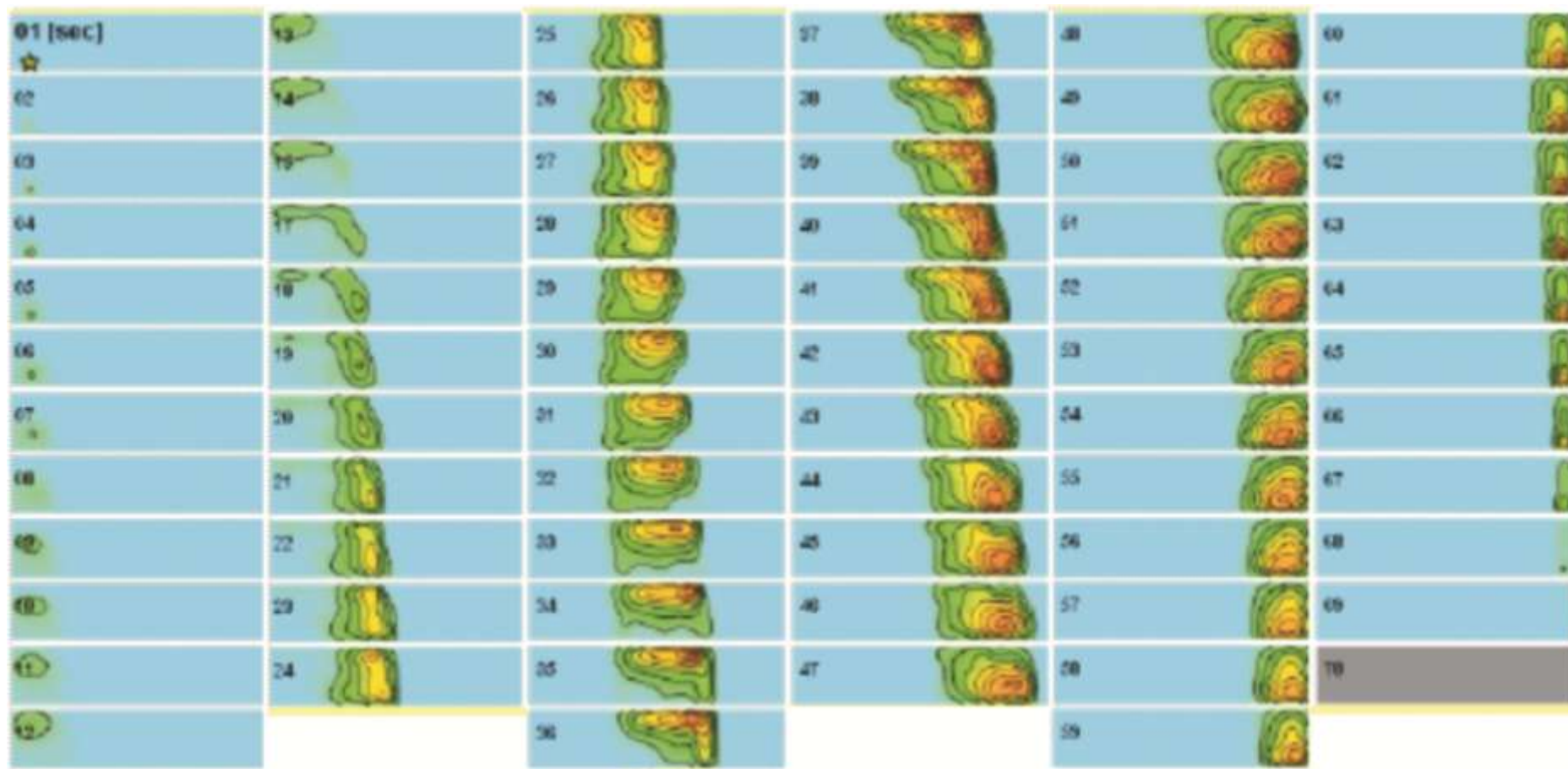


Протяженные зоны (200 и более км) высокого и низкого уровня эффективного давления связаны не с процессами в скольжения в зоне разлома, а **геологическими процессами в литосфере и нижележащей мантии** (Ребецкий, 2004, 2005)

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.

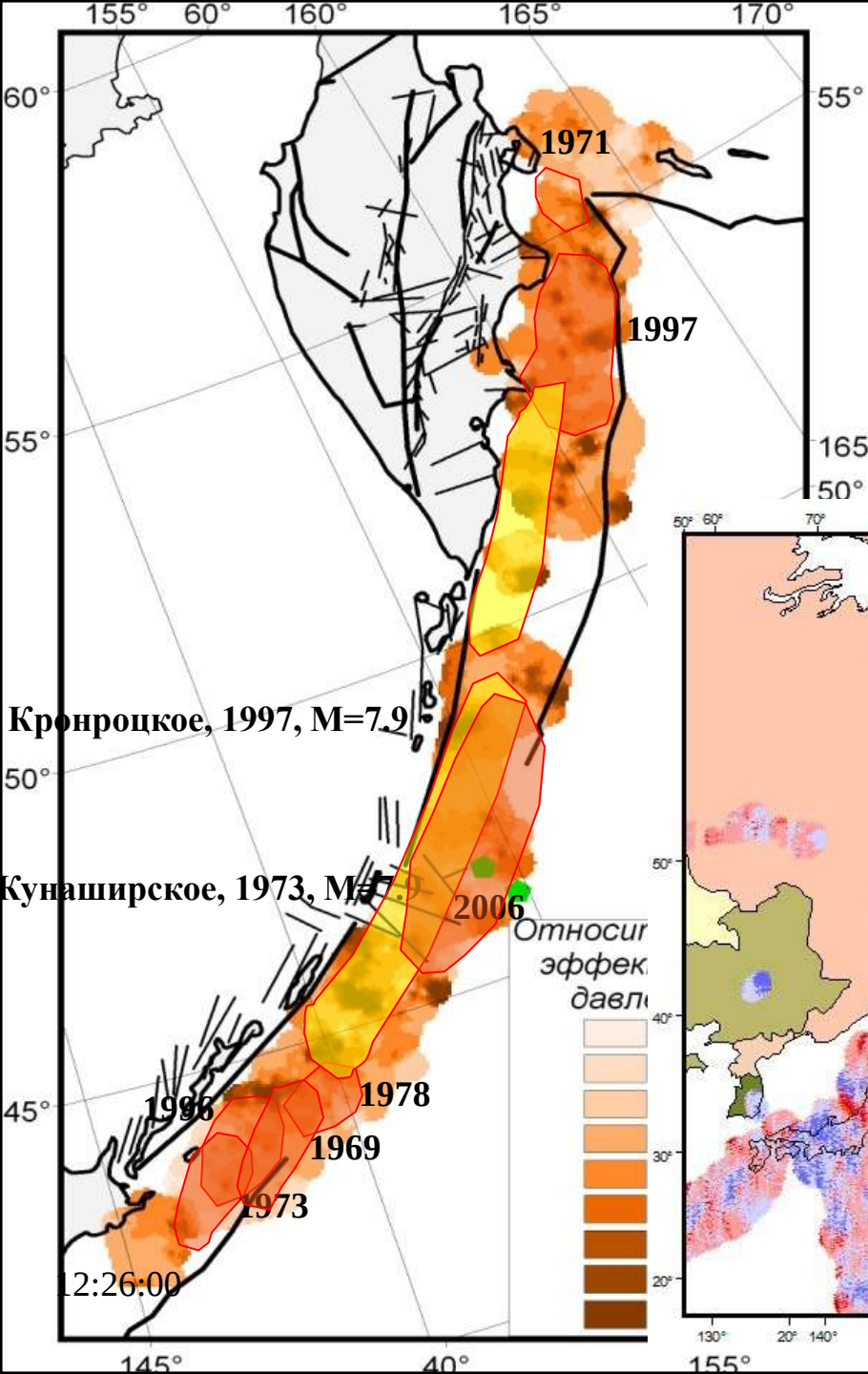
Y. Liu and J. R. Rice (2005)

Динамика в очаге мегаземлетрясения



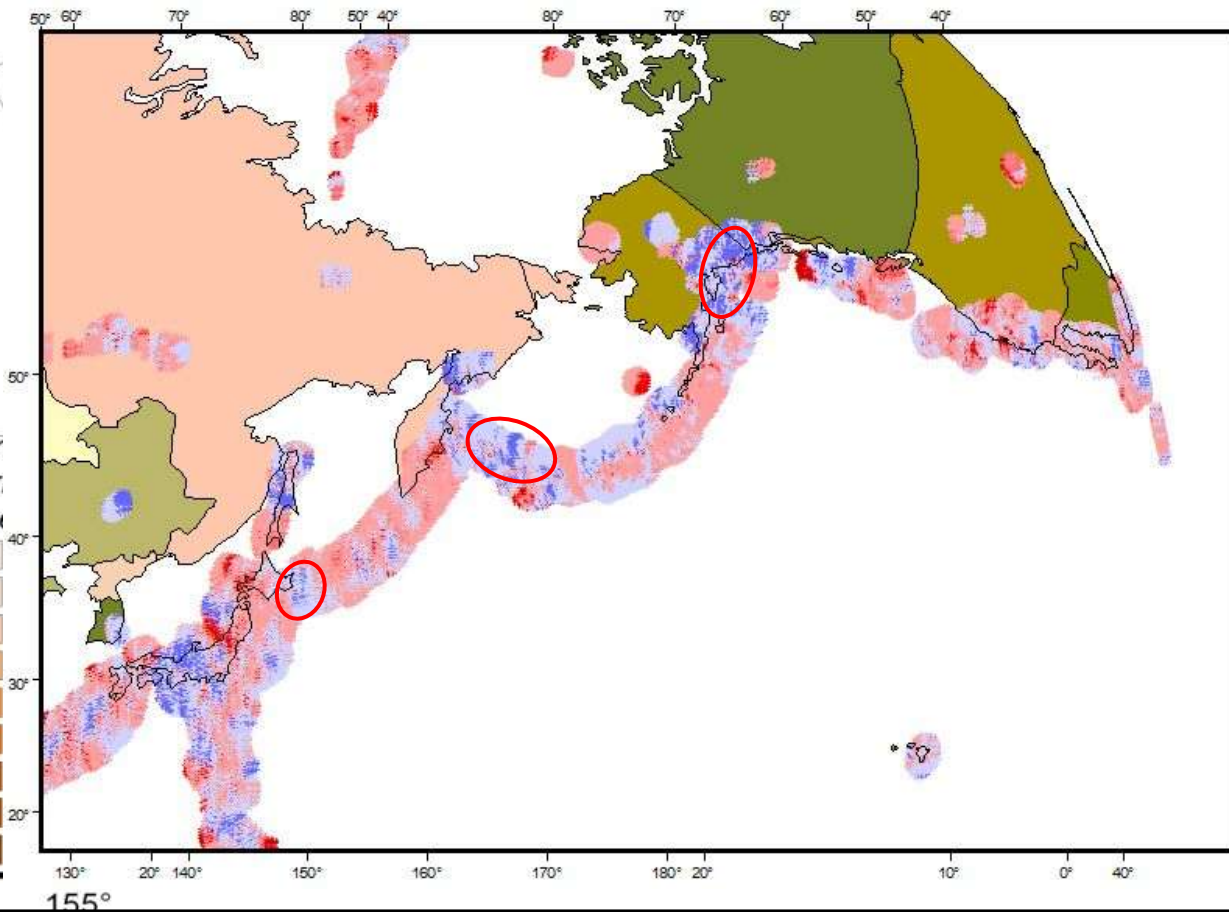
Основной элемент формирования очага мегаземлетрясений – это локализация хрупкого разрушения в *узкой бегущей полоске* или «импульсе подвижки» (slip pulse).

Размер бегущей полоски 10-50 км, что соответствует $M = 6.0-7.5$



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 землетрясений.



Заключение

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 нуклеации отвечает участок наибольшего градиента напряжений.
- 3) **Среднесрочный прогноз** мегаземлетрясения связан с исследованием зон нуклеации землетрясений, т.е. участка высокого градиента напряжений – это место триггерного землетрясения с магнитудой 5.0-6.0



12:26:00

15-05-18 05:33