

Романюк Т.В.¹, Власов А.Н.², Мнушкин М.Г.³,
Михайлова А.В.¹, Марчук Н.А.¹

1 – ИФЗ РАН (Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН))

2 – ИПРИМ РАН (Институт Прикладной Механики РАН)

3 – ИГЭ РАН (Институт Геоэкологии им. А.С.Сергеева РАН)

«Разлом Сан-Андреас как тектонофизическая структура»

Грант РФФИ 11-05-00387

«Детальное 3-D моделирование коры и верхней
мантии региона со сложноустроенной разломной
зоной с нетривиальной реологией: что важнее –
реологические свойства среды или параметры
хрупкого взаимодействия между блоками?»

В докладе будут затронуты следующие темы

- 1. Современный геодинамический режим разломной системы Сан-Андреас
- 2. Схема заложения и эволюции разломной системы Сан-Андреас
- 3. Современный сейсмический режим на разломе
- 4. Напряжения на разломе. Разлом Сан-Андреас – механически «слабый»
- 5. Проект SAFOD
- 6. Хрупко-пластичный переход в коре. Треморы
- 7. Механизм миграции главной плоскости скольжения разломной системы Сан-Андреас на восток

Космический снимок запада США

1. Современный геодинамический режим системы Сан-Андреас

Сьерра-
Невада

Великая
Долина

Провинция
Бассейнов
и Хребтов

Уолкер-Лэйн

Восточно-
Калифорнийская
сдвиговая зона

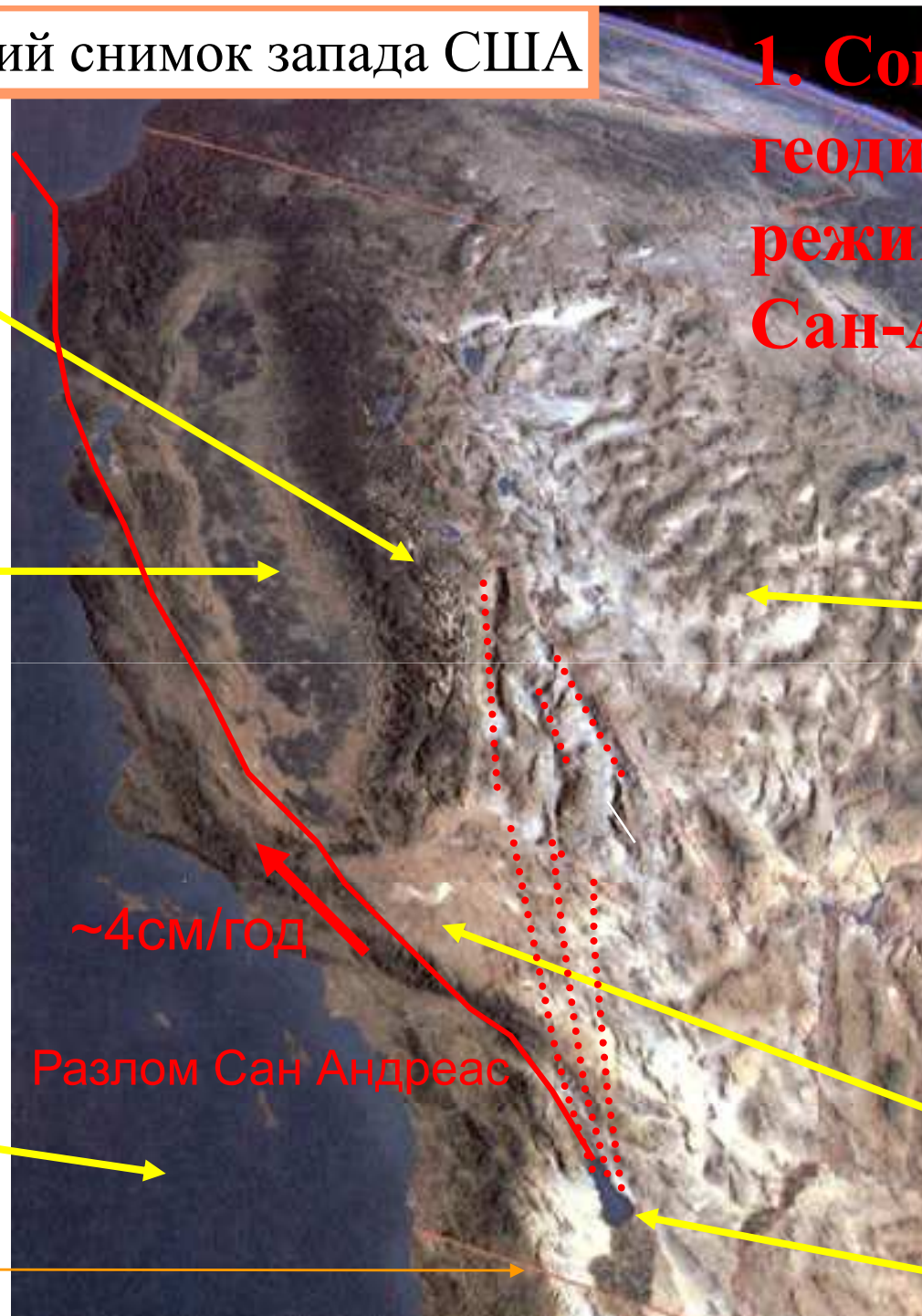
Пустыня
Мохаве

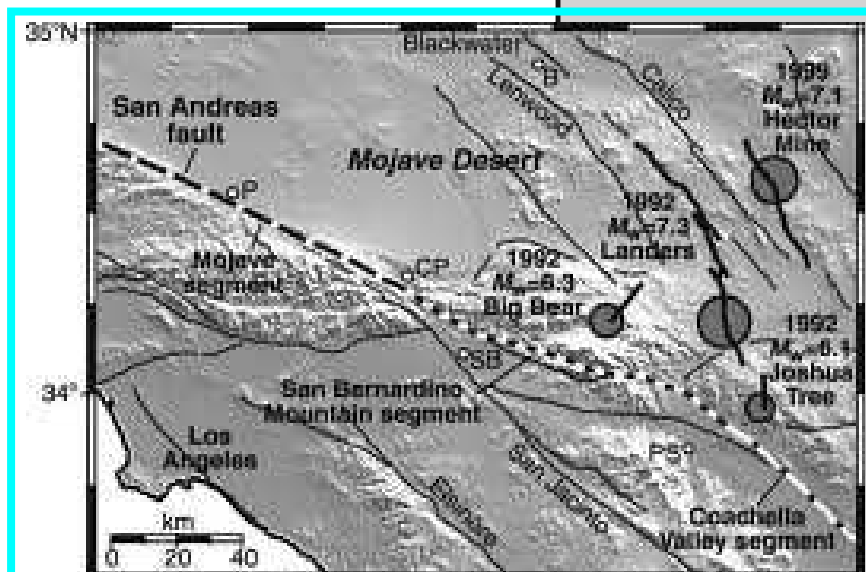
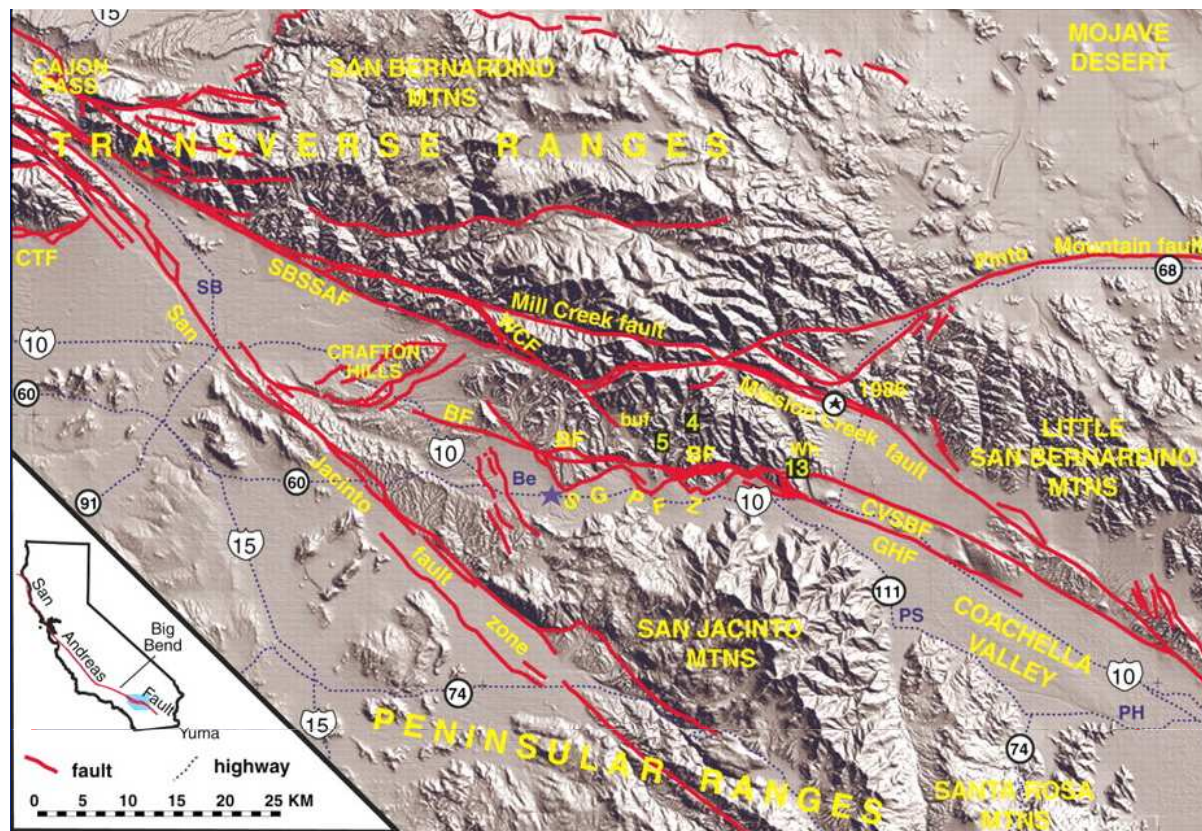
Соленое море

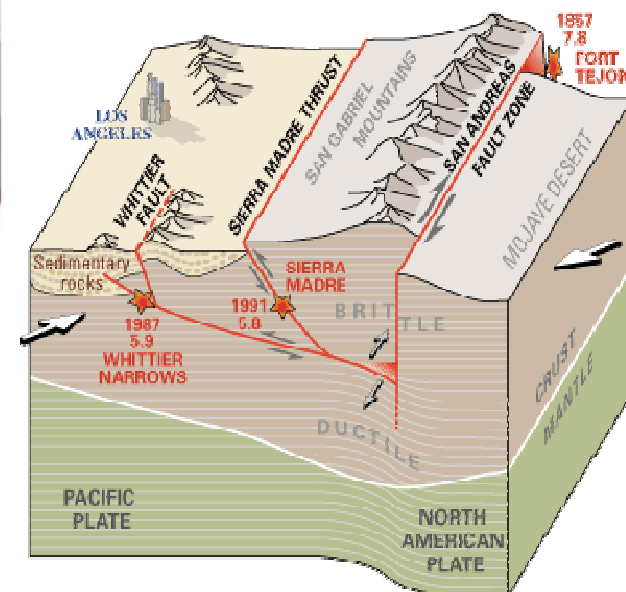
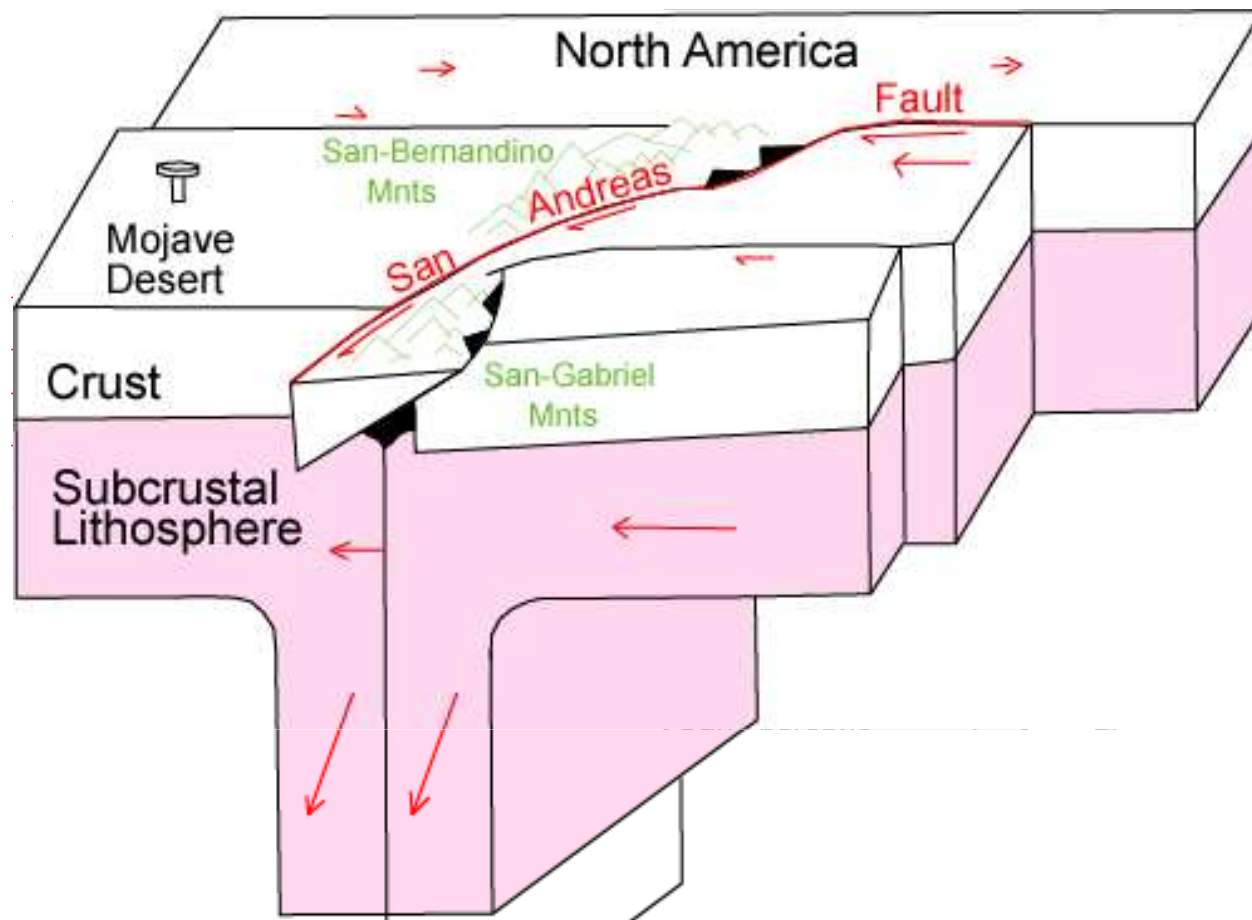
Тихий
океан

Границы
штатов

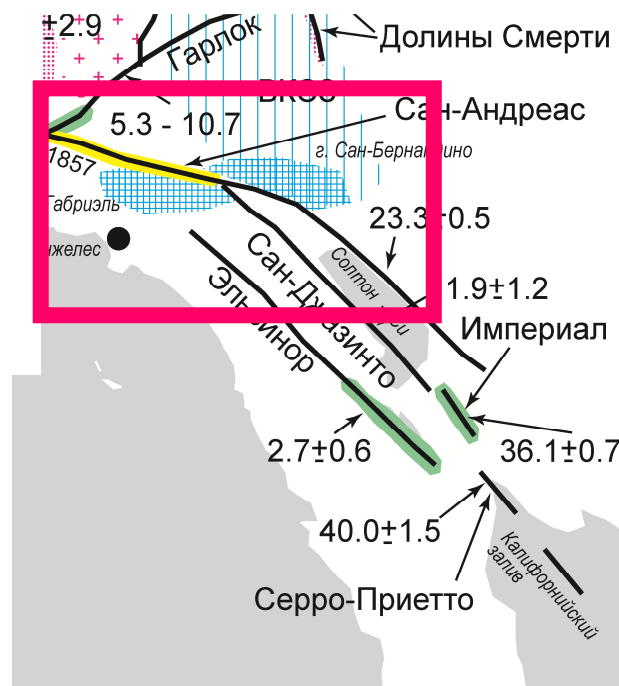
~4см/год
Разлом Сан Андреас

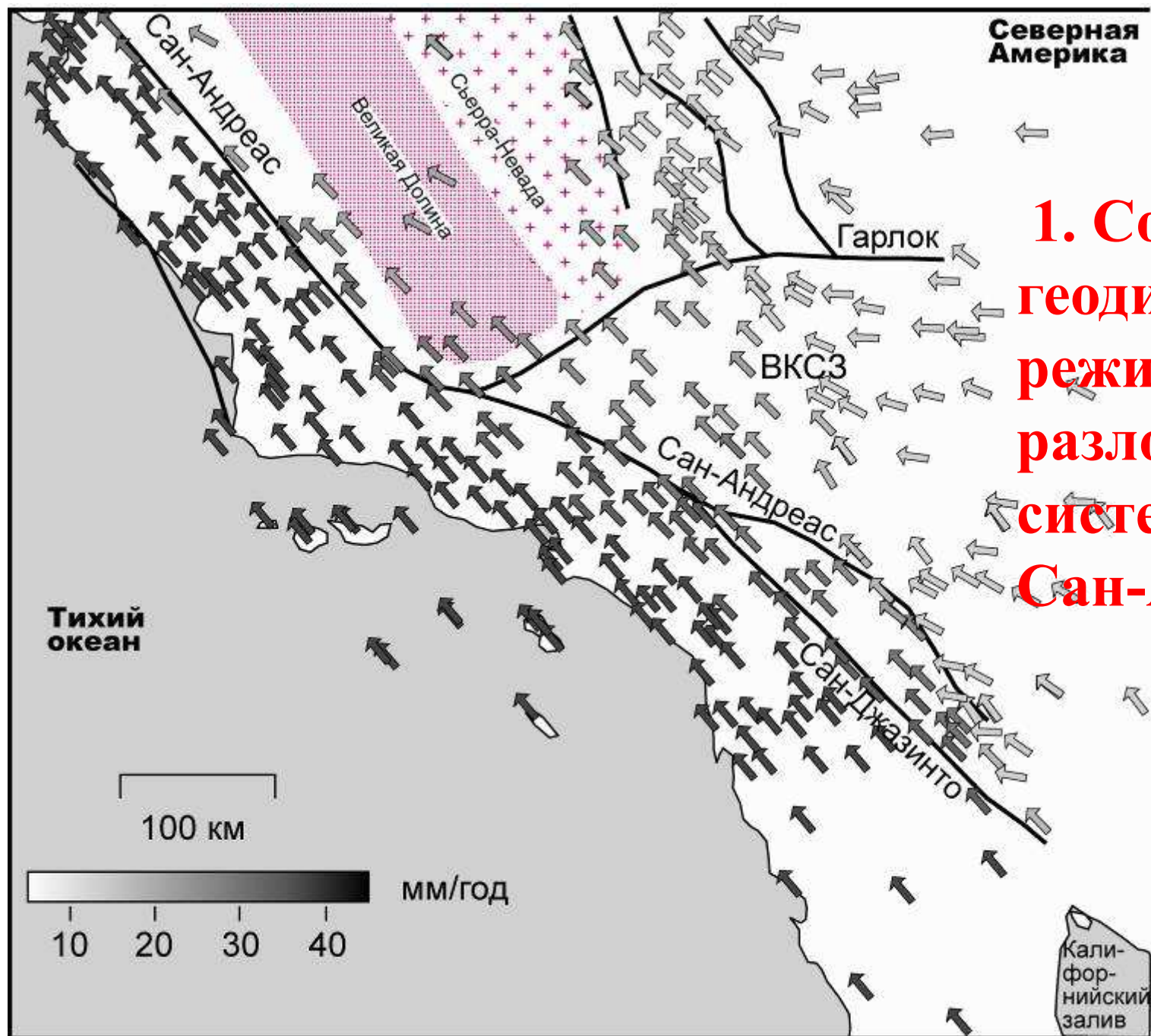






Блок-диаграмма, демонстрирующая механизм возникновения дополнительных сжимающих напряжений в месте изгиба разлома Са-Андреас. Транспрессивные деформации обуславливают формирование складчато-надвиговых систем в Провинции Поперечных Хребтов (горы Сан-Бернадино, Сан-Габриэль и др.)

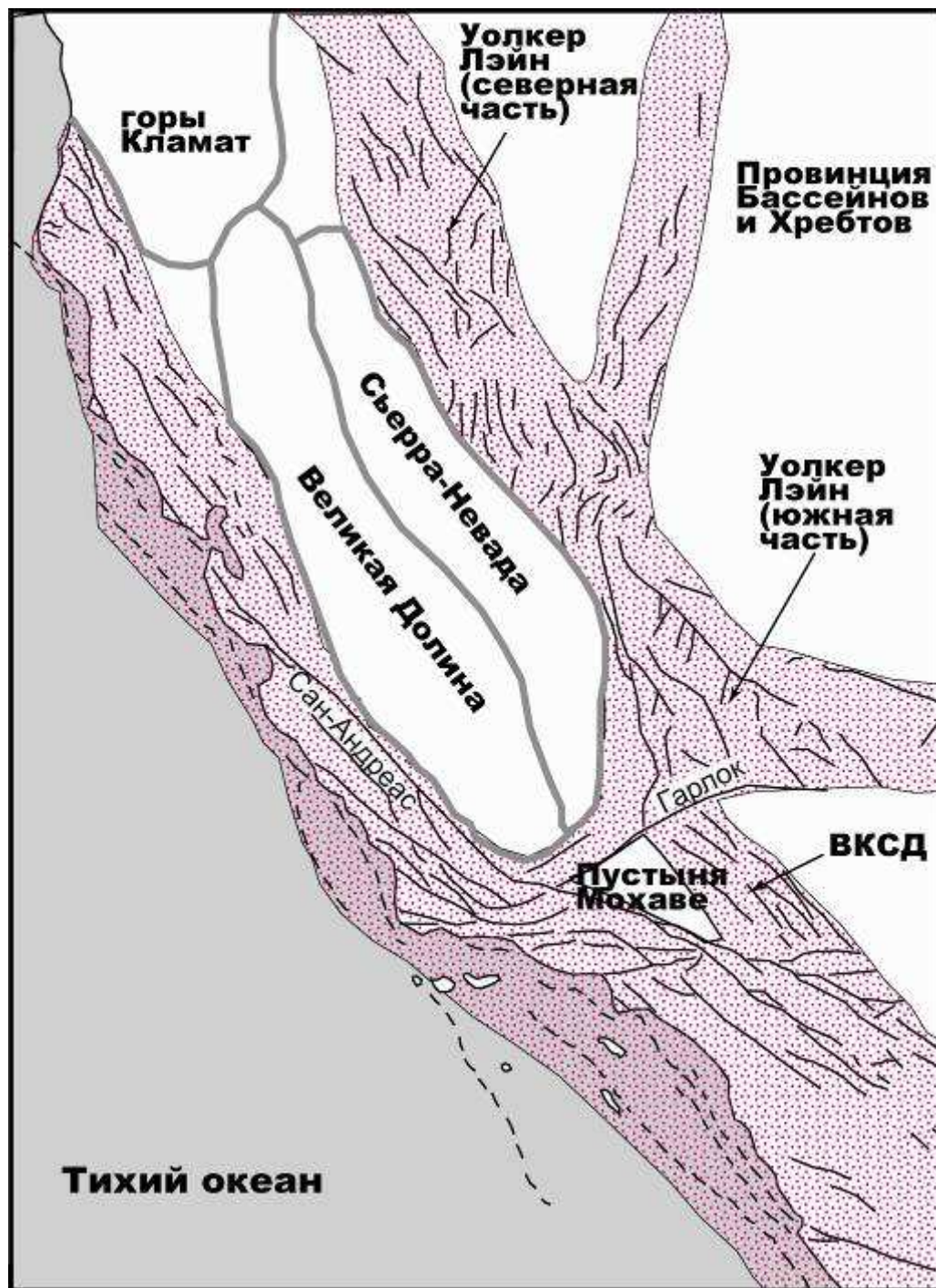




**1. Современный
геодинамически
режим
разломной
системы
Сан-Андреас**

**Скорости
современных
перемещений
по данным
GPS**

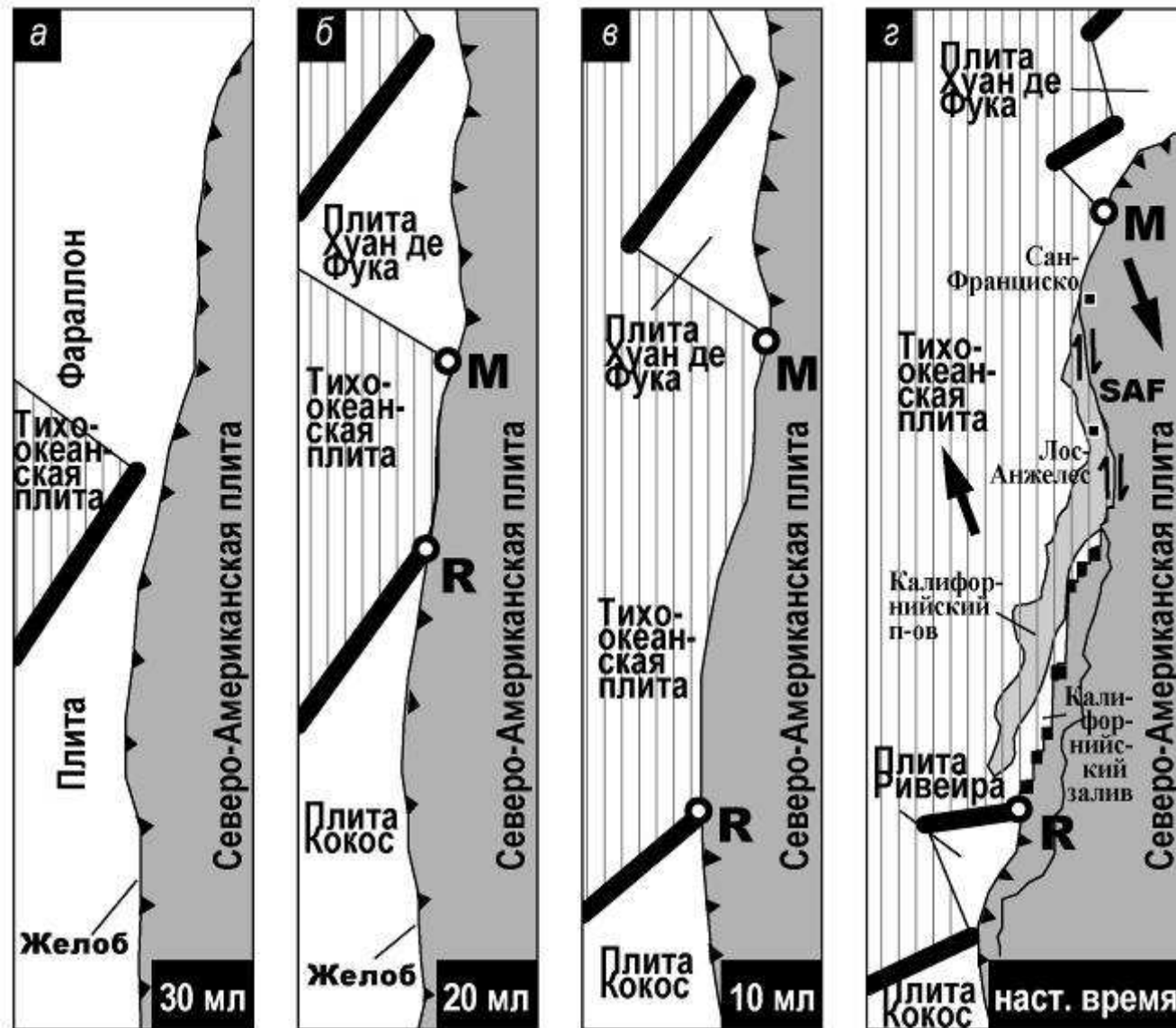
По данным сайта <http://pbo.unavco.org/data/gps>



Области
(показаны крапом),
в которых
зафиксирована
кайнозойская
сдвиговая
активность.

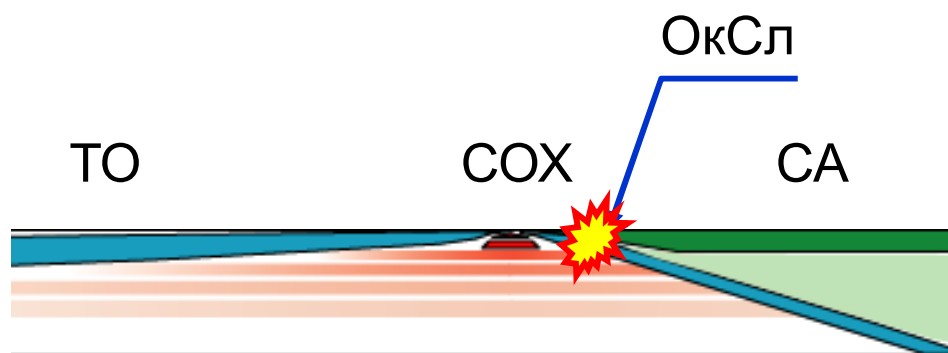
2. Схема заложения и эволюции разломной системы Сан-Андреас

Плитотектонические реконструкции относительных движений Северной Америки и океанических плит Тихого океана за последние 30 млн. лет.
По (Bohannon, Parsons, 1995)

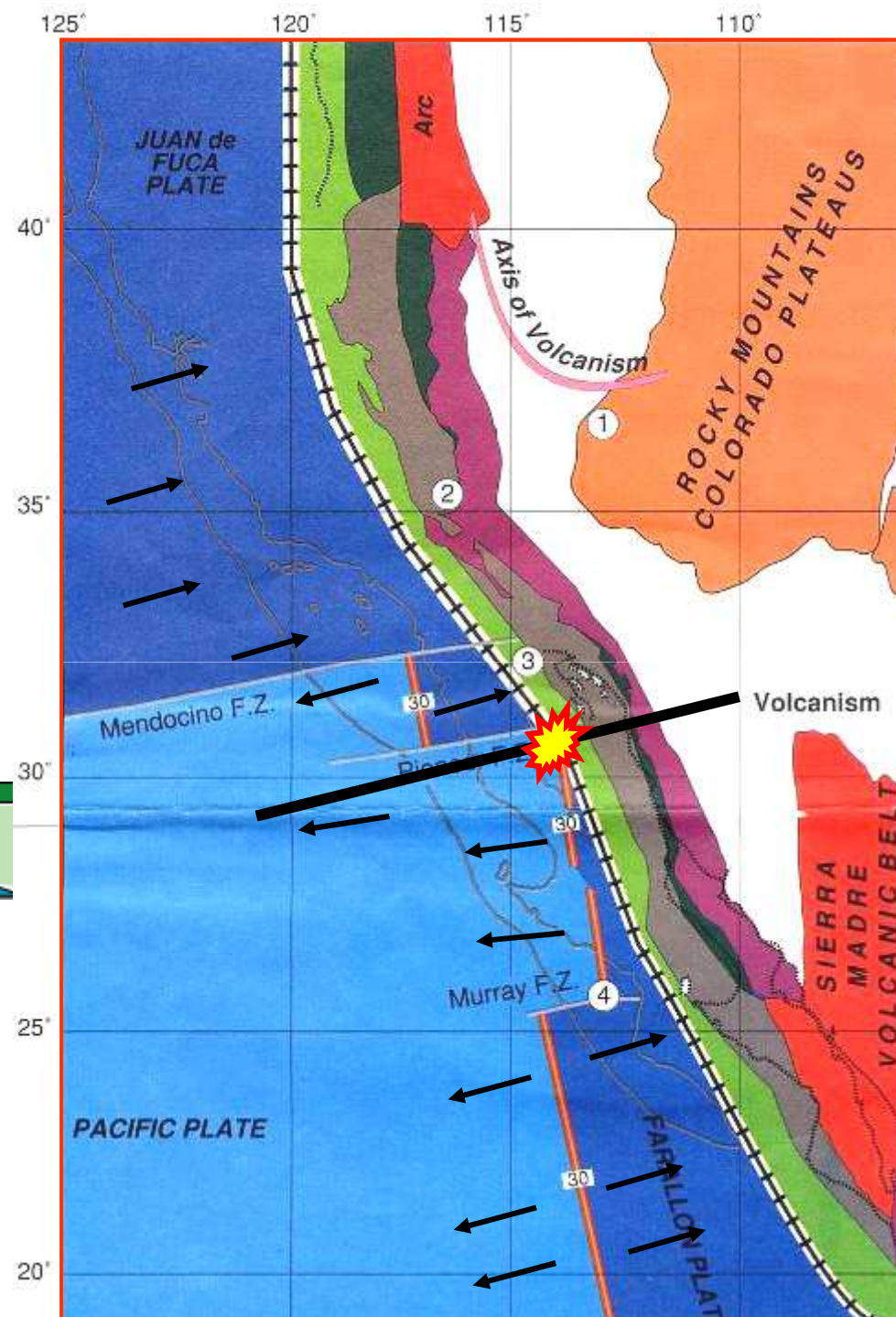


Концептуальная схема заложения и развития разлома Сан-Андреас в результате столкновения срединно-океанического хребта и желоба (трансформация конвергентной плитовой границы в трансформную) [Atwater, 1970]

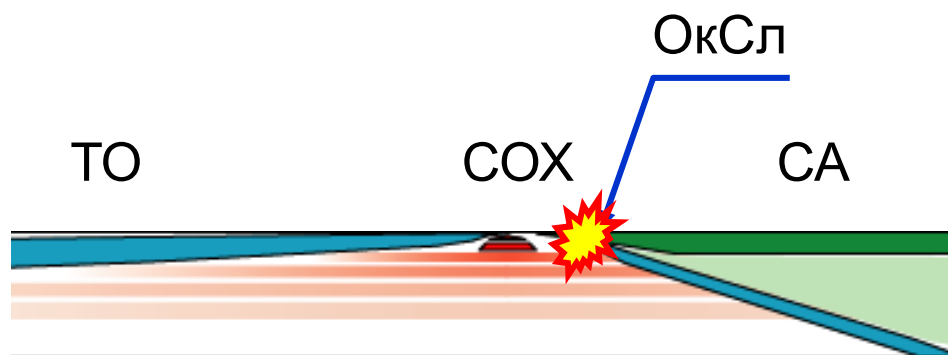
30 млн.лет



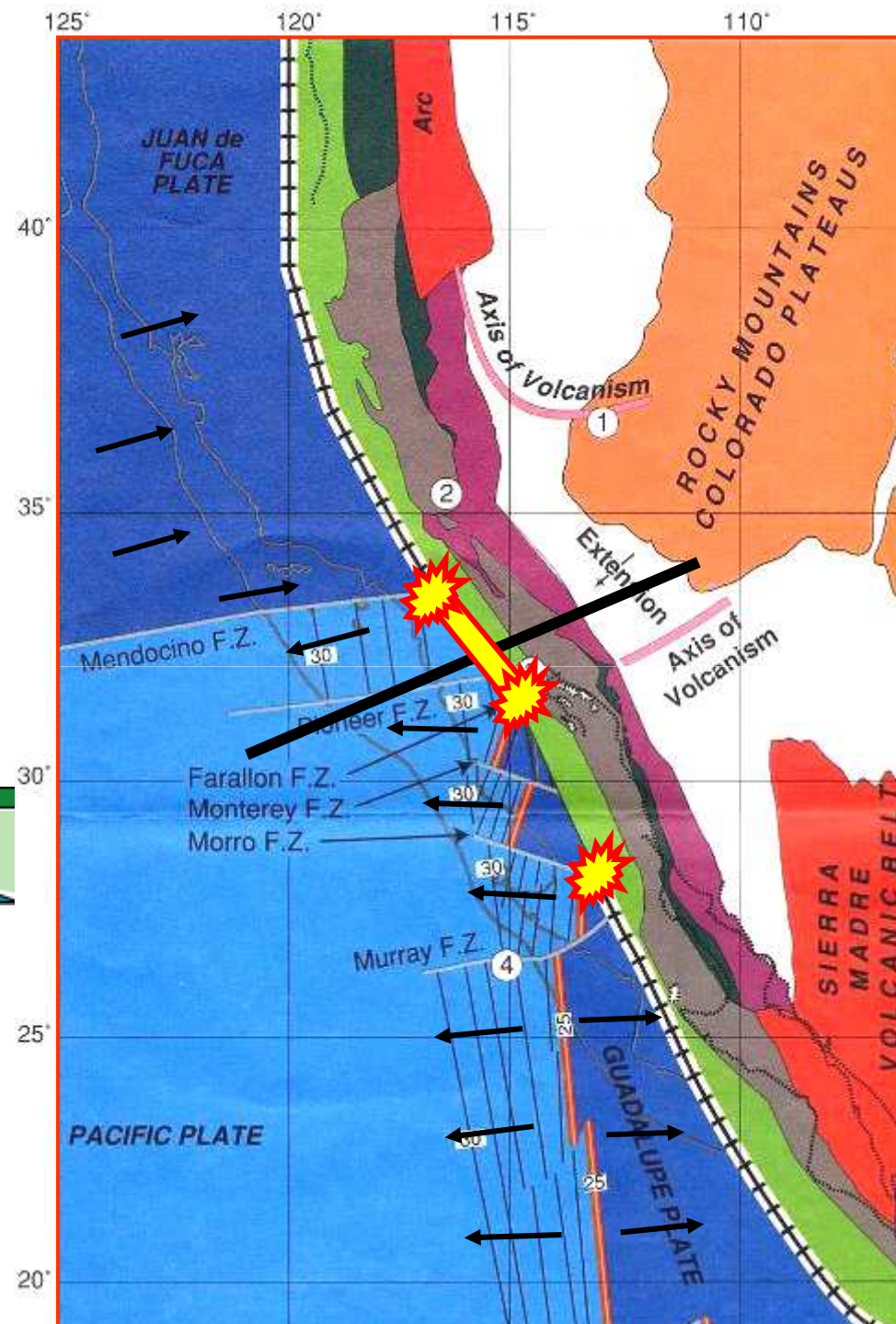
ТО - Тихоокеанская плита
COX - Хребет Хуан де Фука
ОкСл - «окно» в слэбе
СА - Северо-Американская плита



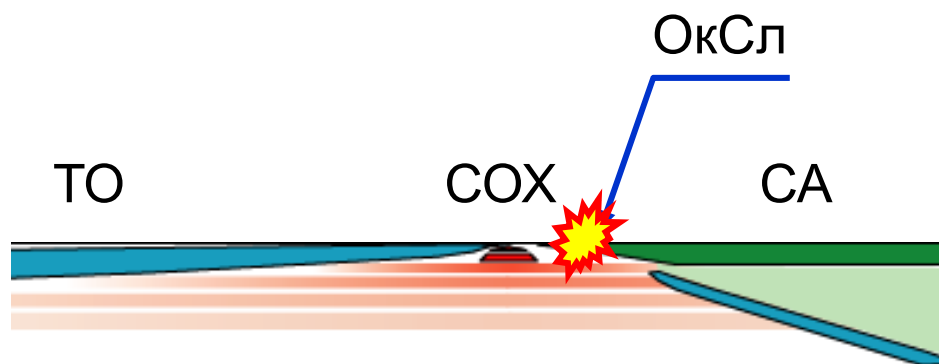
25 млн.лет



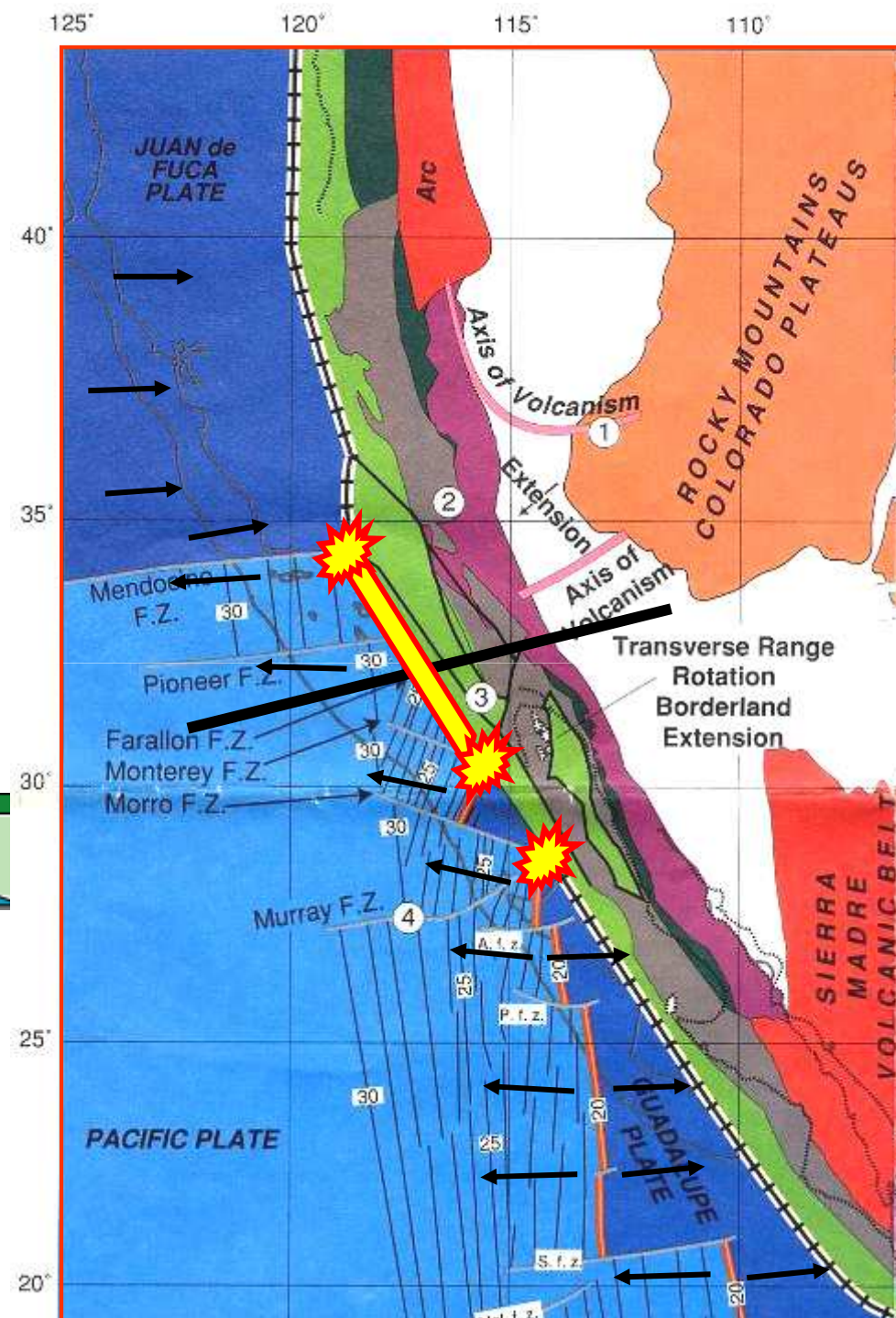
ТО - Тихоокеанская плита
СОХ - Хребет Хуан де Фука
ОкСл - «окно» в слэбе
СА - Северо-Американская плита



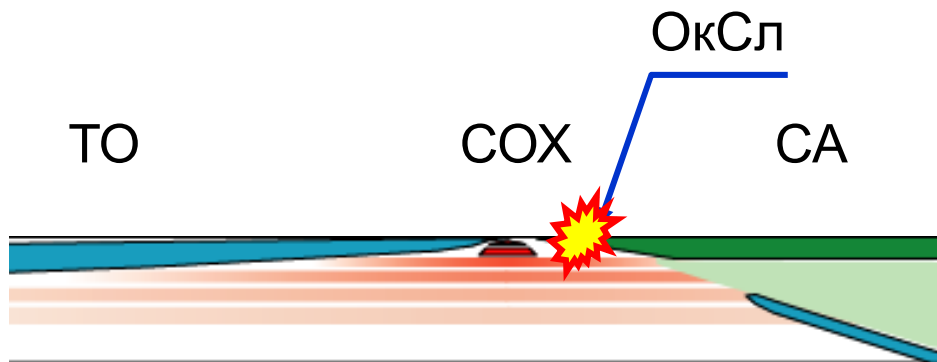
20 млн.лет



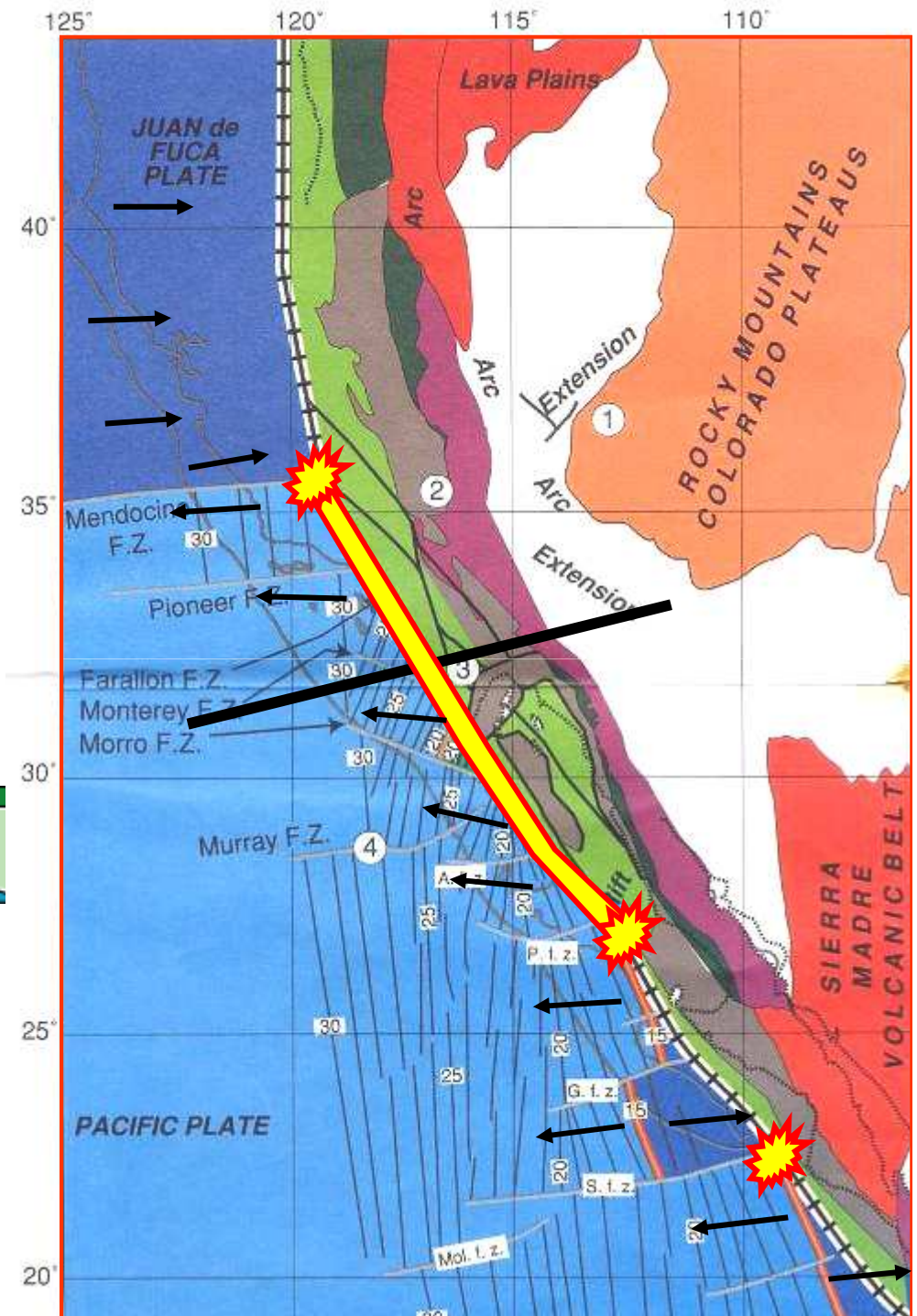
ТО - Тихоокеанская плита
 СОХ - Хребет Хуан де Фука
 ОкСл - «окно» в слэбе
 СА - Северо-Американская плита



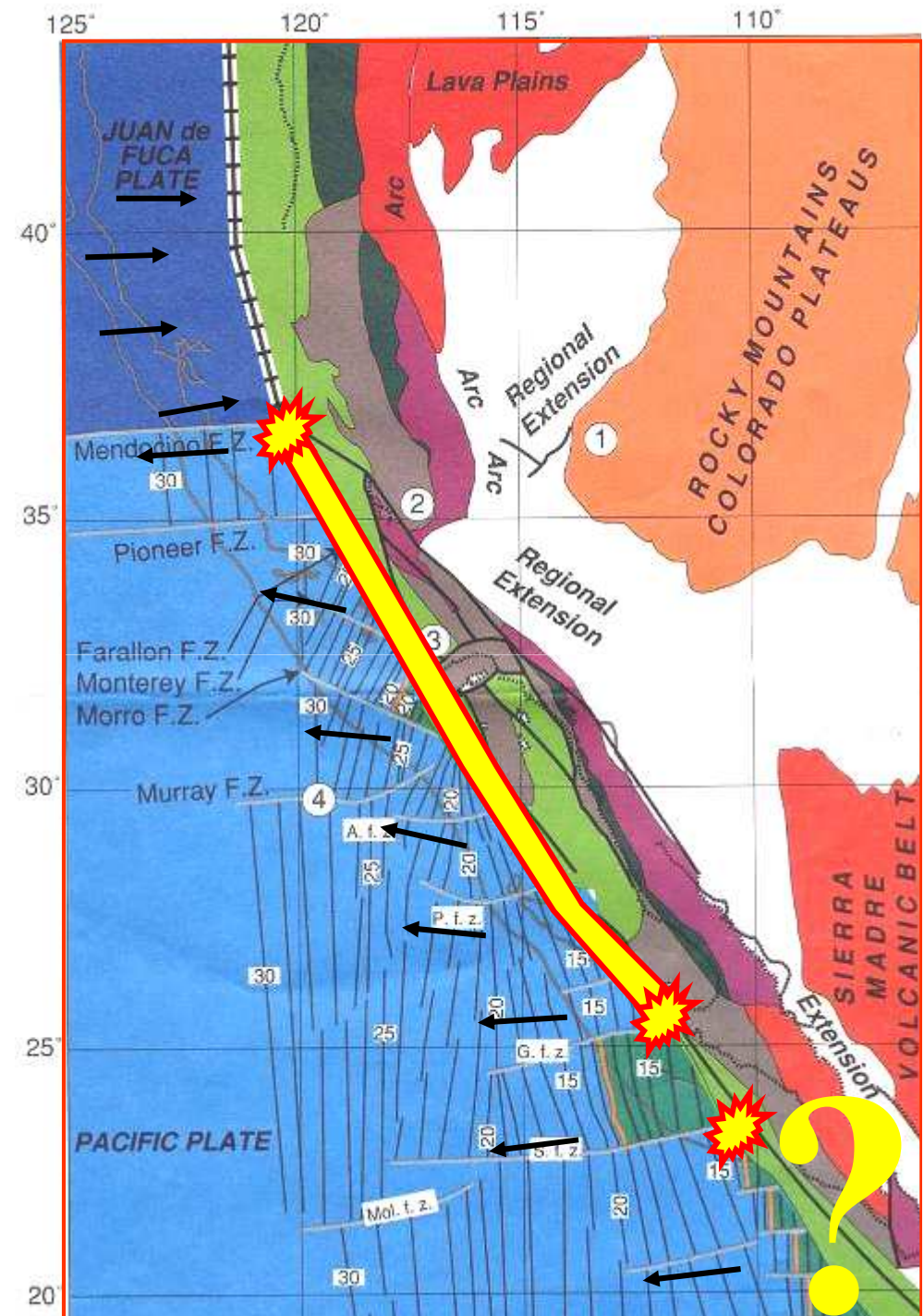
15 млн.лет



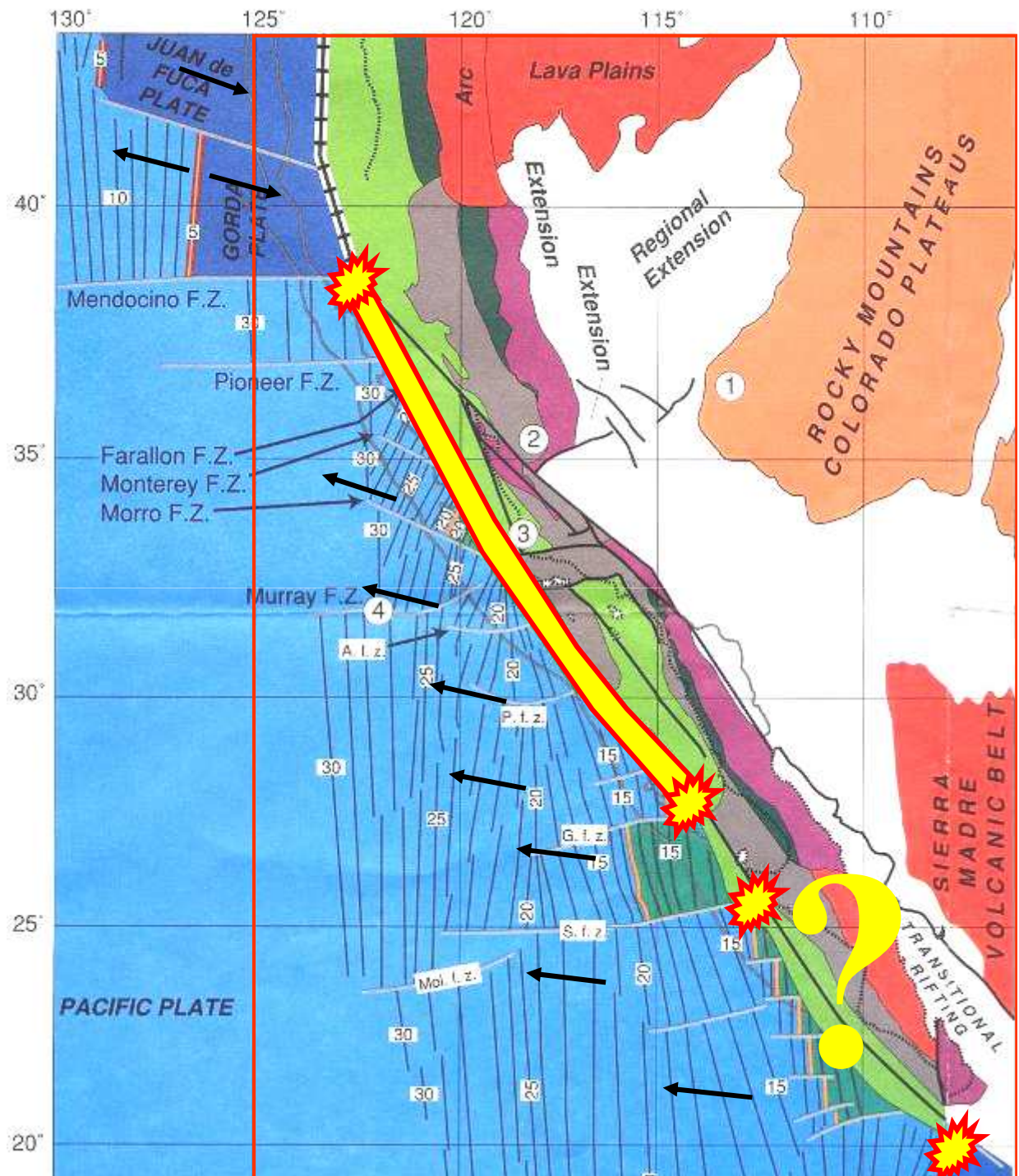
ТО - Тихоокеанская плита
СОХ - Хребет Хуан де Фука
ОкСл - «окно» в слэбе
СА - Северо-Американская плита



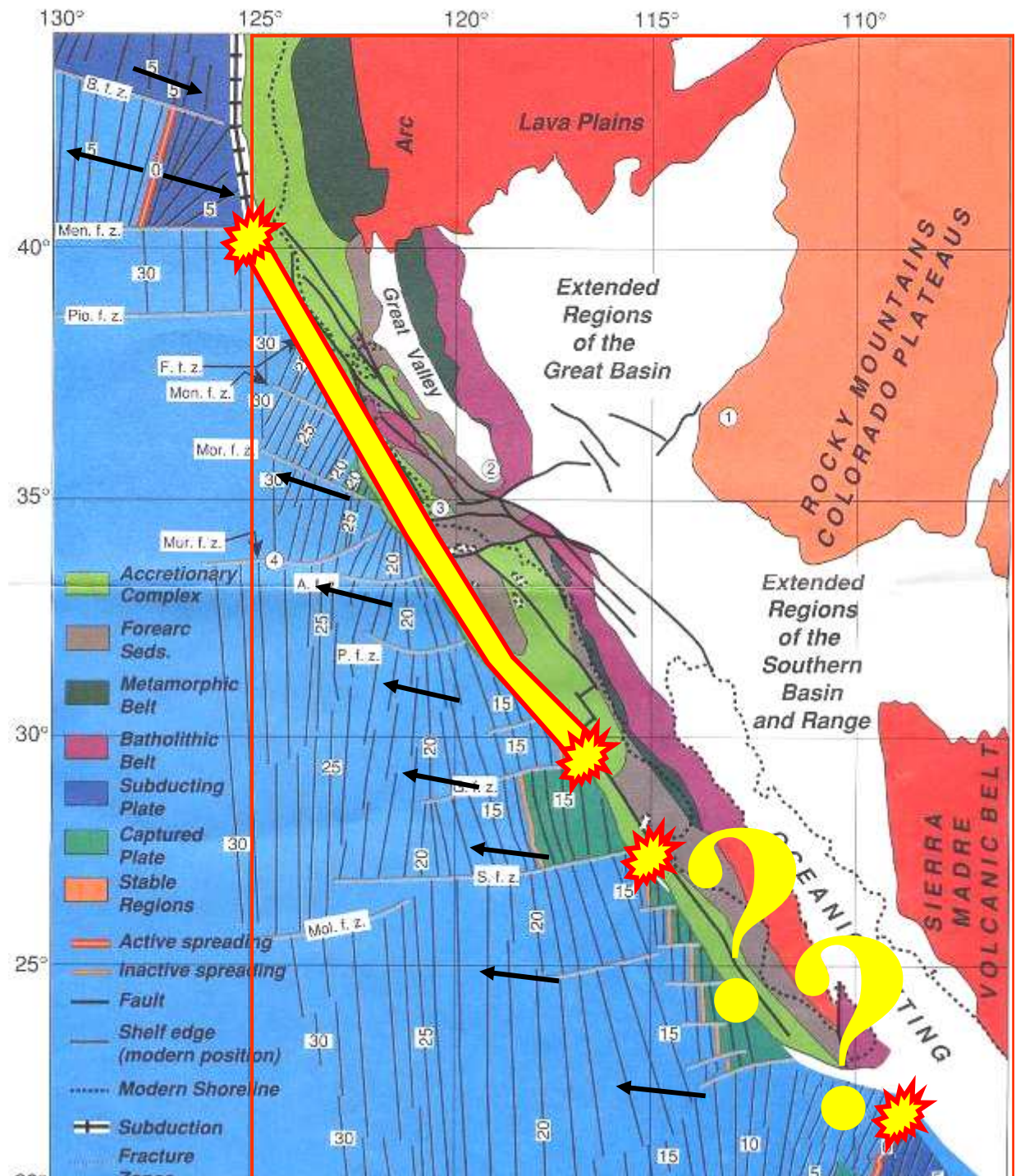
10 млн.лет



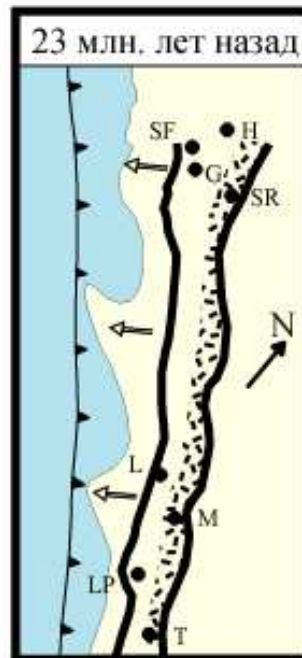
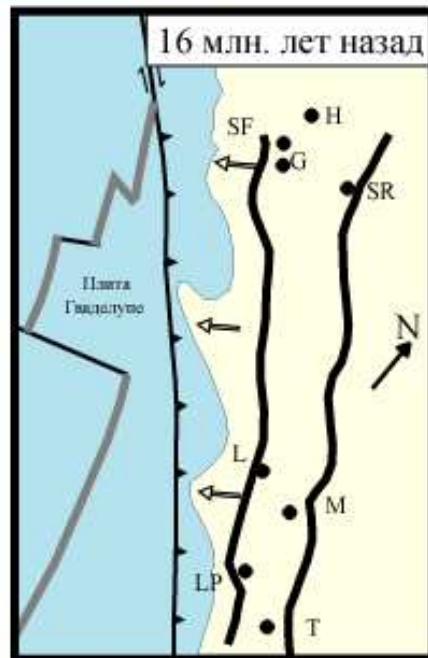
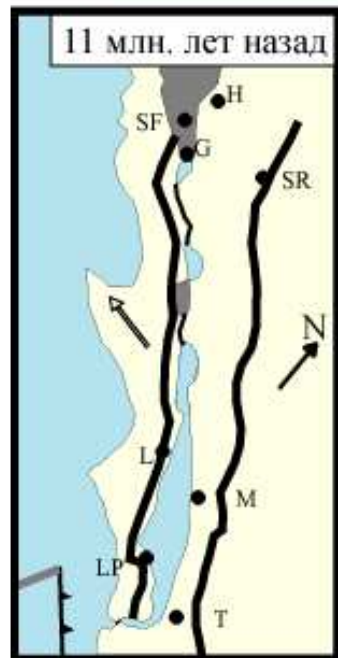
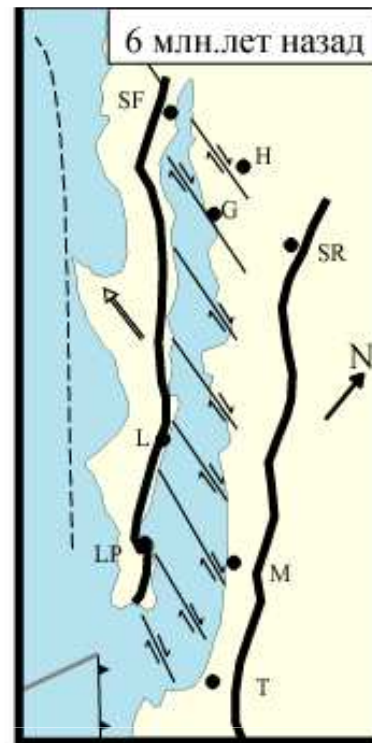
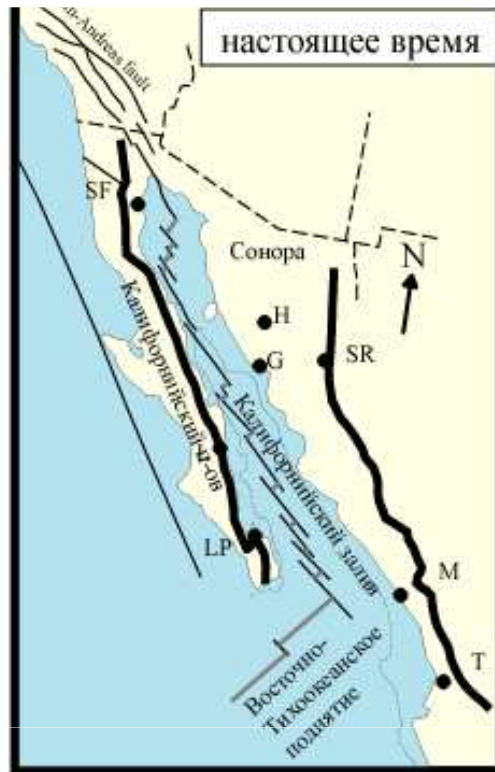
5 млн.лет



0 млн.лет



История раскрытия Калифорнийского залива (По Gans, 1997)



3. Современный сейсмический режим на разломе Сан-Андреас

Earthquake distribution

Capture of Sierra Nevada/ Great Valley

Mendocino triple junction

Creeping

Parkfield

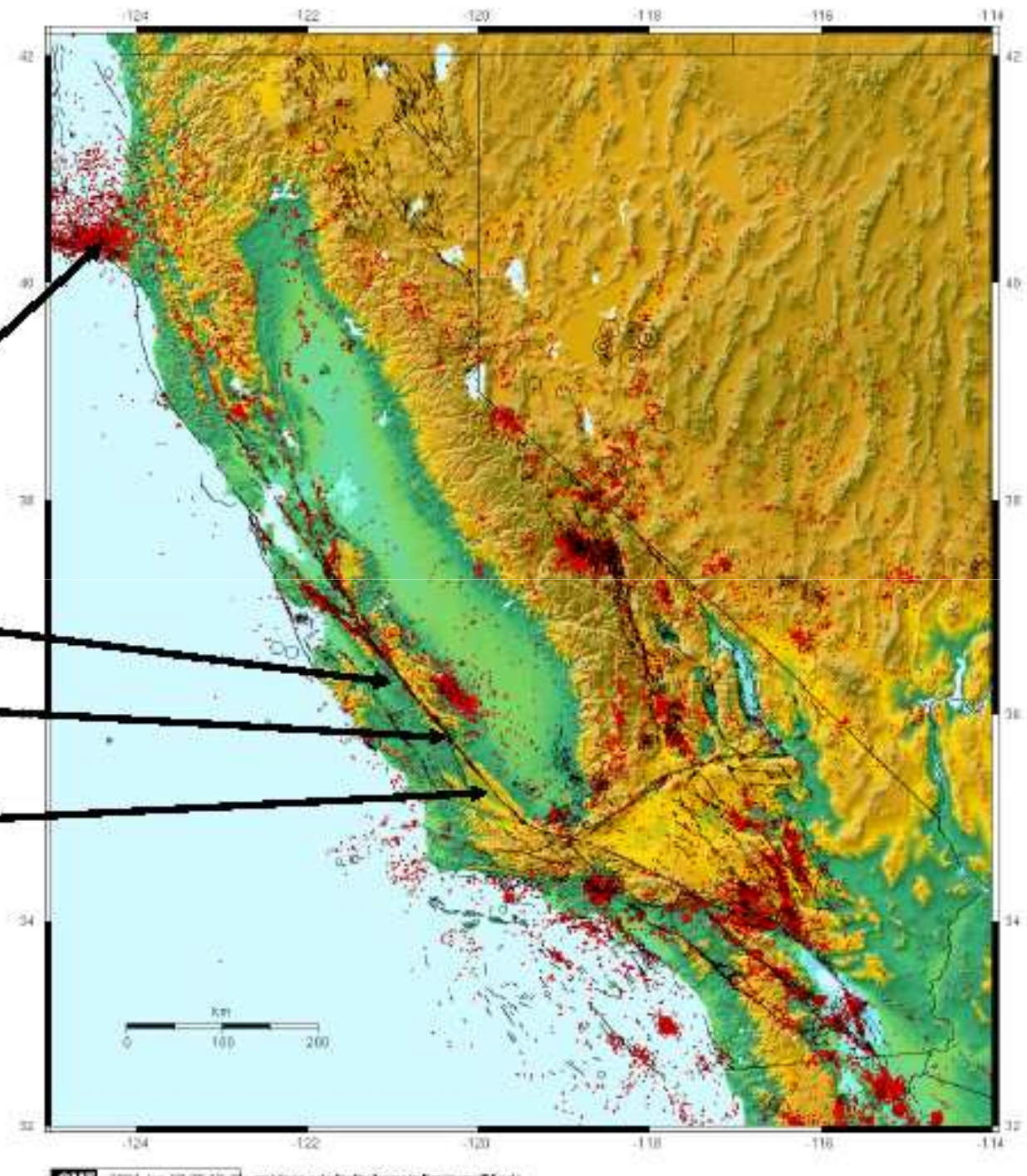
Locked

Known faults: black lines

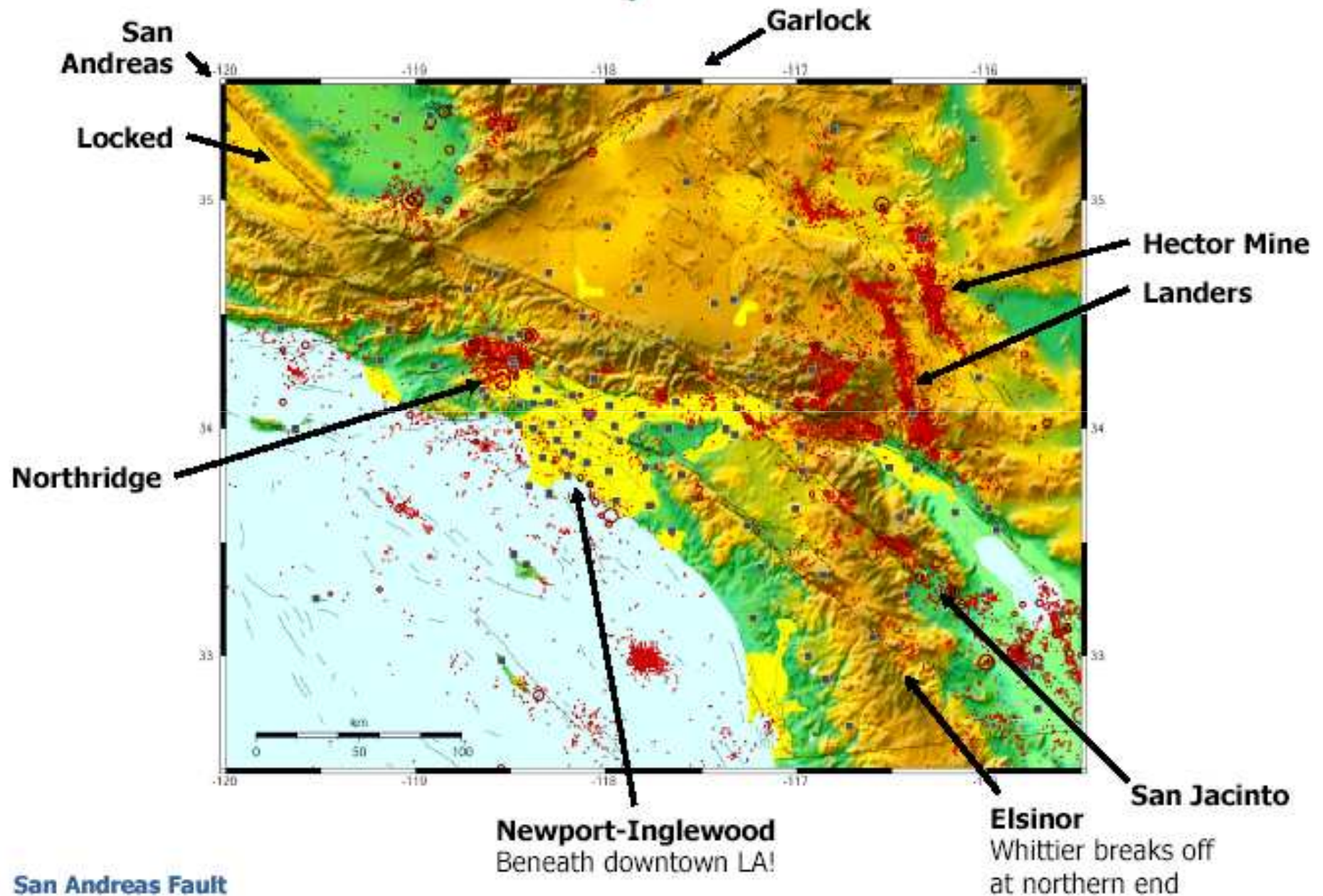
Seismicity since 1980

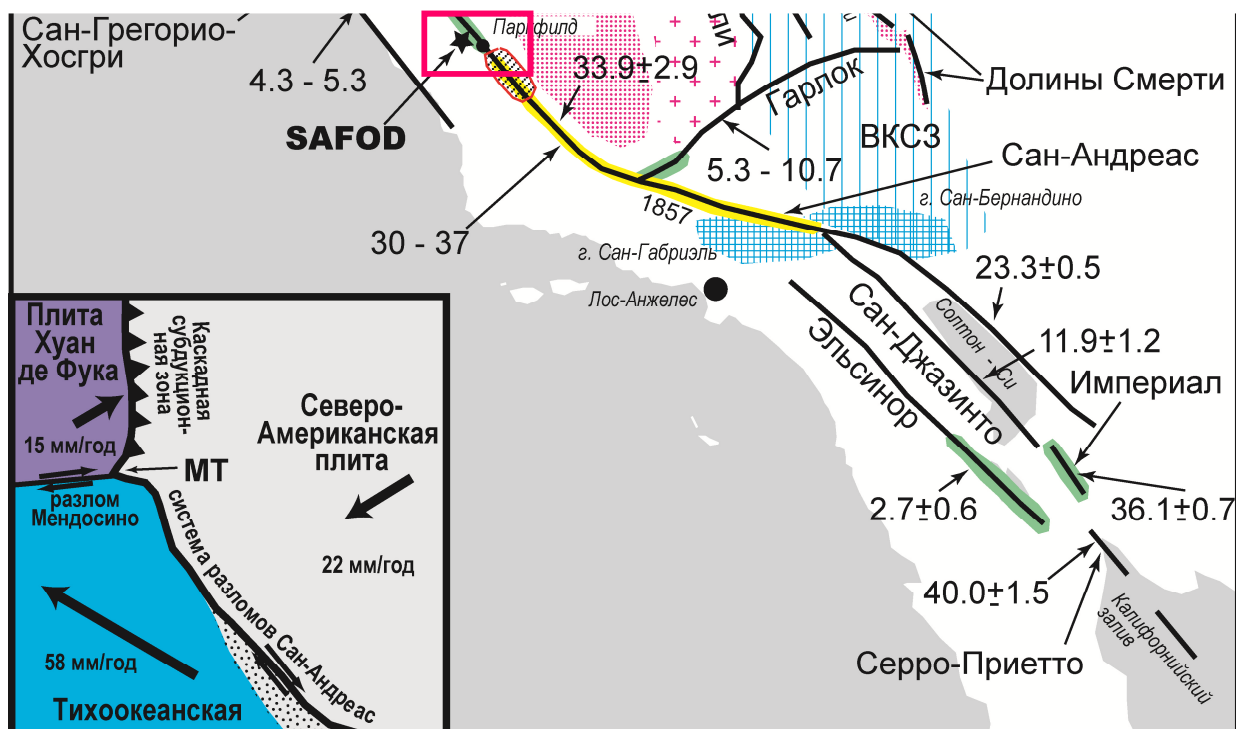
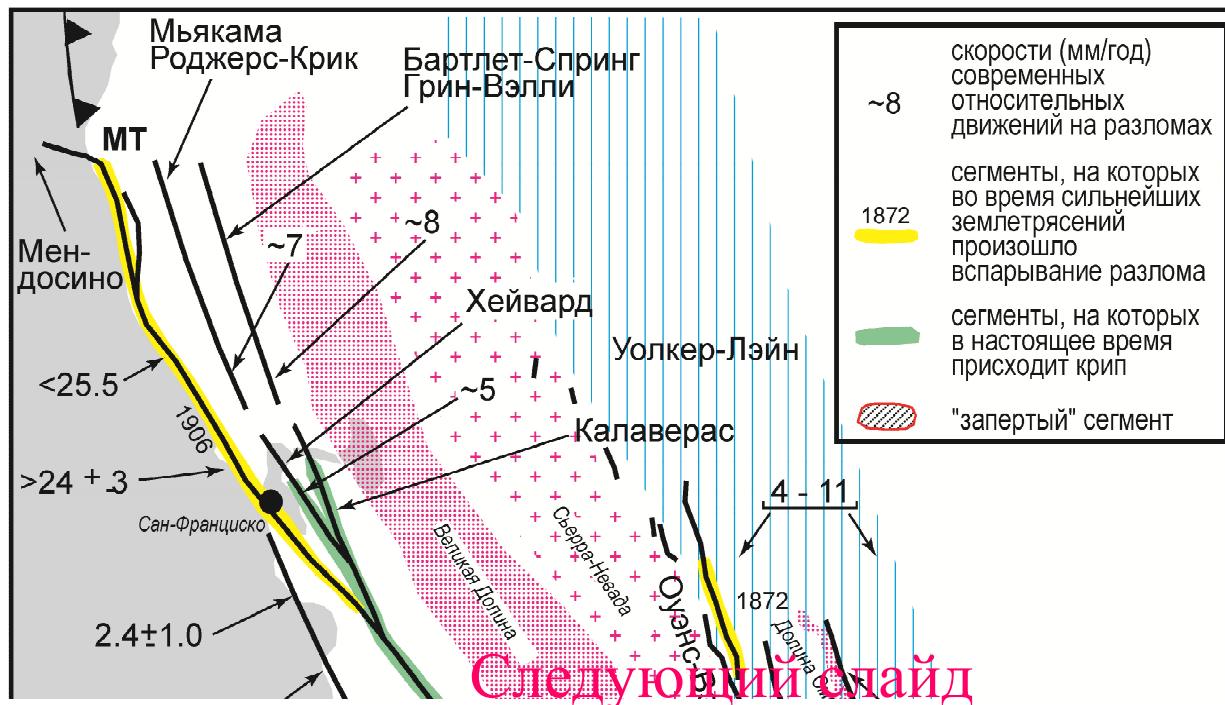
- events > mag 2.5: red dots
- events > mag 5: black circles

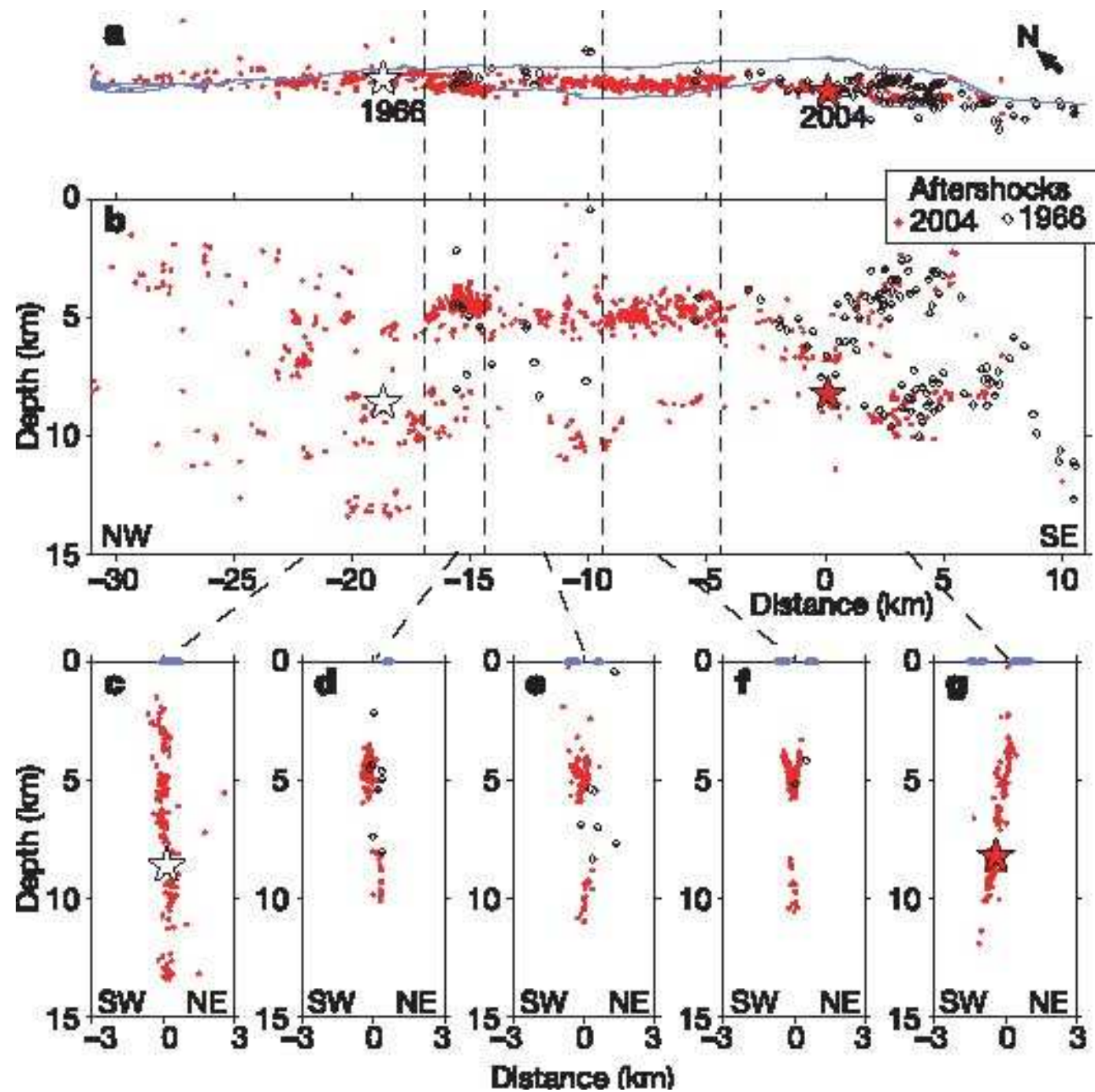
San Andreas Fault

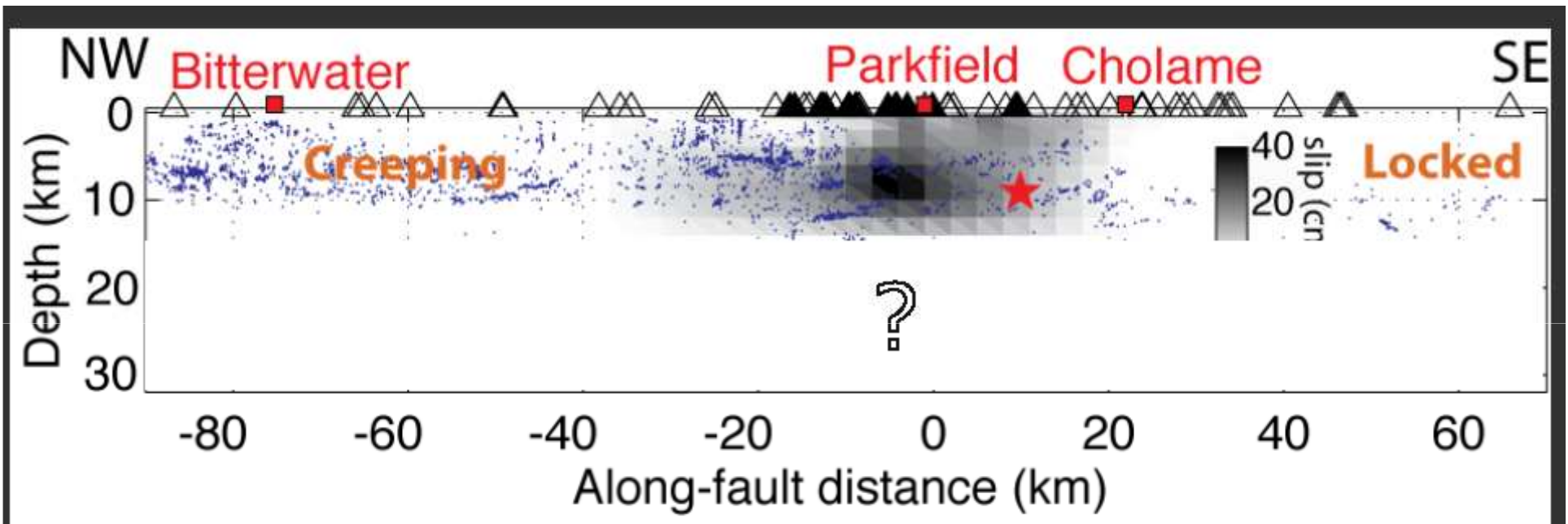


Southern CA seismicity









Shelly and Hardebeck, GRL, 2010

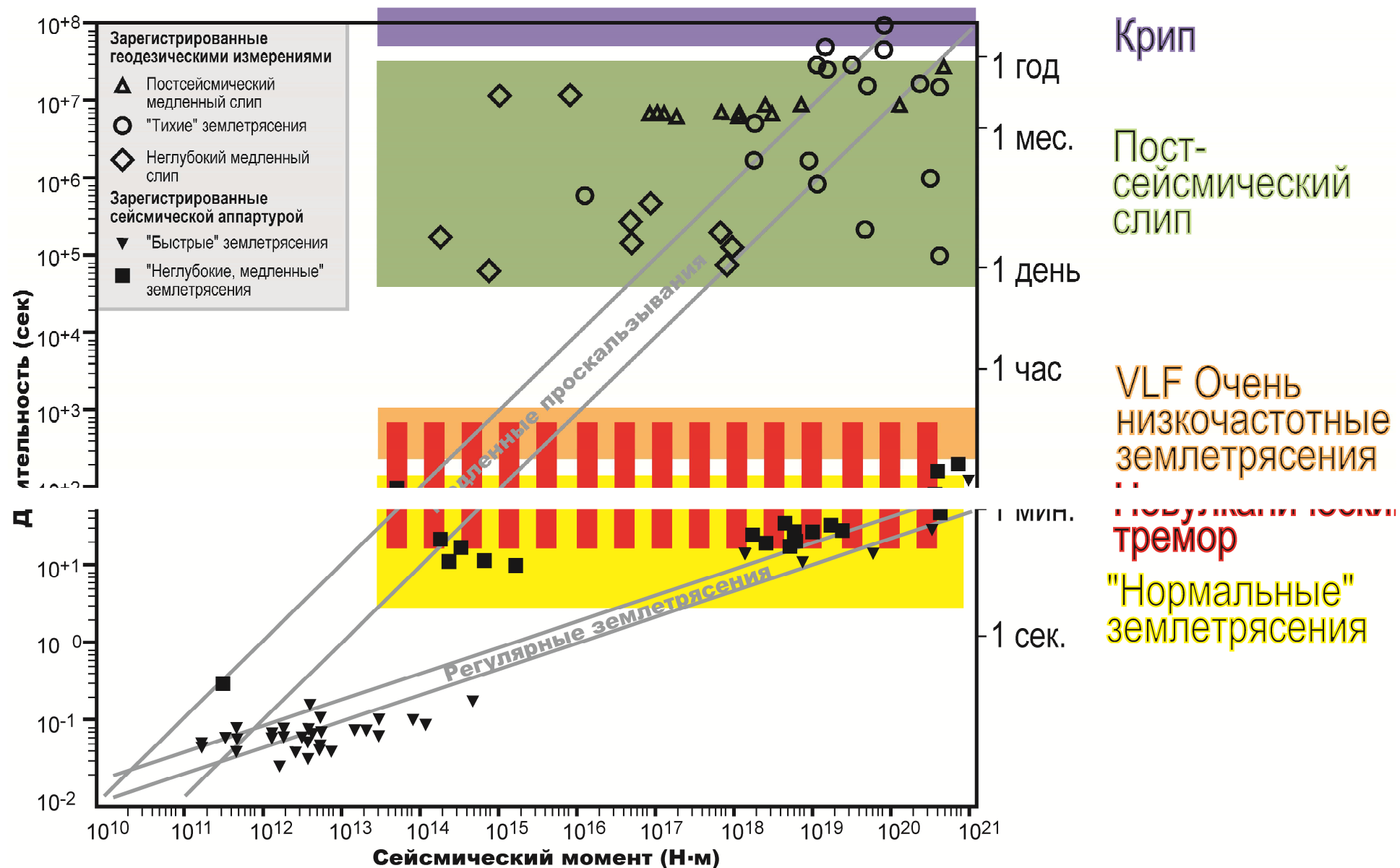
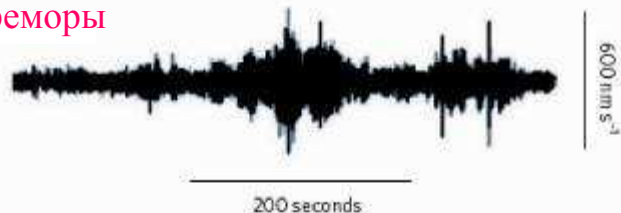


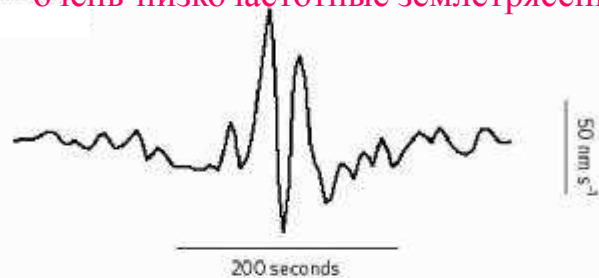
График сейсмических и геодезических событий по [Peng, Gomberg, 2010] с упрощениями.

Сейсмические сигналы

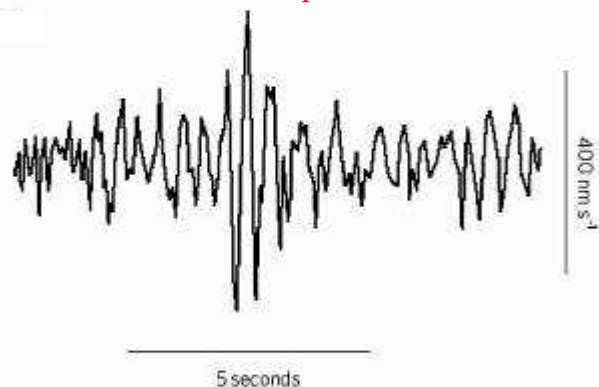
Треморы



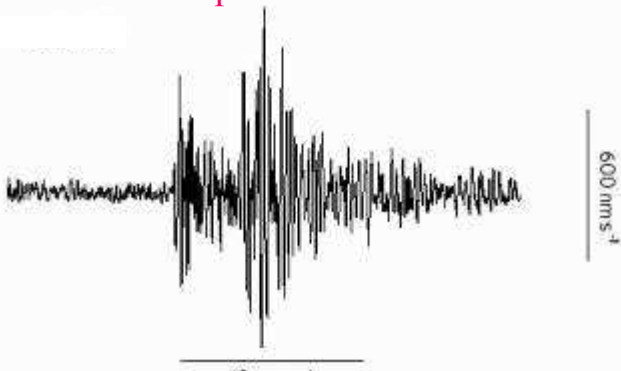
VLF – очень-низкочастотные землетрясения



Низкочастотные землетрясения

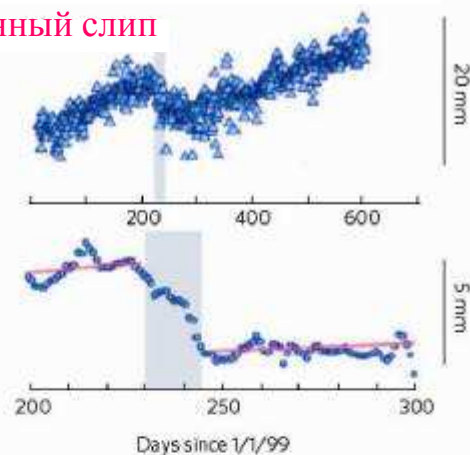


Обычные землетрясения

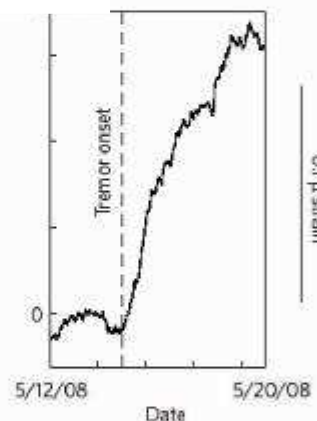


Геодезические сигналы

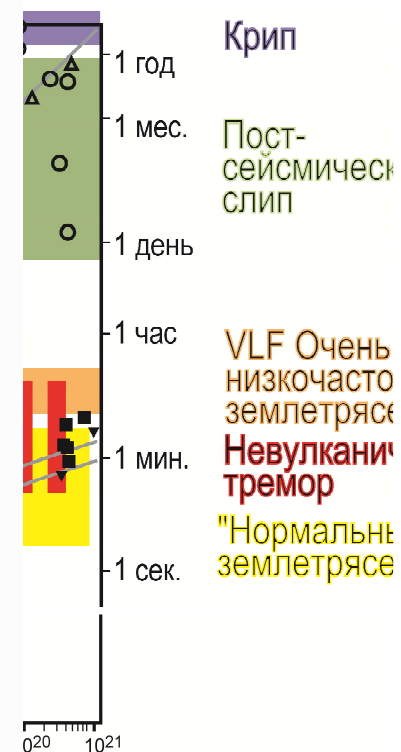
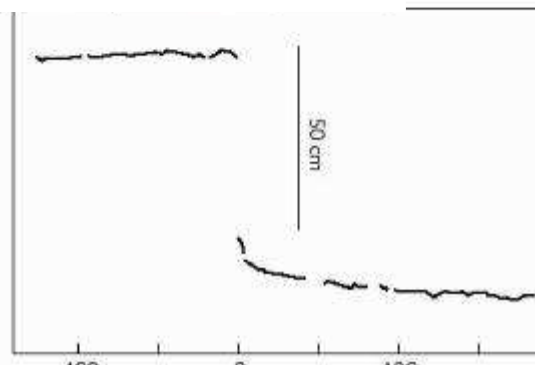
Медленный слип

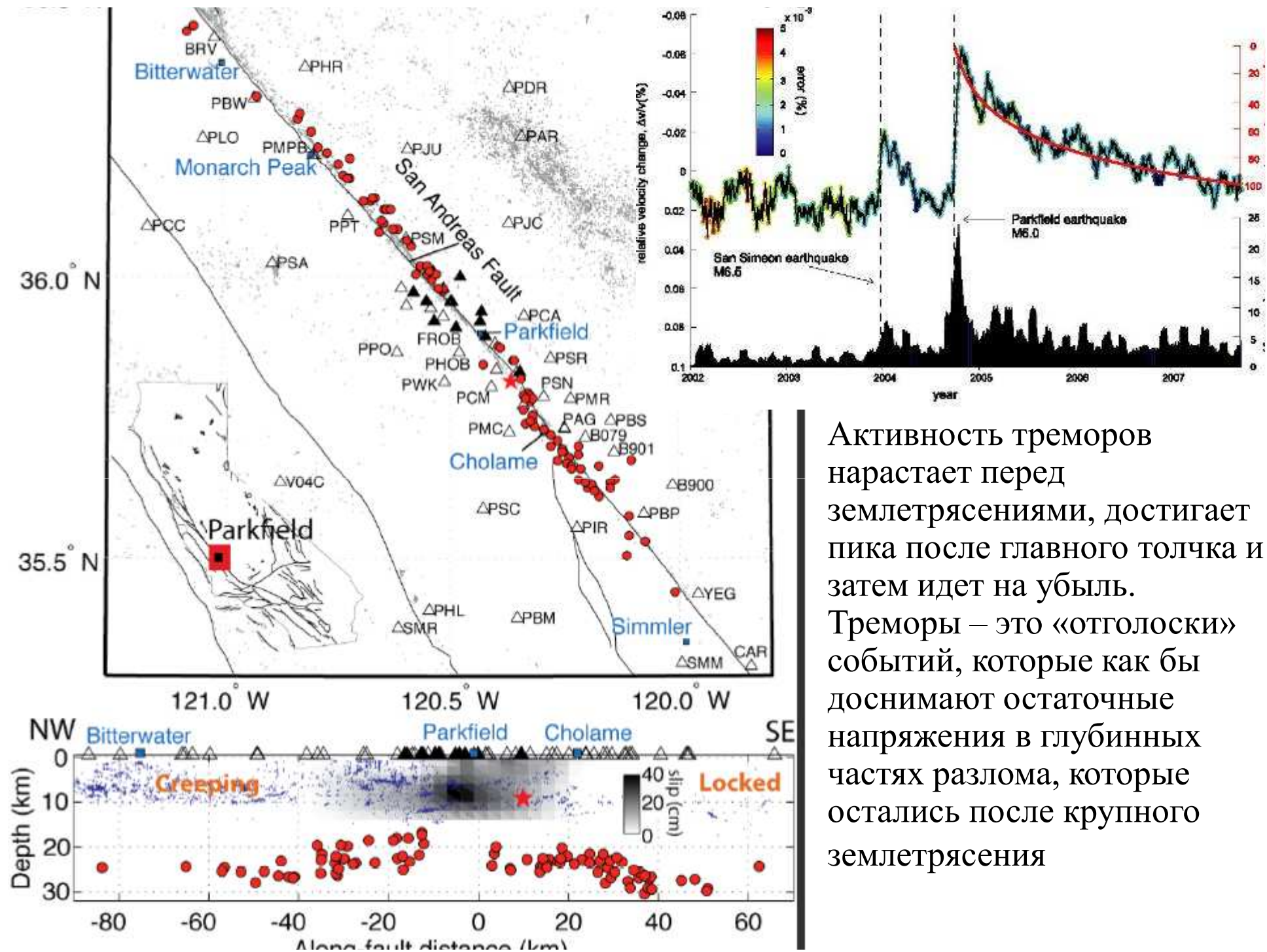


Медленный слип



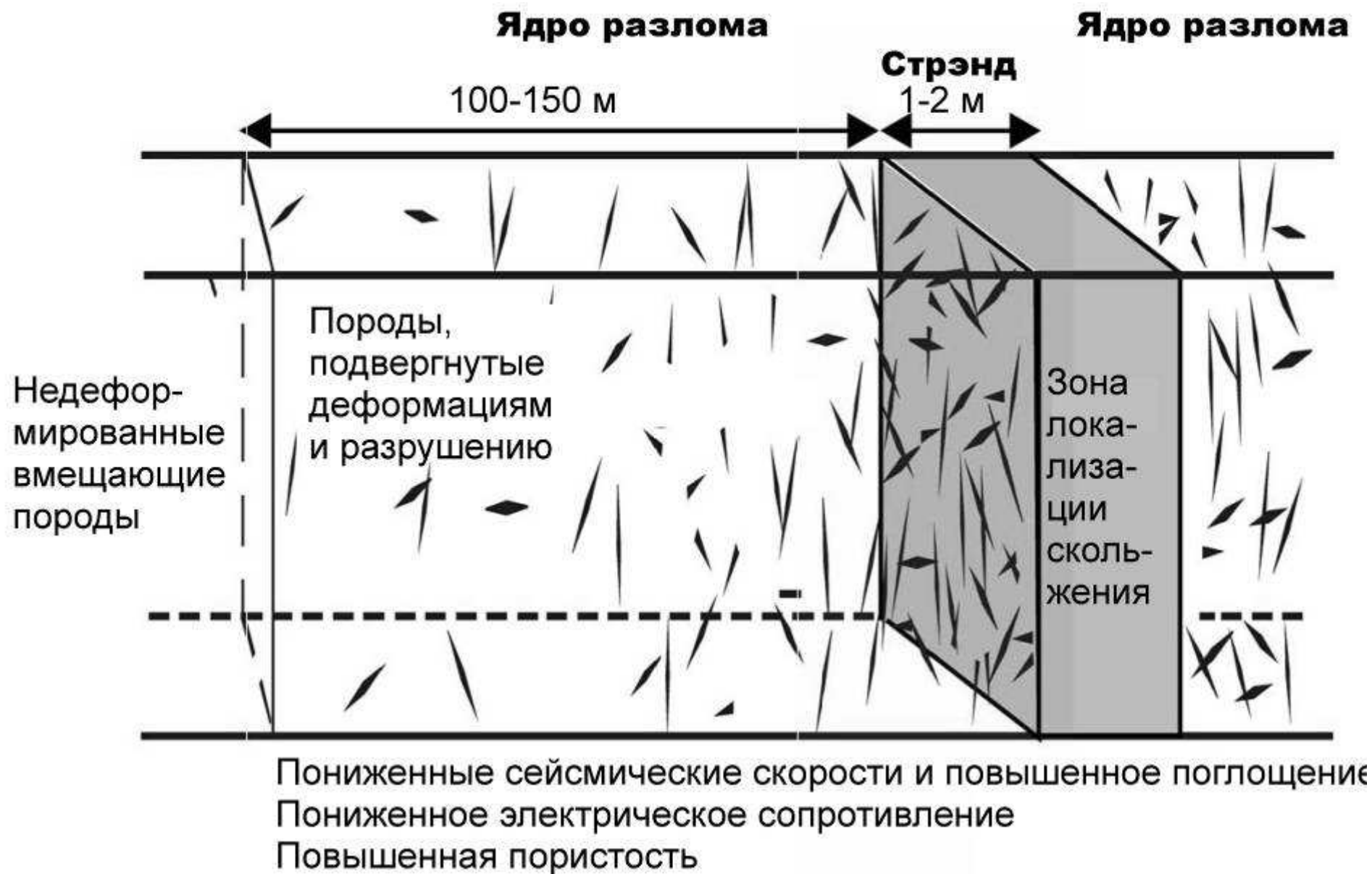
Косейсмический и постсейсмический слип





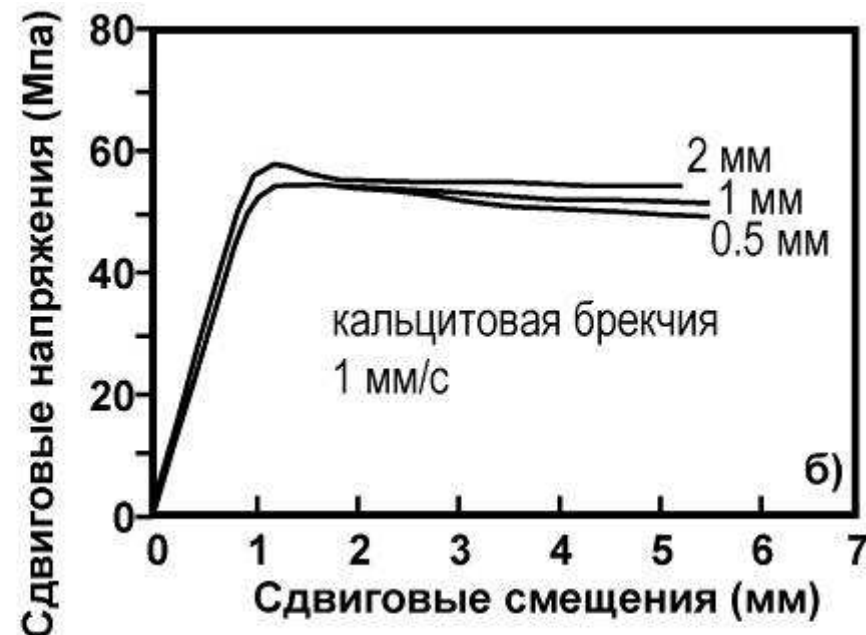
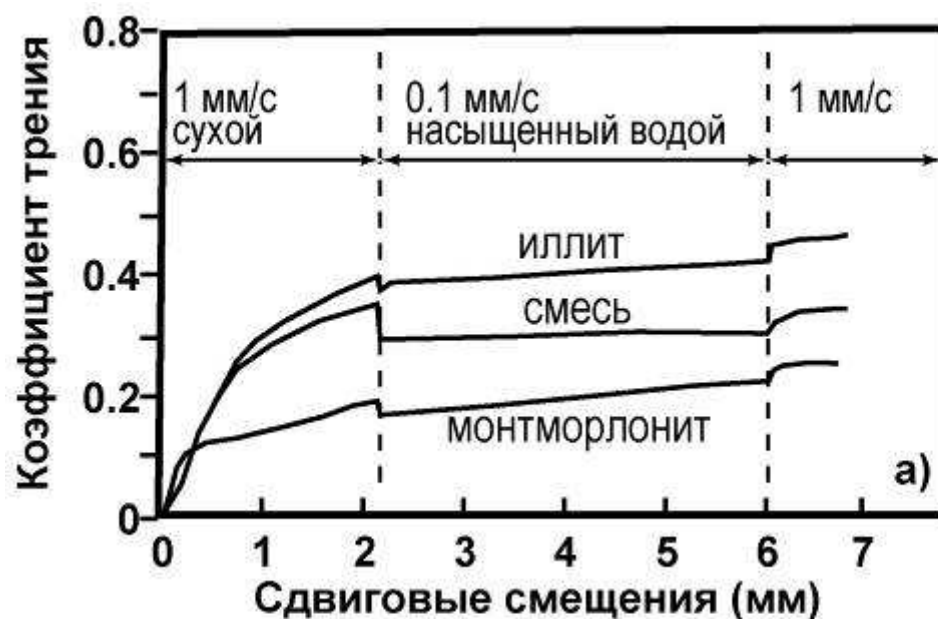
Активность треморов нарастает перед землетрясениями, достигает пика после главного толчка и затем идет на убыль. Треморы – это «отголоски» событий, которые как бы доснимают остаточные напряжения в глубинных частях разлома, которые остались после крупного землетрясения

4. Напряжения на разломе

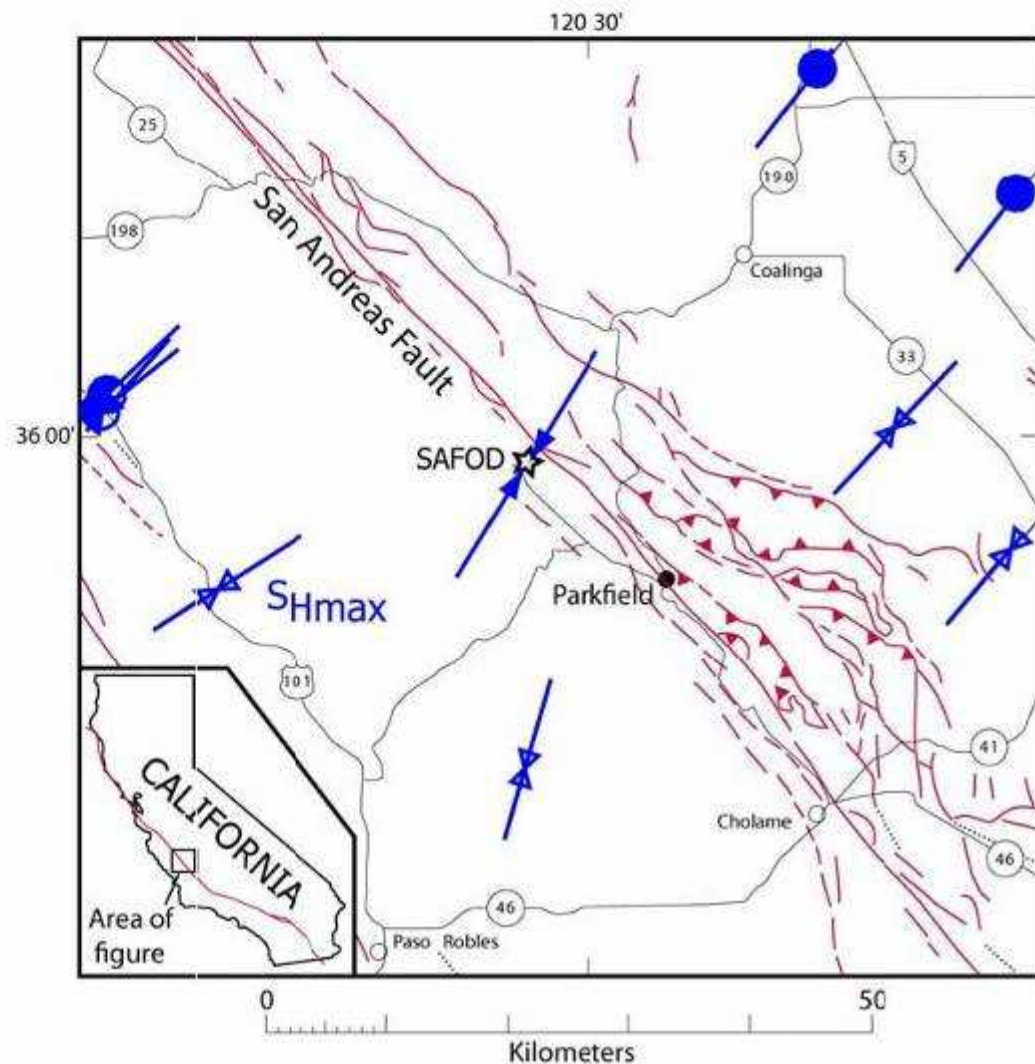
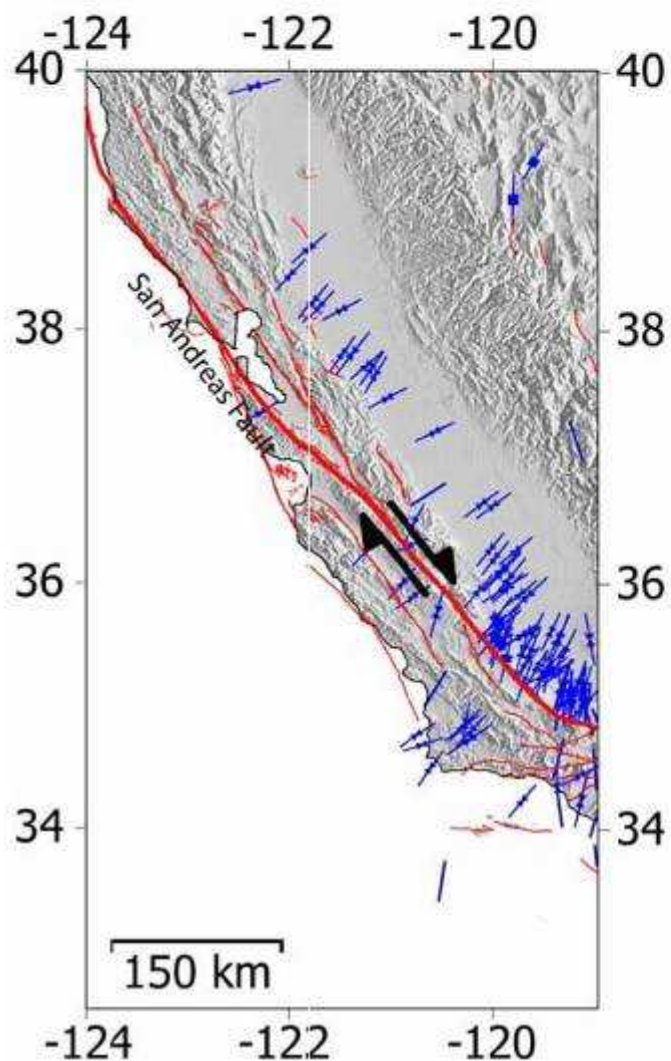


Концептуальная модель разлома, по [Chester et al., 2005].

Лабораторные эксперименты на образцах показывали достаточно высокие пределы сопротивления трению до 100 МПа при температурах и давлениях в верхней коре (Byerlee and Brace, 1968). Оценки коэффициента трения μ почти для всех пород, характерных для верхней части коры, за исключением глин и специфических минералов, по измерениям на лабораторных образцах, начиная с первой классической работы Byerlee (1978) и до настоящего времени воспроизводили величины $\mu=0.5-0.6$, причем коэффициент трения мало зависит от скорости скольжения или истории скольжения. Даже для материала разломных зон с высоким содержанием глинистых минералов μ не ниже 0.3, а сдвиговые напряжения уровня 40-60 МПа.



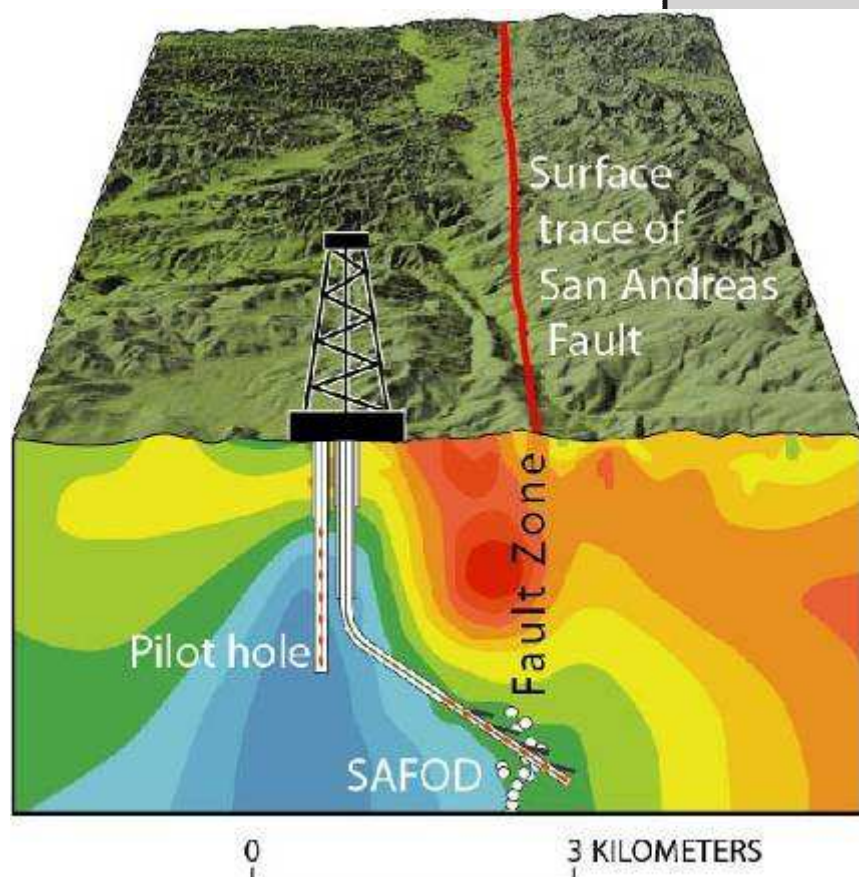
Типичный график для образца из ядра разлома, богатого филосиликатным (phyllosilicate) материалом – в приведенн случае – иллит, монтмориллонит и их смесь в пропорции 50:50. Толщина слоя в экспериментах – 1 мм, эффективное обжимающее напряжение 200 МПа, эксперименты проводились при комнатной температуре. б) Диаграмма дл: «зернистой» брекчии, использовалась брекчия кальцита. Обжимающее напряжение 40 МПа, толщина деформируемой слоя показана на графике, эксперименты проводились при комнатной температуре. По (Faulkner et al., 2003).



Сводка ориентировок максимальных горизонтальных напряжений (S_{Hmax}), полученных по инверсиям фокальных механизмов землетрясений и данным из скважин в окрестности Паркфилд, по [Bones, Zoback, 2006].

5. Проект SAFOD San Andreas Fault Observatory at Depth

2003 г. - Пилотная скважина.
 2004 и 2005 г.г. – Фазы 1 и 2 скважина
 пересекала активную зону разлома на
 глубине около 2.6-2.7 км.
 2007 г.г. - Фаза 3 – отбор керна из
 вспомогательных ответвлений





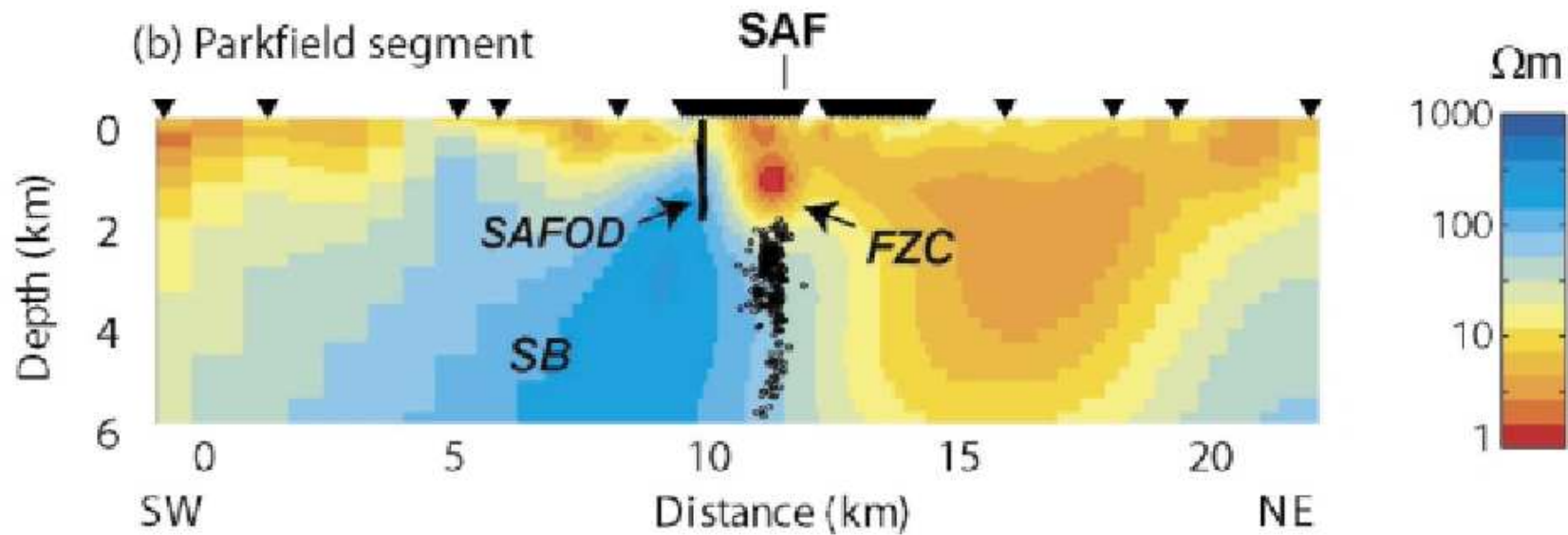
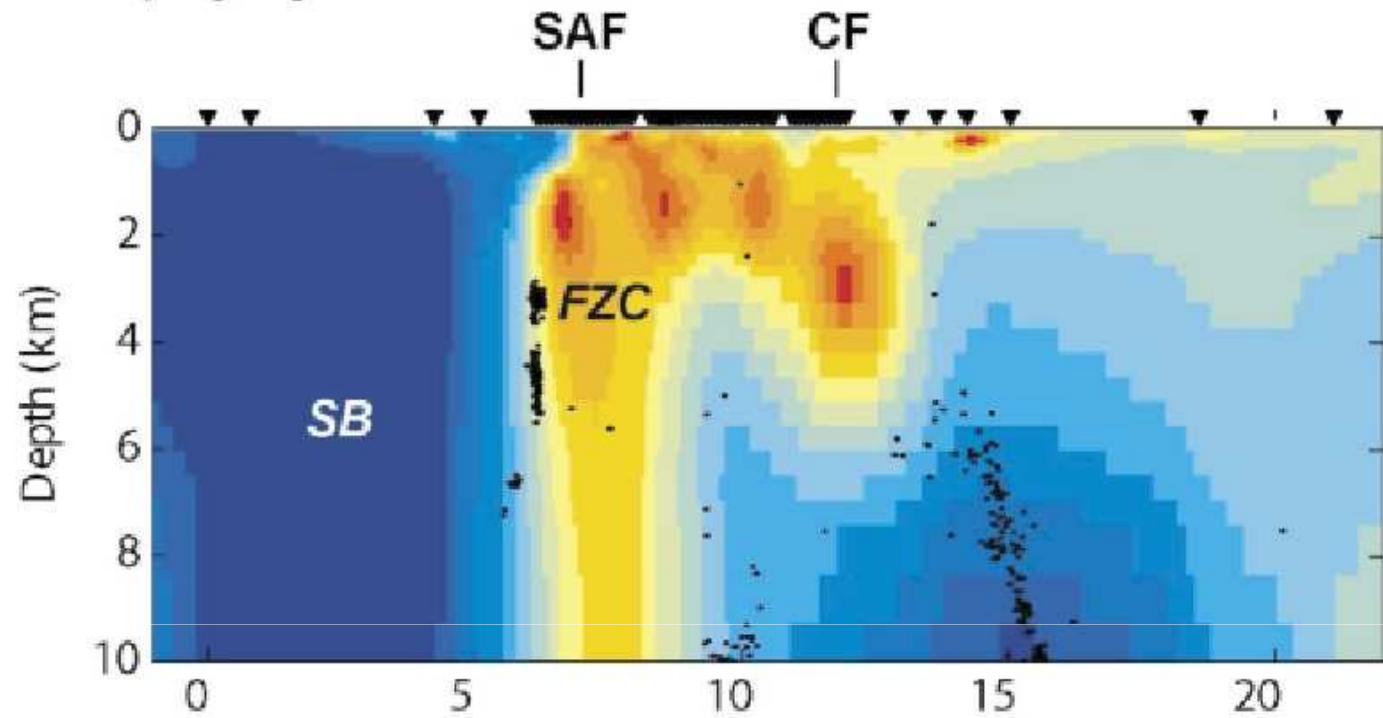
1) Не было обнаружено признаков аномально-высокого порового давления флюида в керне, взятом из стрэндов разлома Сан-Андреас

2) В Салинианском блоке, поровое давление слегка надгидростатическое и фиксируются обычные отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$. В противоположность этому, в блоке Великой Долины фиксируются существенно повышенное поровое давление (синие тона) и высокие отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ – признак мантийного гелия (Wiersberg, Erzinger 2007, 2011). Разломная зона Сан-Андреас разделяет очень разные гидрогеологические режимы по обеим сторонам разлома.

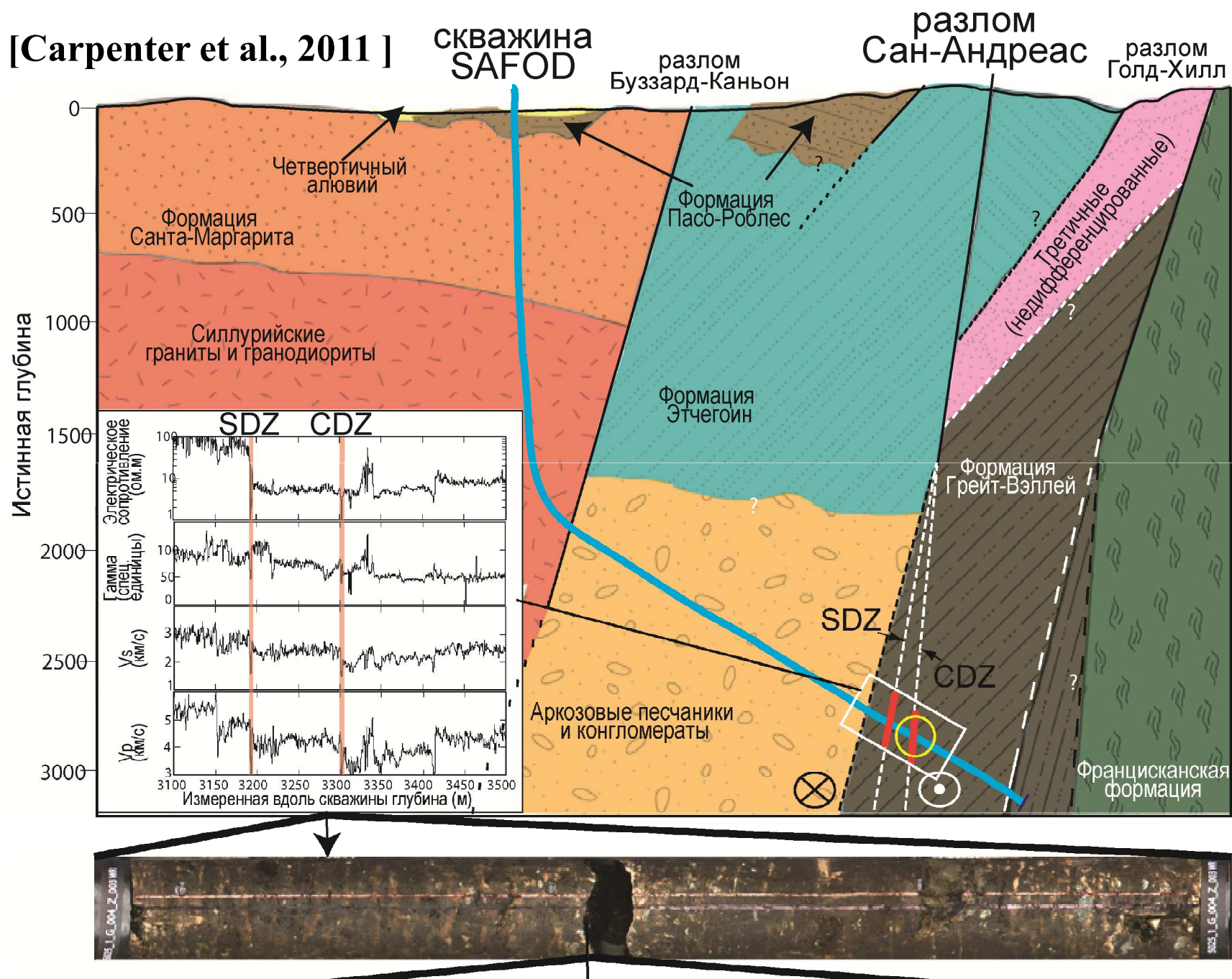
3) Магнитотеллурические исследования оконтуривали в блоке Великой Долины аномалию высокой проводимости

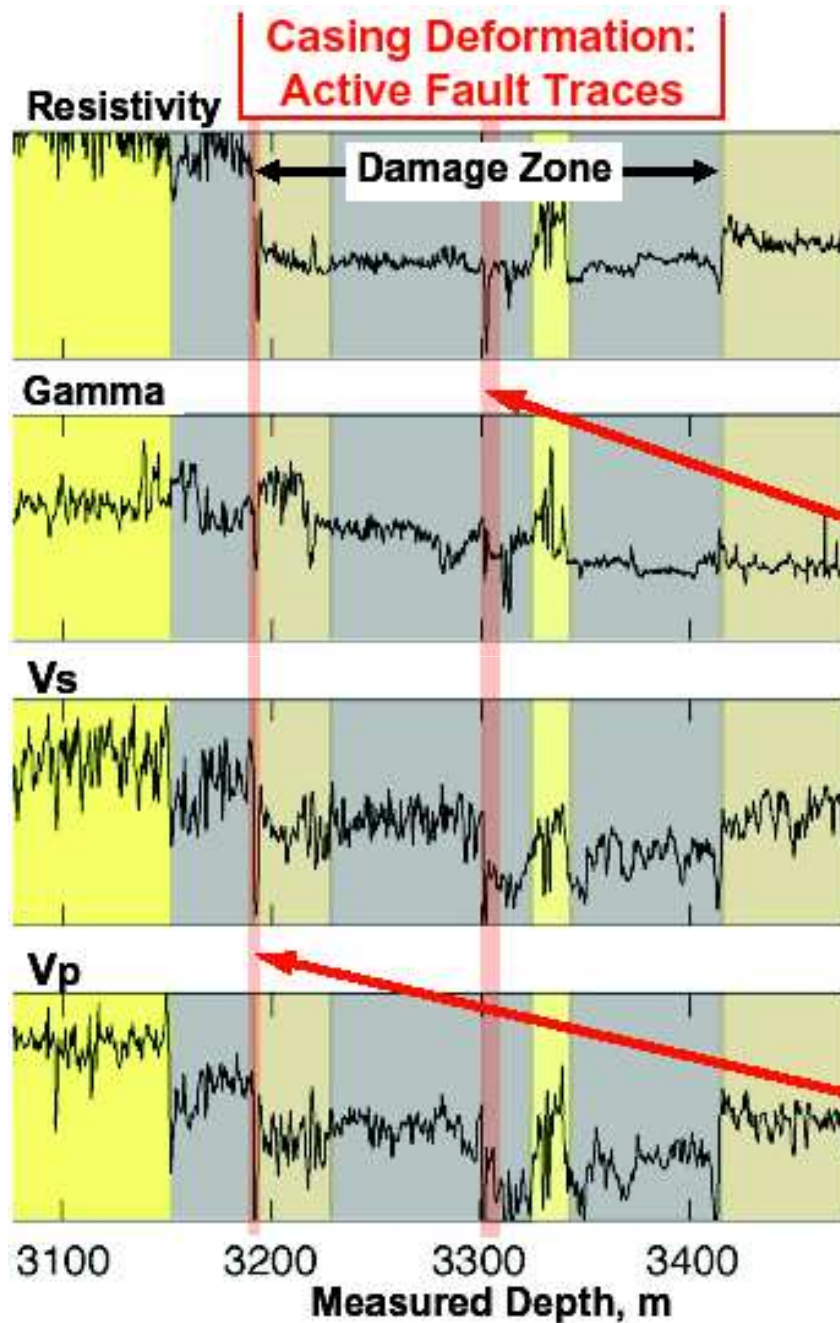
По [Fulton, Saffer, 2009)]

(a) Central creeping segment

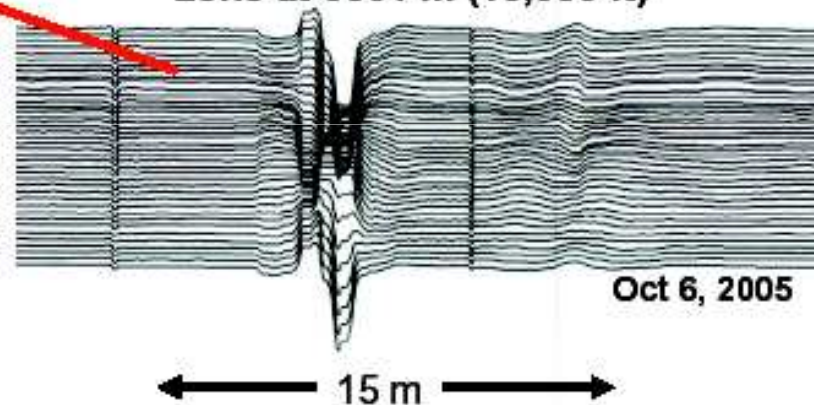


По [Carpenter et al., 2011]





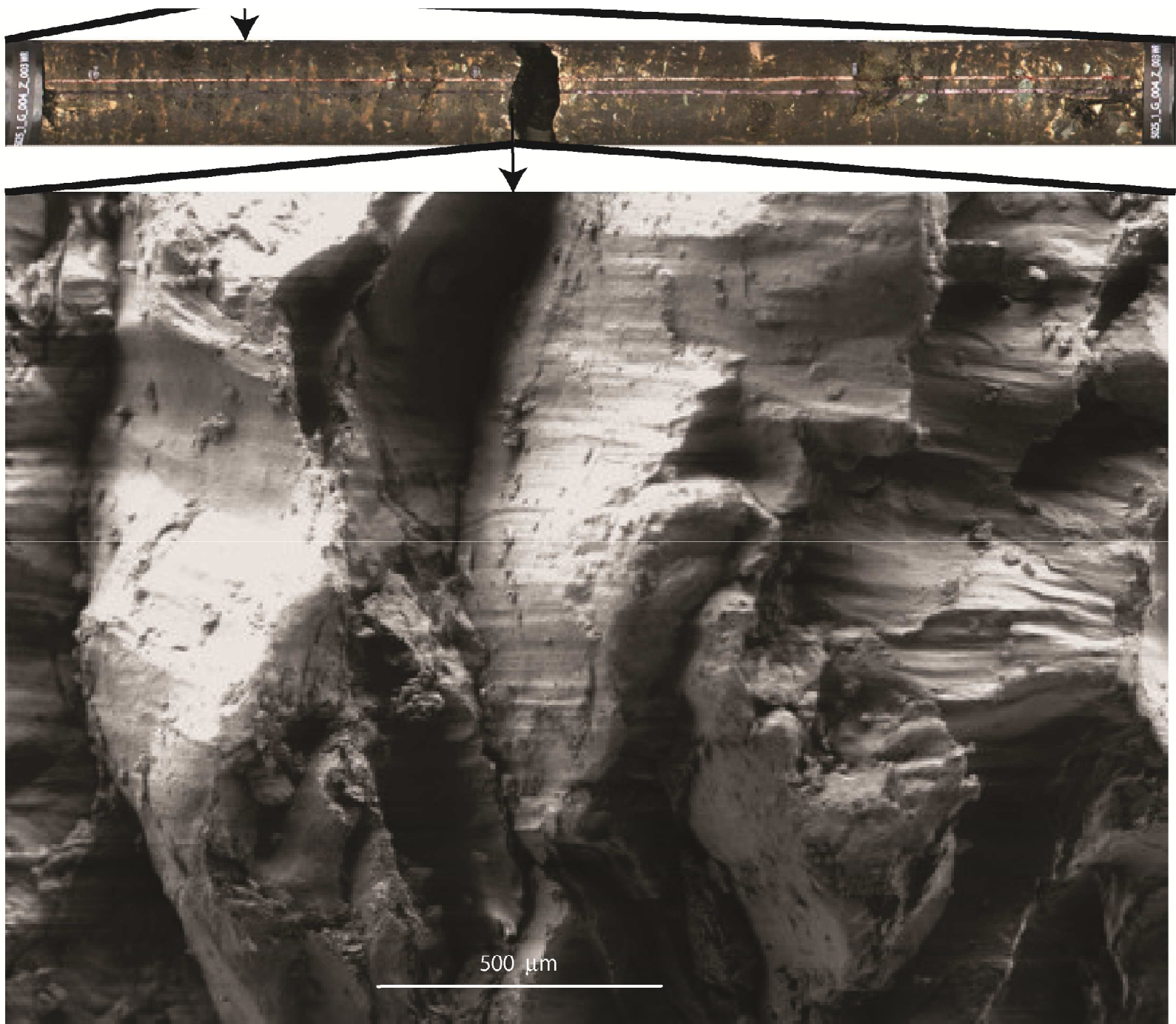
**Identified primary casing deformation
zone at 3301 m (10,830 ft)**



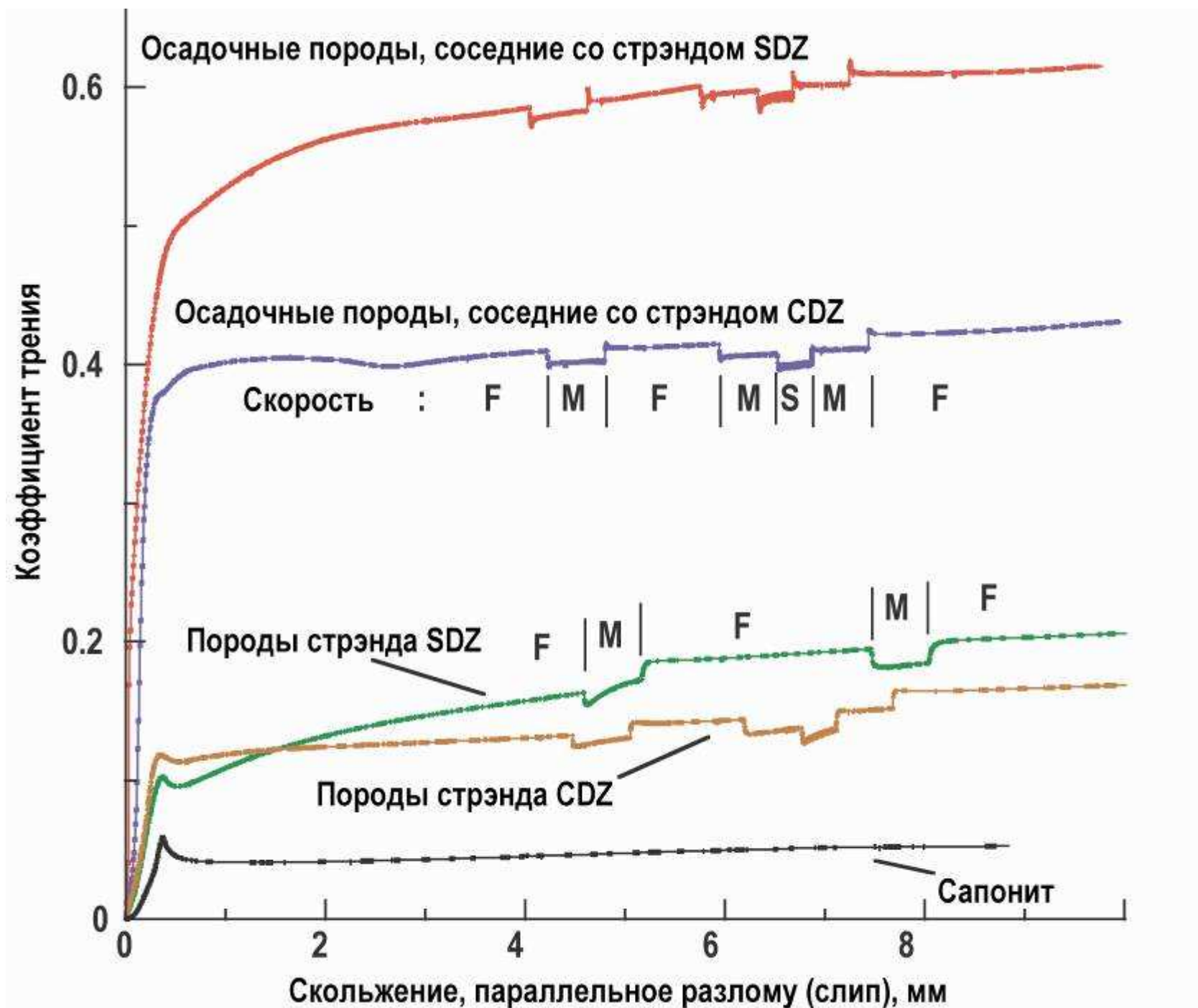
Oct 6, 2005

**Log 5 (June 5, 2007) revealed new, secondary
zone of casing deformation at 3194 m (10,480 ft)**





По [Carpenter et al., 2011]



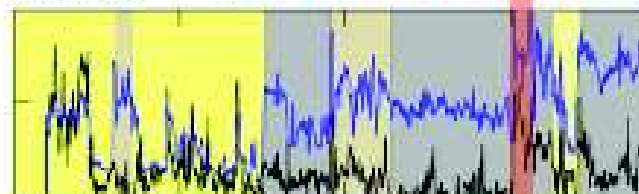
SW

**Casing Deformation:
Primary Active Fault**

Sandstone Shale Siltstone Claystone

NE

Porosity



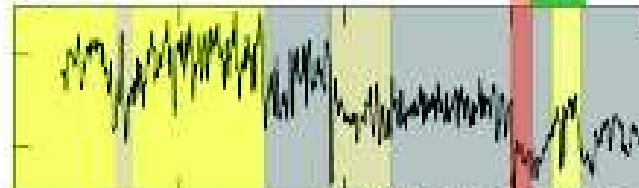
Resistivity



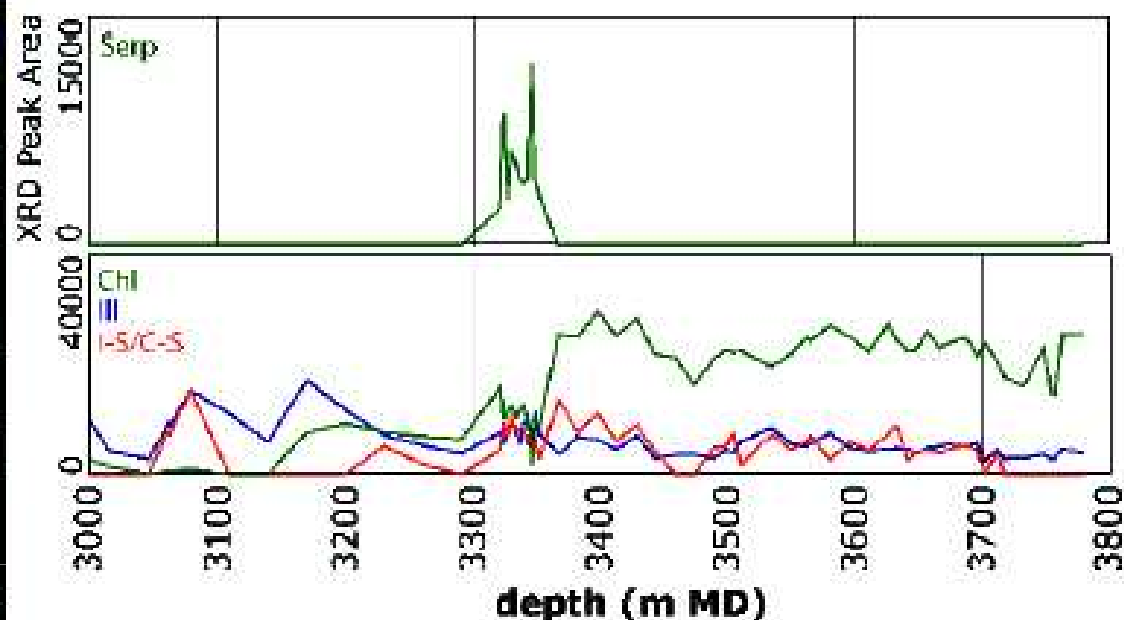
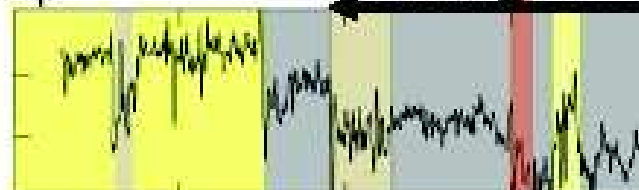
Gamma



Vs



Vp



Serpentine Peak and Change in Clay Mineralogy

**But how is serpentine
related to active slip zone?**

Damage Zone

km/s

3

2

6

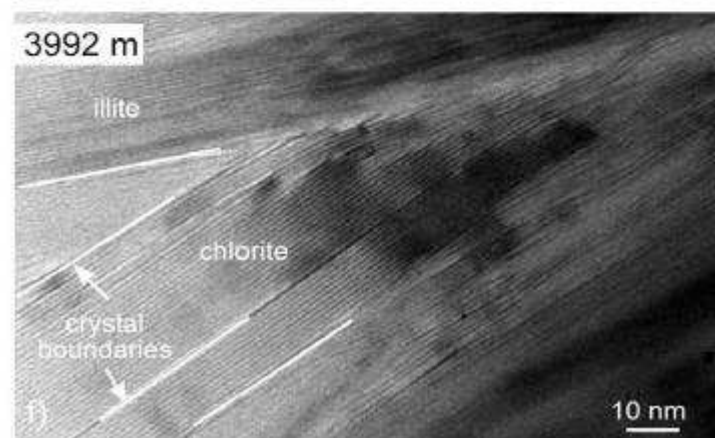
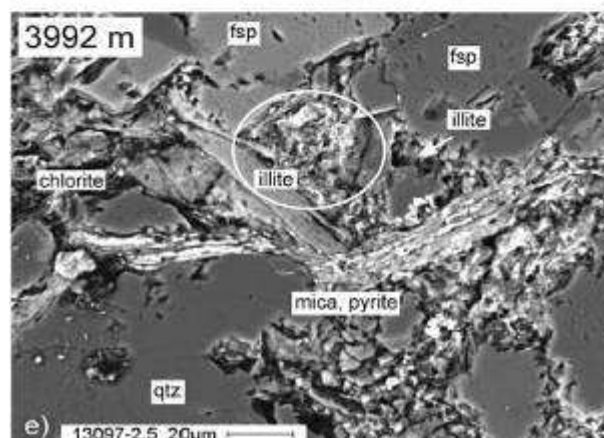
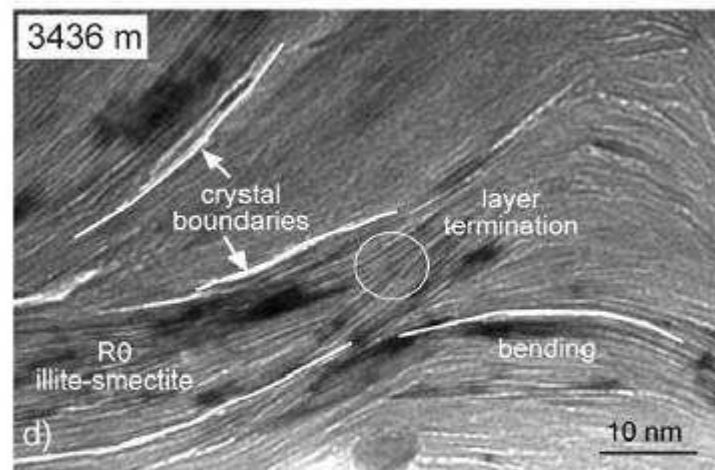
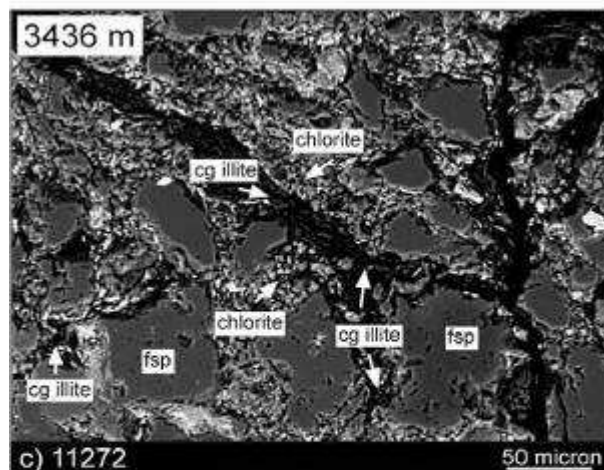
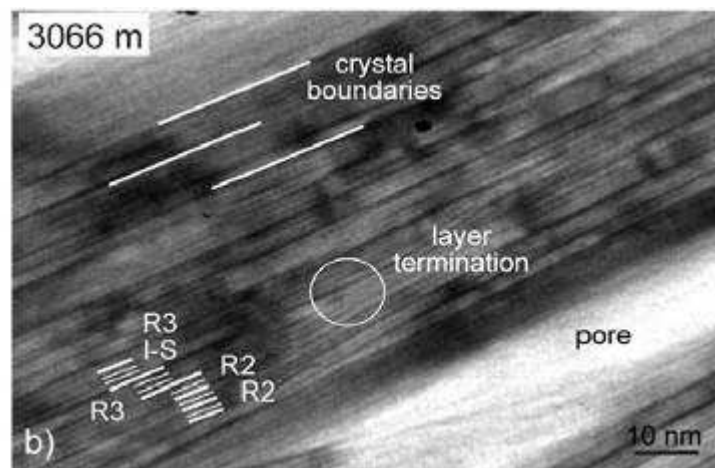
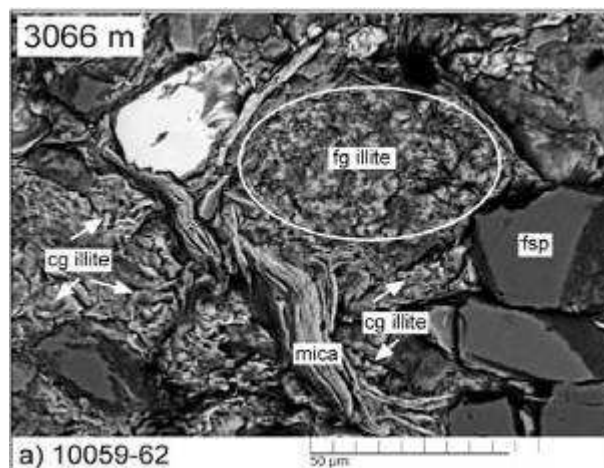
5

4

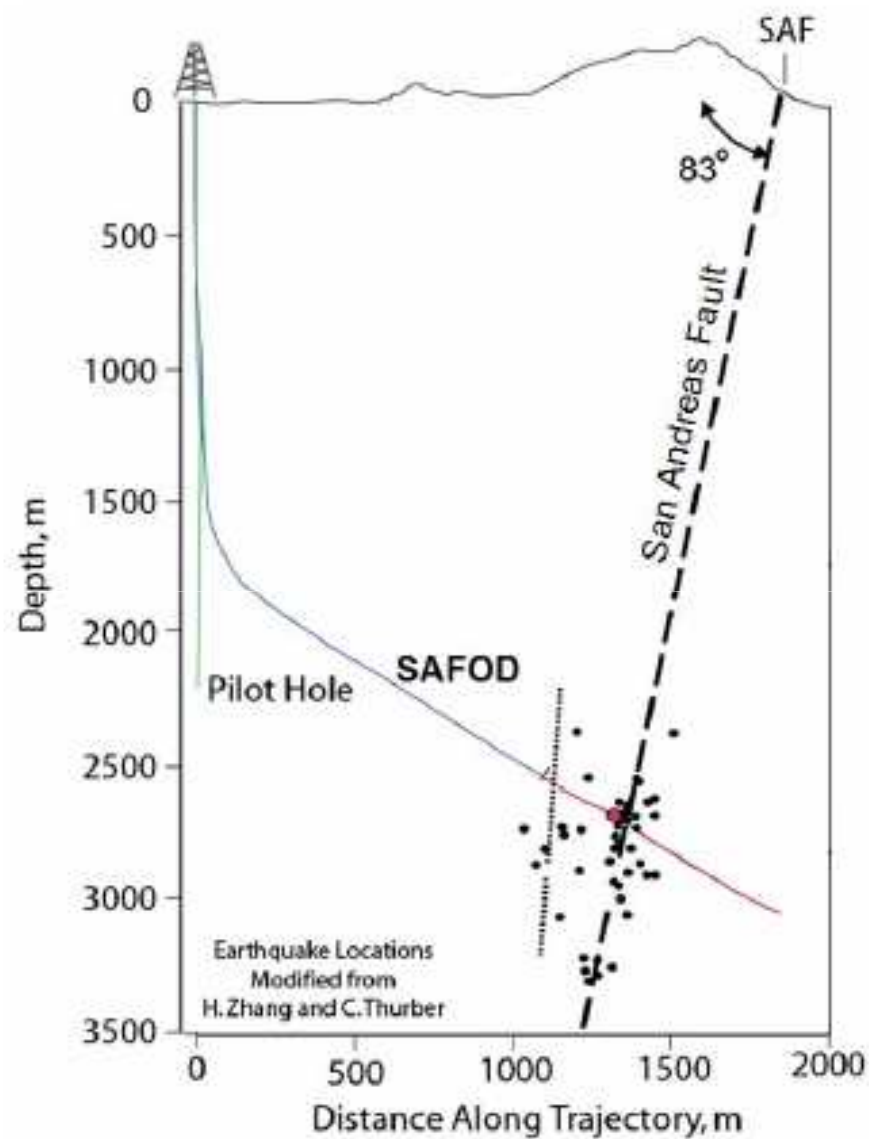
3

km/s

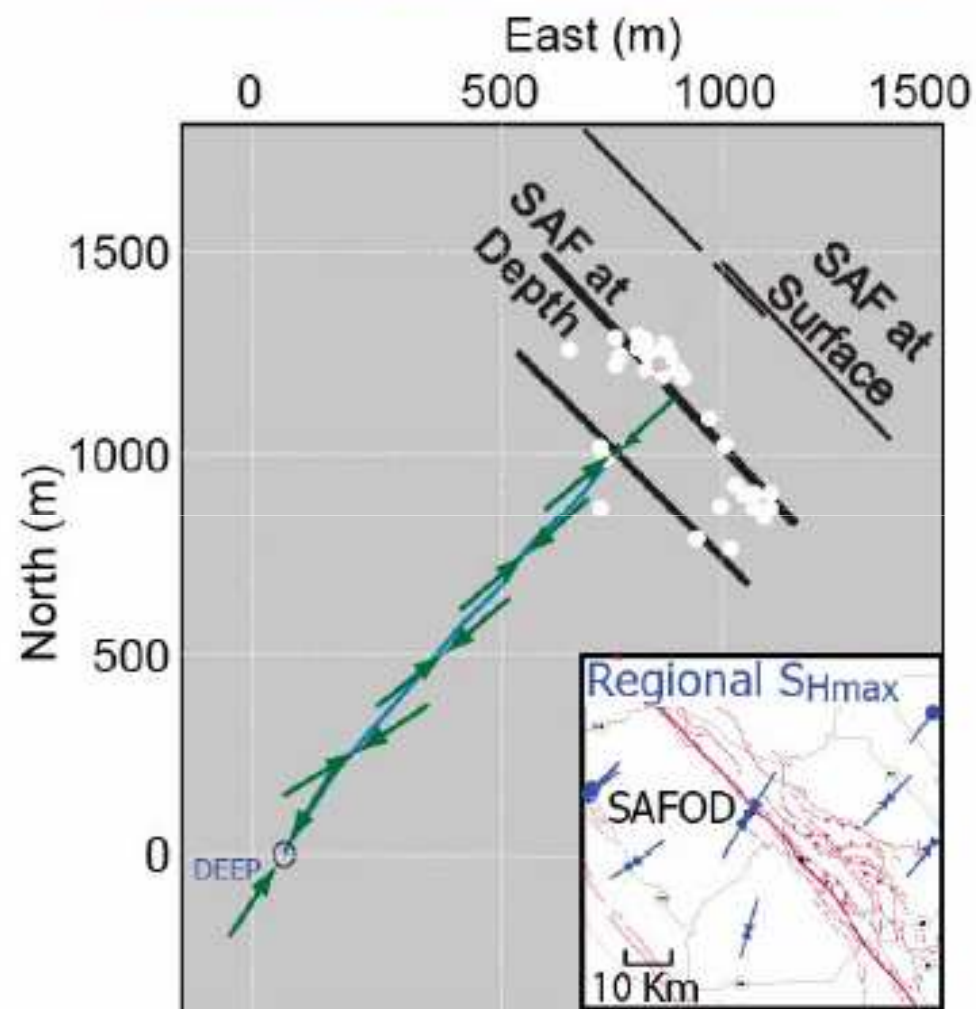
3000 3100 3200 3300 3400 3500 3600 3700 3800 3900 4000
Measured Depth (m)

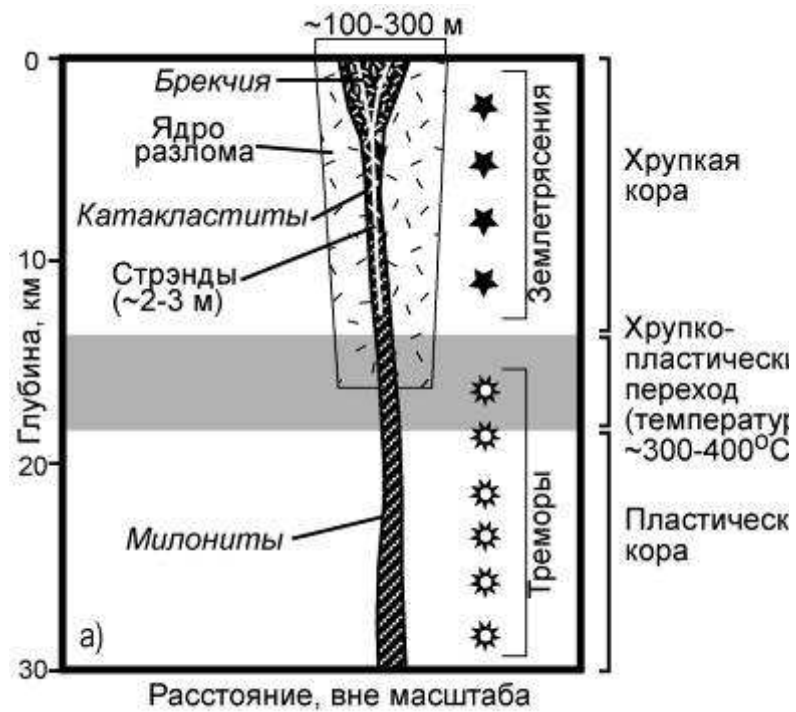
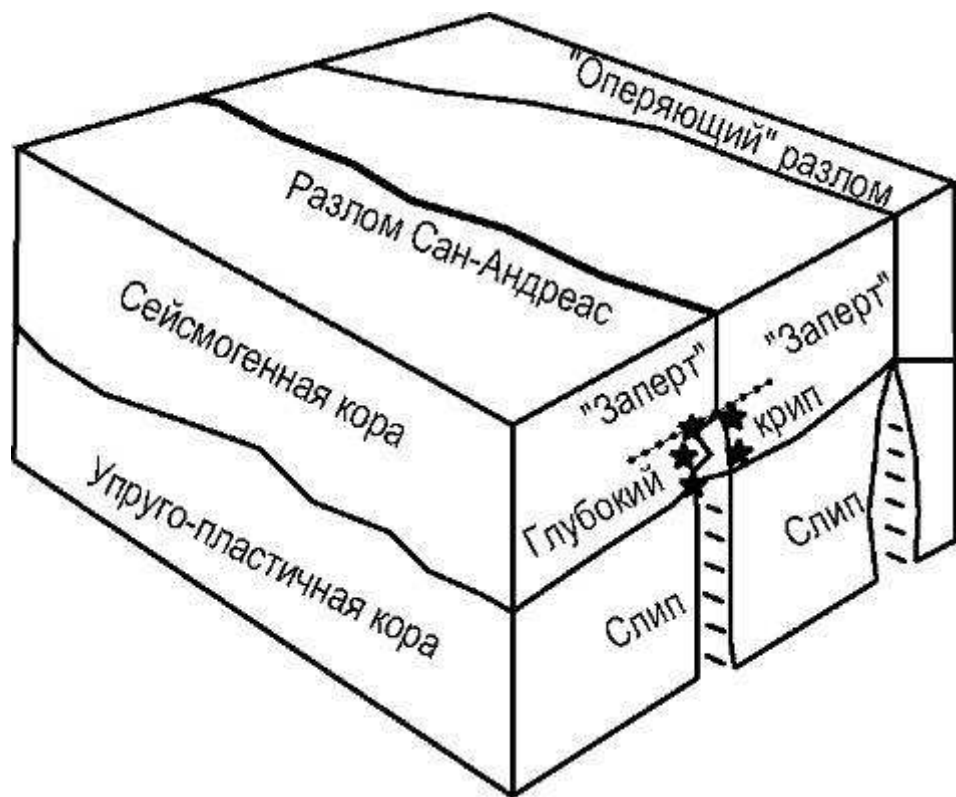


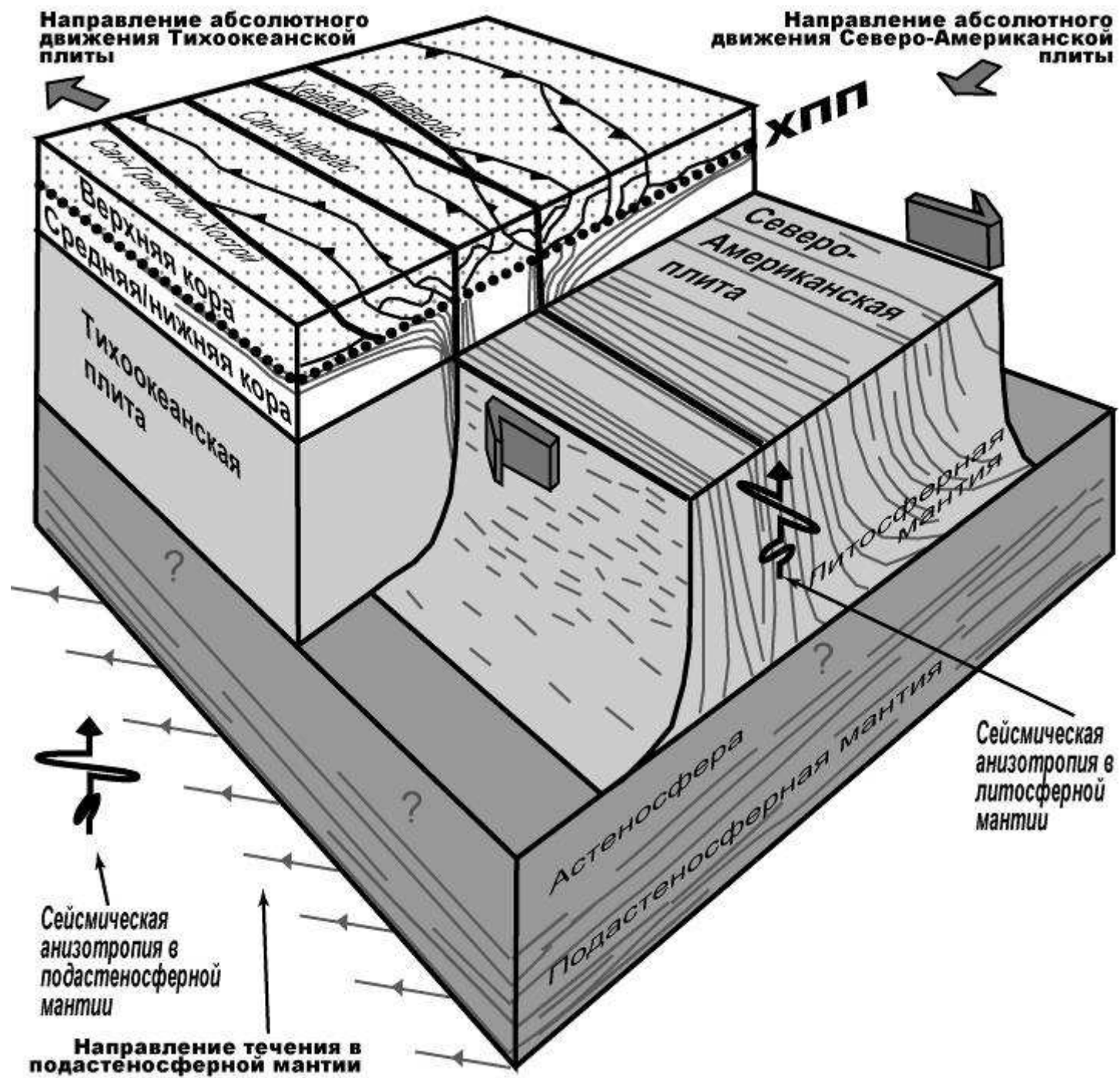
Выявлено систематическое деплетирование в концентрациях некоторых химических элементов в зернах, располагающихся непосредственно в стрэндах, по сравнению с зернами вмещающих пород. Это доказывает, что в разломных зонах идут интенсивные петрохимические процессы. В частности, в условиях повышенных напряжений на поверхностях скольжения, зерна полевого шпата и кварца могут растворяться, а новая локальная минерализация илита/смектита должна концентрироваться вдоль поверхностей скольжения по границам зерен (Schleicher et al., 2009; Moore, Rymer, 2010).



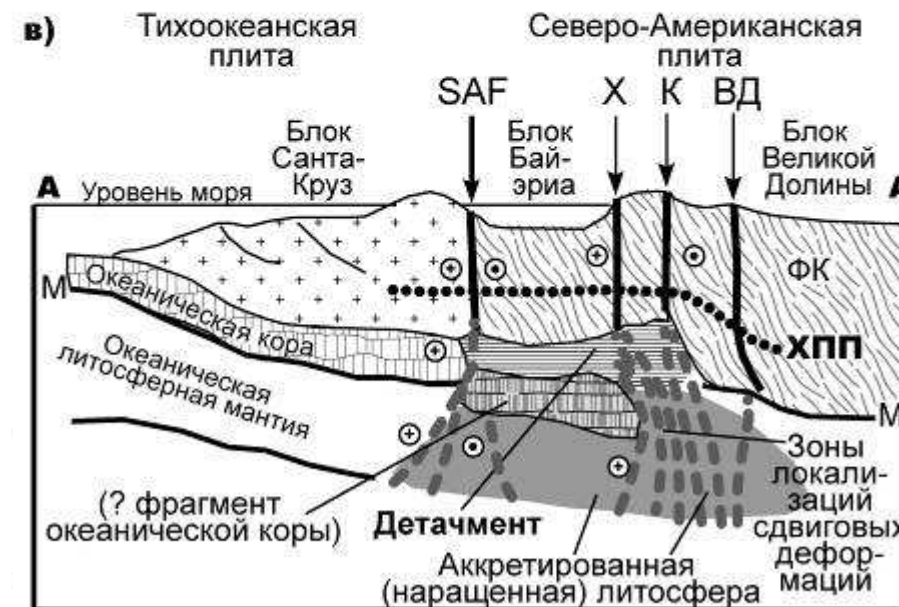
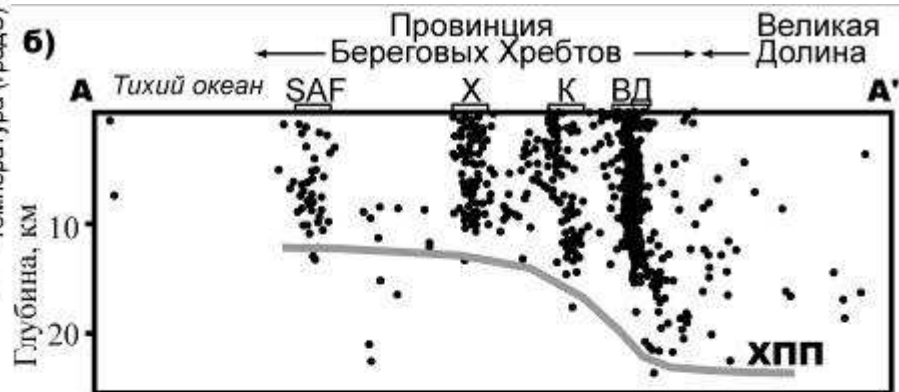
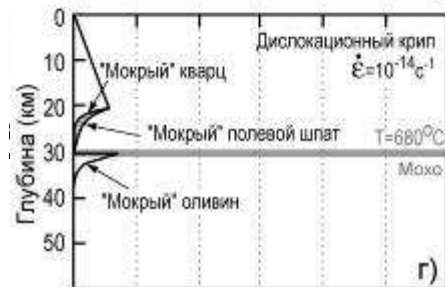
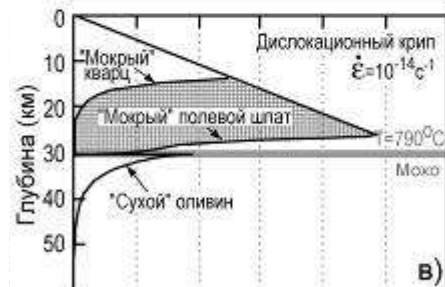
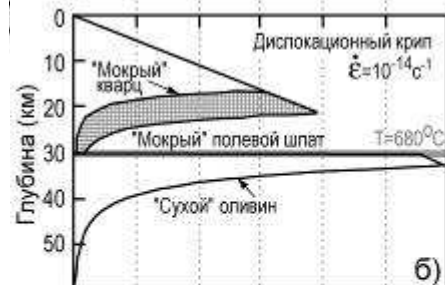
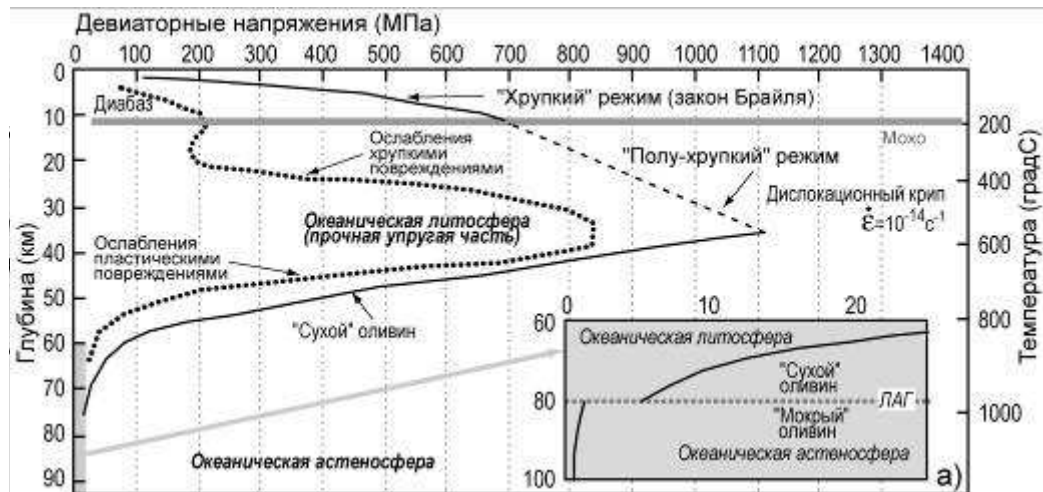
S_{Hmax} Direction in SAFOD from Shear Wave Polarization (Boness and Zoback, 2006)





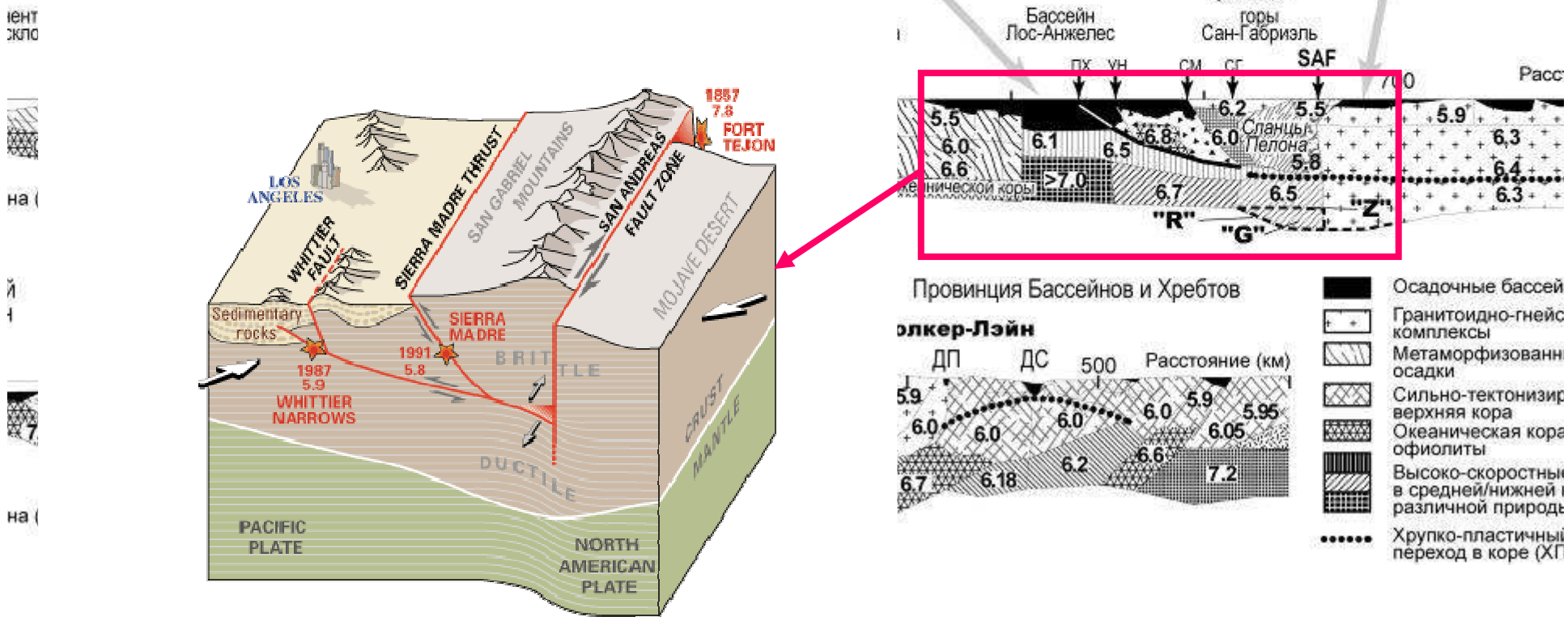
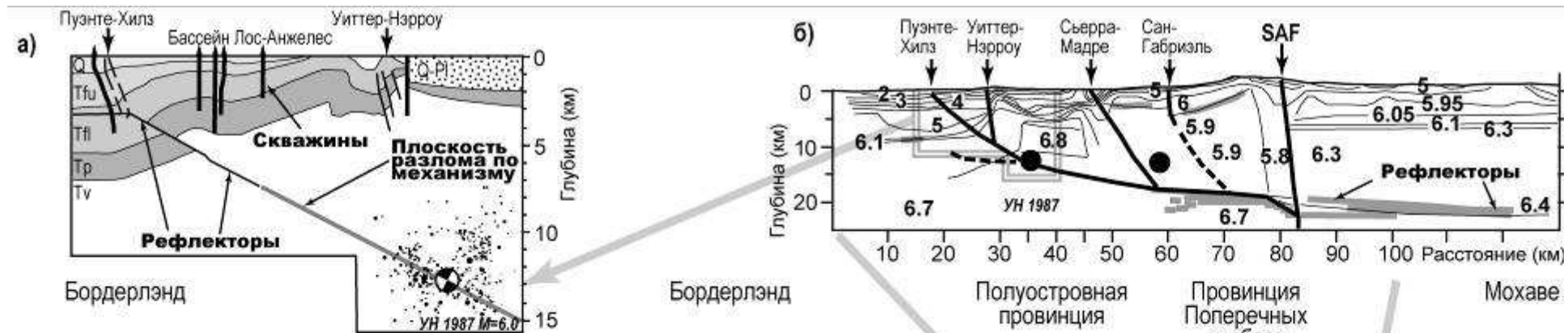


6. Механизм миграции главной плоскости скольжения системы на восток. Хрупко- пластичный переход в коре



Зона формирования сланцев в средней/нижней коре

Направл. движения
а) от наблюдателя
б) к наблюдателю



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ
ВСЕ!!!**

