

Об изменениях механизма землетрясений с глубиной

М.В. Родкин

ПЛАН ДОКЛАДА:

1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ВОПРОСА
2. ВАРИАНТЫ ОБЪЯСНЕНИЯ ПАРАДОКСА
3. ЧЕГО КАТЕГОРИЧЕСКИ НЕ ХВАТАЕТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ
4. ВЫЯВЛЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ ЭТИХ НЕДОСТОЮЩИХ МОМЕНТОВ

Скоро исполняется столетие (1922 by Н.Н.Турнер) открытию глубоких землетрясений. В 1928 году К. Wadati доказал существование таких землетрясений.

Выявление глубоких землетрясений дало основание первому – наиболее известному - **парадоксу сейсмичности**.

Действительно, землетрясения по общепринятому механизму упругой отдачи Рида (1910) невозможны на глубинах более нескольких десятков километров.

Практически сразу был предложен ряд (частично конкурирующих) механизмов реализации более глубоких землетрясений.

Основных моделей 3:

1. Дегидратационного охрупчивания (dehydration embrittlement)
2. Модель фазовых переходов (transformation-induced faulting).
3. Температурно-деформационной неустойчивости, подплавления (adiabatic shear instability).

Особый интерес к проблеме глубокой сейсмичности наблюдался в 80-ые годы, в связи с битвами фиксистов и мобилистов

Пример сейсмотомографмм и расположения землетрясений в теле погружающейся плиты

ВЫЯСНИЛОСЬ:

Глубокие землетрясения часто происходят НЕ на границах плит, процесс деформационно-температурной неустойчивости НЕ процесс не определяет.

Механизмы очагов носят сдвиговый характер, соответственно, модель схлопывания при фазовом переходе также НЕ работает.

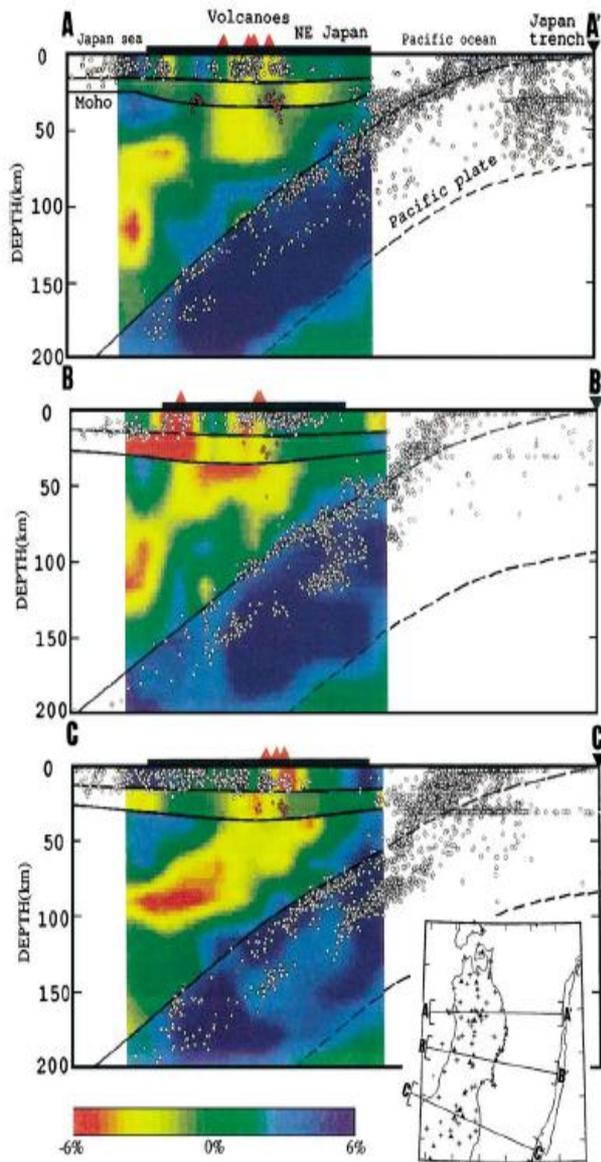


Fig. 1. Vertical cross sections of P-wave velocity structure beneath northeast Japan from the Earth's surface to 200 km depth along the profiles shown in the insert map. Red and blue colors denote slow and fast velocities, respectively. The velocity perturbation scale is shown at the bottom. Open circles denote earthquakes that occurred within a 20-km width along each profile. Red circles show low-frequency microearthquakes that occurred around the Moho discontinuity, due to the magmatic and volcanic activity. Red triangles, active volcanoes; reverse triangle, the location of the Japan Trench. The horizontal bar at the top of each cross section shows the land area where seismic stations exist. The three thick curved lines denote the Conrad and Moho discontinuities and the upper boundary of the subducting Pacific slab. The dashed line shows the lower boundary of the slab (after Zhao et al., 1992a).

Теоретически показано, что в условиях температур и давления недр Земли хрупкое разрушение по модели Рида невозможно на глубинах более 30-50 км. Однако землетрясения более-менее непрерывно продолжаются до глубин 700 км,

Причем отмечаются только **второстепенные различия**: у глубоких землетрясений в среднем **выше величины кажущихся и сброшенных напряжений**, обычно меньше афтершоков, а характер излучения имеет более симметричные фазы нарастания и спада, **наблюдается зависимость параметров сейсмичности от температуры.**

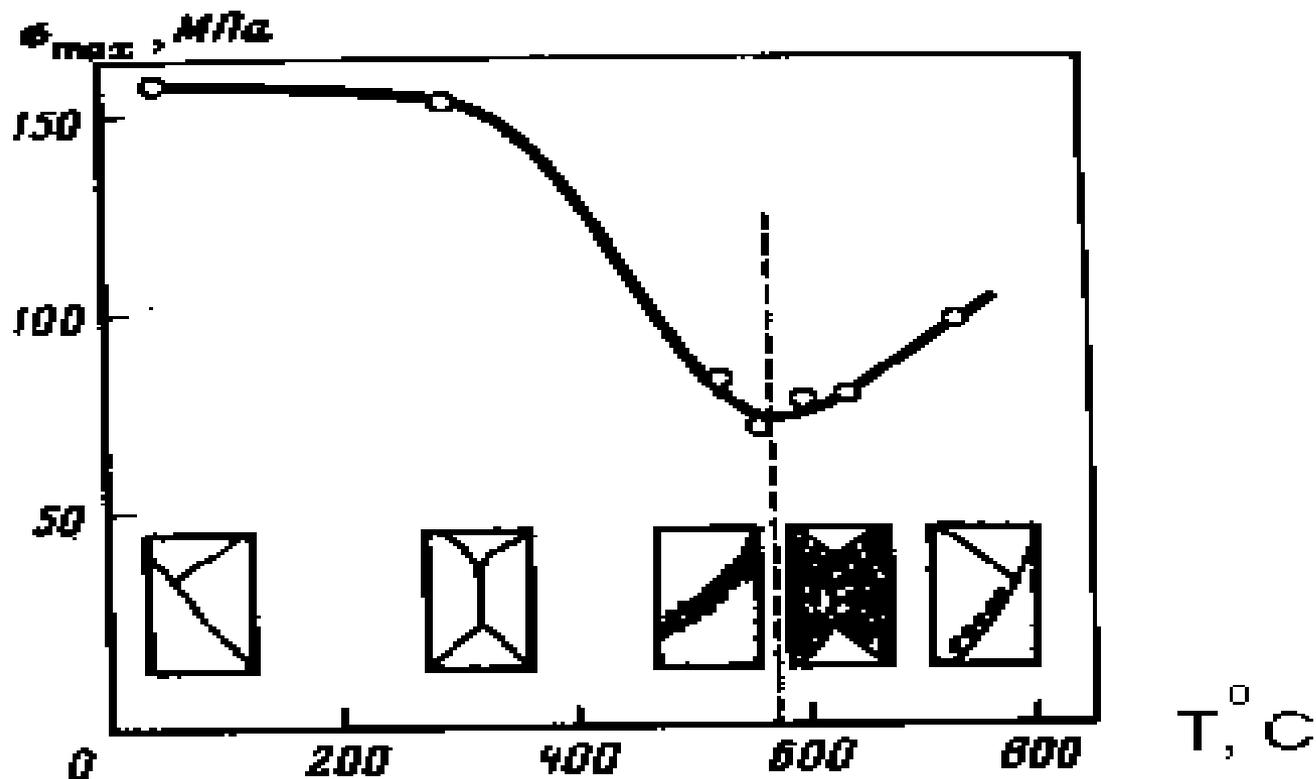
Модель дегидратации почти общепринята для объяснения промежуточных землетрясений, с глубинами от 50-70 до 150-300 км; для объяснения глубоких землетрясений обычно привлекают модели, связывающие их возникновение с фазовыми превращениями в переходной зоне мантии, но предлагаются и иные модели.

Различие моделей генезиса землетрясений как бы предполагает различие их характеристик. **Но соответствующих различий выявлено не было, указанные слабые различия не дают предпочтения какому-либо из возможных механизмов сейсмичности.**

Ниже будут приведены свидетельства как правомочности парадокса сейсмичности, так и различий в режиме разноглубинных землетрясений.

Немного эксперимента (Калинин и др., 1989):

Изменение характера разрушение при превращении в образце габбро.
Происходит падение прочности, дезинтеграция тела,
тело частично как бы рассыпается в песок.



Классический характер деформации при трансформационной сверхпластичности в зависимости от приложенного напряжения

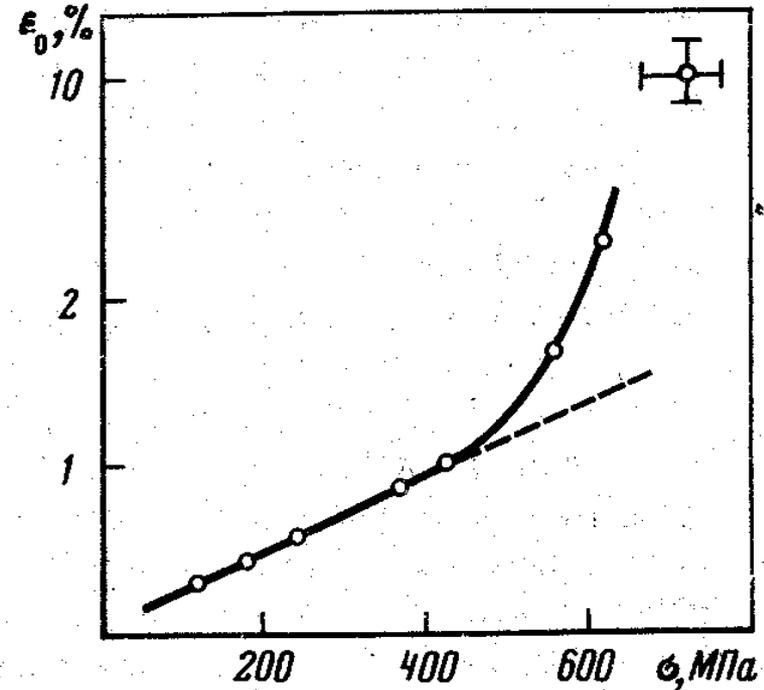
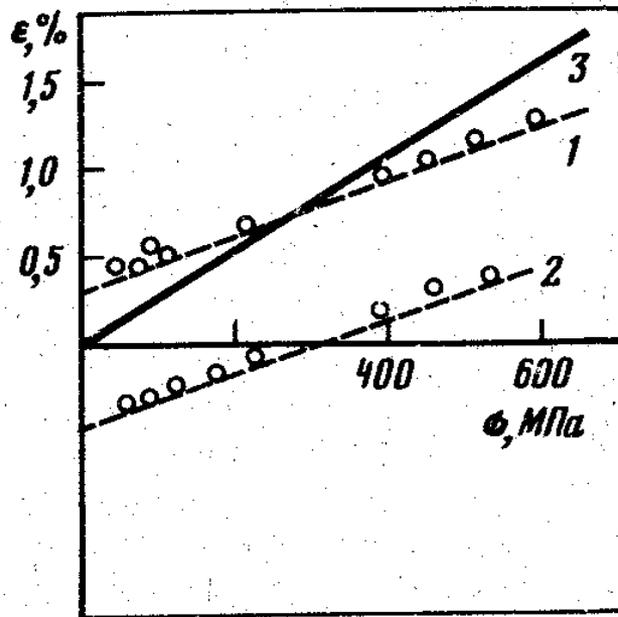


Рис. 3.1. Деформация образца Fe + 0,08% N в процессе фазового перехода при циклическом изменении температуры (по: [202])

1 — при переходе $\alpha - \gamma$; 2 — при обратном переходе; 3 — суммарная деформация

Рис. 3.2. Зависимость деформации железа за цикл ($\alpha \rightleftharpoons \gamma$)-перехода ($T = 910 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta V/V = 1\%$) от приложенного напряжения [220]

Классическое полуэмпирическое реологическое соотношение для трансформационной сверхпластичности

$$\varepsilon = R(\Delta V/V) \sigma / I \cdot c,$$

$$\dot{\varepsilon} = R(\Delta V/V) (\sigma / I) \dot{c},$$

Следуя [Калинин и др., 1989; Родкин, 1993], приведем модельный расчет основных характеристик гипотетического механически ослабленного слоя, образующегося на границе активизированной фазовой границы. Как уже обсуждалось в предыдущих главах, реология области, охваченной твердотельными превращениями, описывается соотношением, во многом аналогичным уравнению движения вязкой жидкости. Эффективная вязкость η такого слоя определяется выражением (3.14)

$$\eta = \frac{1}{R} \frac{V}{\Delta V} \frac{I}{\dot{c}}.$$

Используя это соотношение, оценим скорость v и амплитуду δL смещения тектонического покрова, в основании которого лежит слой активизированного твердотельного превращения. Для оценки средней скорости смещения воспользуемся ранее приведенным соотношением (3.16):

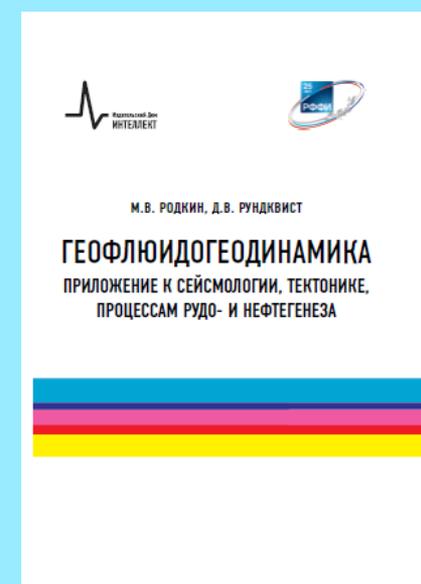
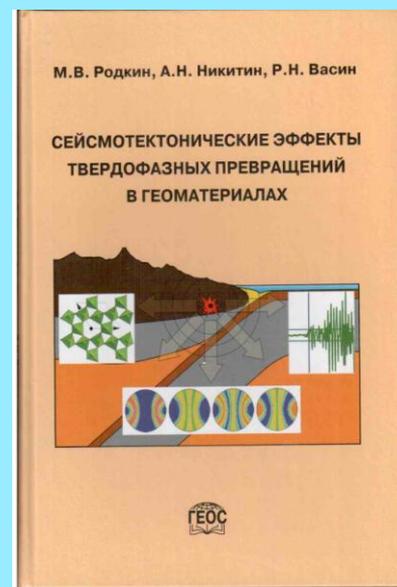
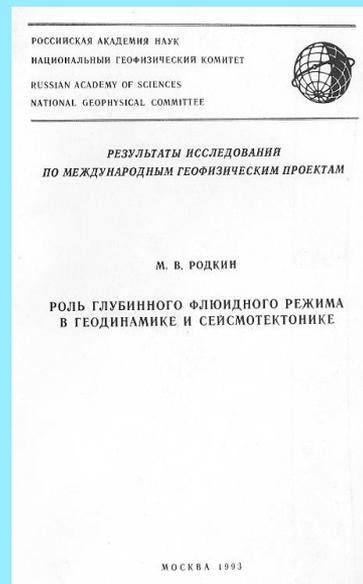
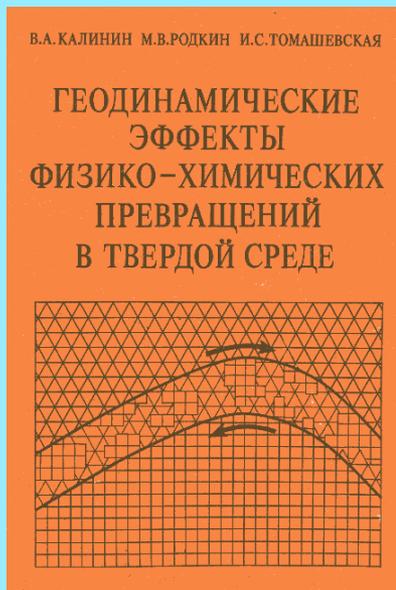
$$v = R \frac{V}{\Delta V} \frac{\sigma}{I} \dot{c} \delta h \quad (3.20a)$$

и положим

$$\delta L = vt, \quad (3.20b)$$

где σ — действующие вдоль слоя сдвиговые тектонические напряжения; δh — мощность слоя, охваченного превращением; t — длительность эпизода активизации данного превращения.

Оценим входящие в (3.20) параметры. Средняя скорость твердотельного метаморфического превращения в литосфере определяется характерным временем релаксации возникающих при превращении возмущений температурного поля и упругих напряжений.



Авторский подход к означенным проблем разрабатывался в 1982 -1995 годах и отражен в приведенных нескольких монографиях, последняя из которых демонстрировала определенные экспериментальные подкрепления высказанных ранее теоретических предположений.

[Калинин и др., 1989; Родкин, 1993] и их экспериментального подкрепления в [Родкин и др., 2009] и в соответствующих статьях.

АНАЛОГИЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИЗ АНГЛОЯЗЫЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

Didier Sornette (2001)

Mechanochemistry: A Hypothesis for Shallow Earthquakes

An earthquake is a sudden rupture in the earth's crust or mantle caused by tectonic stress.

Notwithstanding almost a century of research since the standard rebound theory of earthquakes was formulated (Reid, 1910), **the complex nature and many facets of earthquake phenomenology still escape our full understanding.**

Three important paradoxes, the strain paradox, the stress paradox and the heat flow paradox, that are difficult to account for in the present stage of understanding of the earthquake processes

Eugeniusz Majewski Roman Teisseyre (2001)

Anticrack-Associated Faulting and Superplastic Flow in Deep Subduction Zones.

It is generally well known **that different mechanisms are responsible for shallow and deep earthquakes**

In the case of shallow earthquakes it is the brittle shear fracture of rock and frictional sliding on preexisting fault surfaces that are leading mechanisms. Conversely, **in the case of deep Earth's interior, generating the cracks and voids is impossible because of high pressure and high temperature.**

The suggested models:

1. The first, dehydration embrittlement
2. The second, transformation-induced faulting, involves localized generation of a nanocrystalline solid material that behaves very much like a fluid
3. The third mechanism, adiabatic shear instability, involves positive feedback between heat produced by deformation and weakening caused by that heat under conditions of essentially constant shear stress

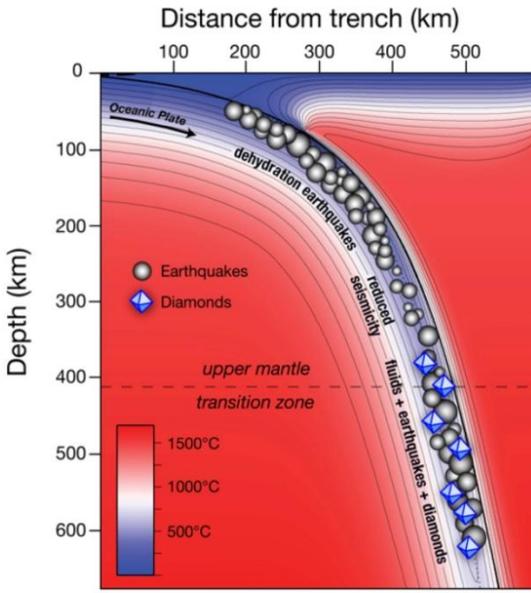
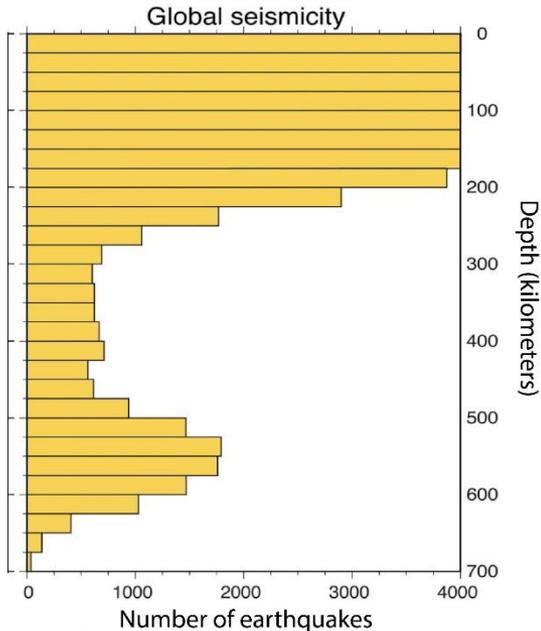
Где какой механизм работает остается не ясным.

В 2021 появились новые статьи в пользу того, что и глубокие землетрясения ($H > 300$ км) также связаны с дегидратационным охрупчиванием

[Zulian, 2021]

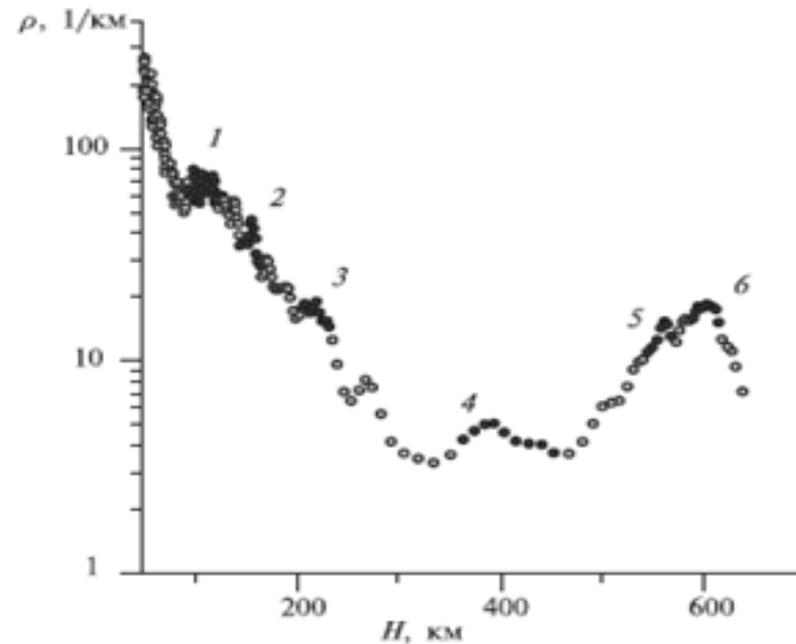
A fluid's journey into deep Earth may explain deep quakes.

Shirey, S. B., Wagner, L. S., Walter, M. J., Pearson, D. G., & van Keken, P. E. (2021). Slab transport of fluids to deep focus earthquake depths—thermal modeling constraints and evidence from diamonds. AGU Advances



We find a remarkable correlation between slabs capable of transporting water to transition zone depths in dense hydrous magnesium silicates with slabs that produce seismicity below ~300-km depth, primarily between 500 and 700 km.

Распределение сейсмичности по глубине, подобные графики часто используют как указание на связь глубоких землетрясений и фазовых переходов.

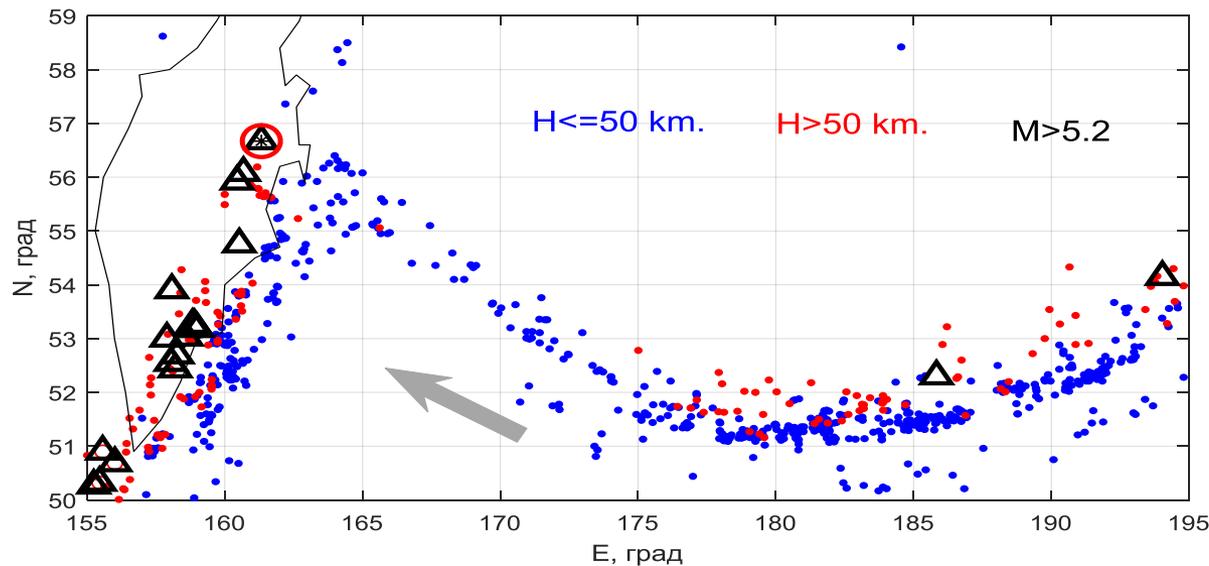


Зависимость плотности числа событий ρ (по данным Гарвардского каталога) от глубины H . Черным цветом выделены максимумы, соответствующие глубинам твердофазных превращений: 1 — десерпентинизация (двойная сейсмофокальная зона); 2 — эклогитизация; 3 — образование А-фазы; 4 — α - β - превращение; 5 — β - γ -превращение; 6 — γ -фаза P_v+M_w переход.

Альтернативное объяснение — постепенное ослабление сейсмичности сверху вглубь, по мере роста температуры, и максимум в нижней зоне, где плита «упирается» в границу средней и нижней коры.

Подтверждение ПАРАДОКСА СЕЙСМИЧНОСТИ.

Соотношение развития приповерхностной и более глубокой сейсмичности (синие и красные точки соответственно) и активных вулканов (треугольники). Стрелкой дано направление движения Тихоокеанской плиты. Красным кружком обведён вулкан Шивелуч.



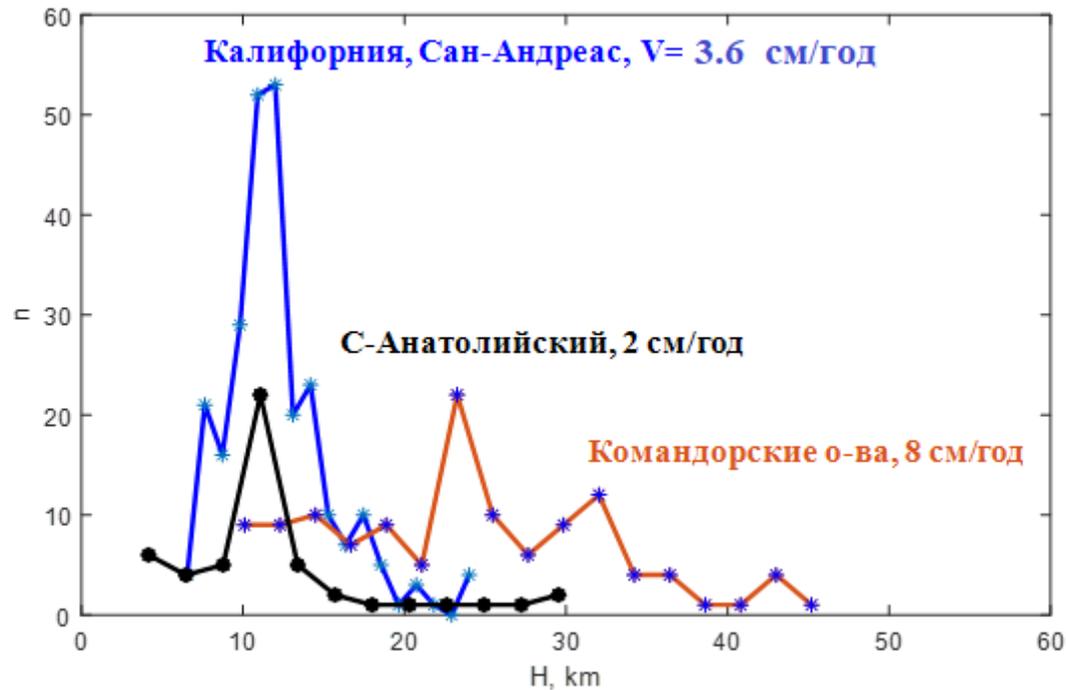
Землетрясения с $H < 50$ км распространены вдоль всей зоны субдукции. Очагов с $H > 50$ км и современных вулканов нет на Командорском участке зоны, где движение плиты почти параллельно островной дуге. Скорость проскальзывания вдоль желоба составляет 8 см/год, интенсивные деформации и напряжения есть, а землетрясений нет.

Вулканизм островной дуги принято связывать с водным флюидом, выделяющимся при субдукции в результате дегидратации. Отсюда отсутствие землетрясений с $H > 50$ км на Командорском участке зоны субдукции связано с отсутствием здесь погружения плиты и соответствующих изменений P,T условий. Нет активных процессов дегидратации.

«Нормальные» землетрясения действительно прекращаются на глубинах до 50 км. Для более глубоких землетрясений нужен дополнительный Фактор X!?

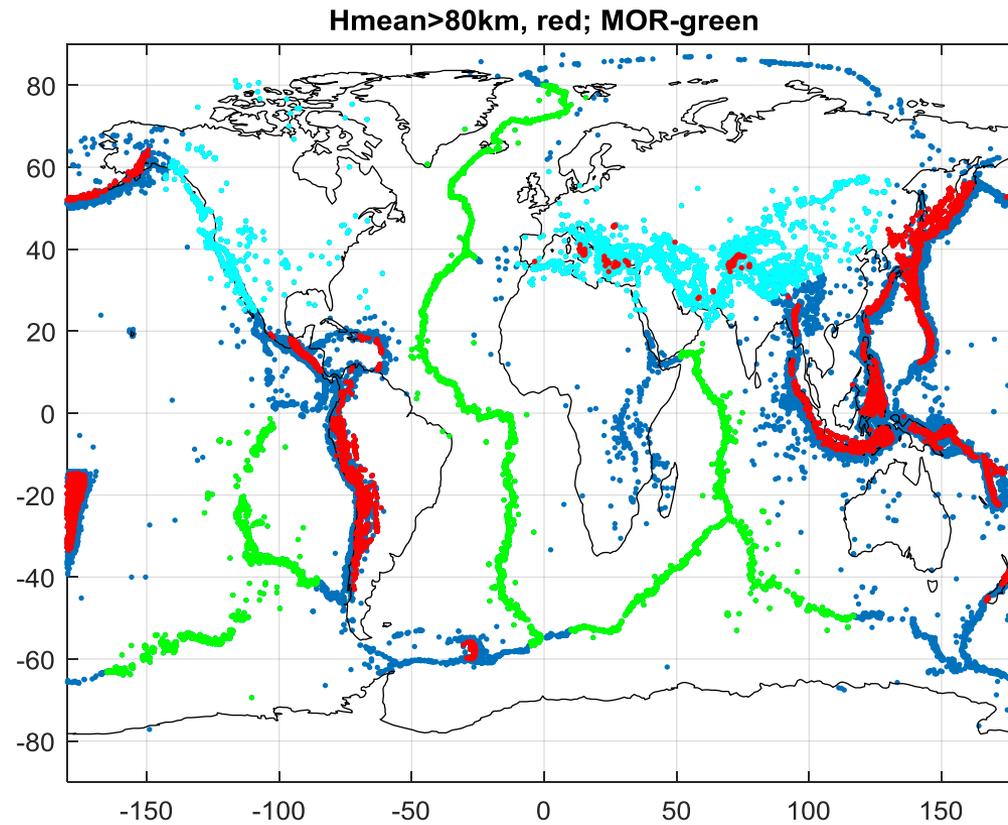
Аналогично, нет сомнений, что смещения плит по Северо-Анатолийскому разлому и по системе Сан-Андреас не ограничивается верхними 20-30 км. Но более глубоких землетрясений и здесь нет (рис., распределение землетрясений по глубине).

При этом намечается тенденция – быстрее смещения, несколько глубже продолжается обычная «нормальная» сейсмичность.

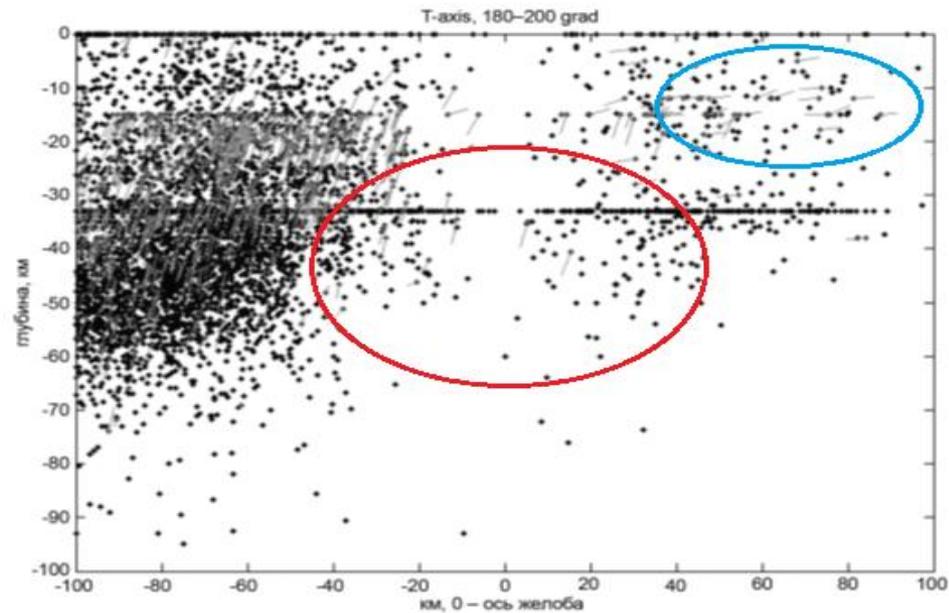
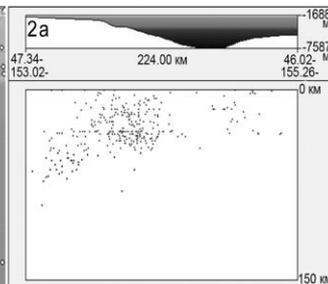
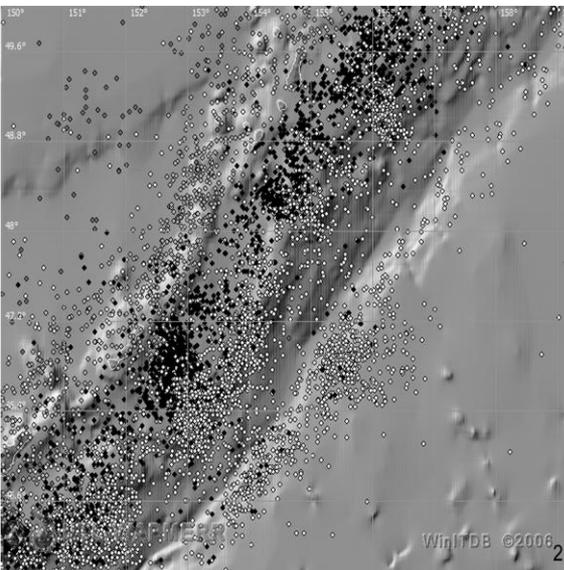


Но глубже 50 км «нормальных» землетрясений нет нигде?

Запад Северной Америки – еще один подобный пример



Пример № 2, характер напряженного состояния.



Район Централных Курил (Симуширских землетрясений). Кроме типично субдукционных землетрясений происходят еще и «зажелобные», в том числе на глубинах до 50 и более км. Характер напряжений в очагах этих землетрясений чаще отвечает изгибу плиты в районе передового вала, но на краю области развиты типично субдукционные механизмы.

Аналогичный район для Аляски (где больше данных по механизмам землетрясений). Видны области развития механизмов типа «передового вала» (голубой овал), и типичных для собственно зоны субдукции (красный овал).

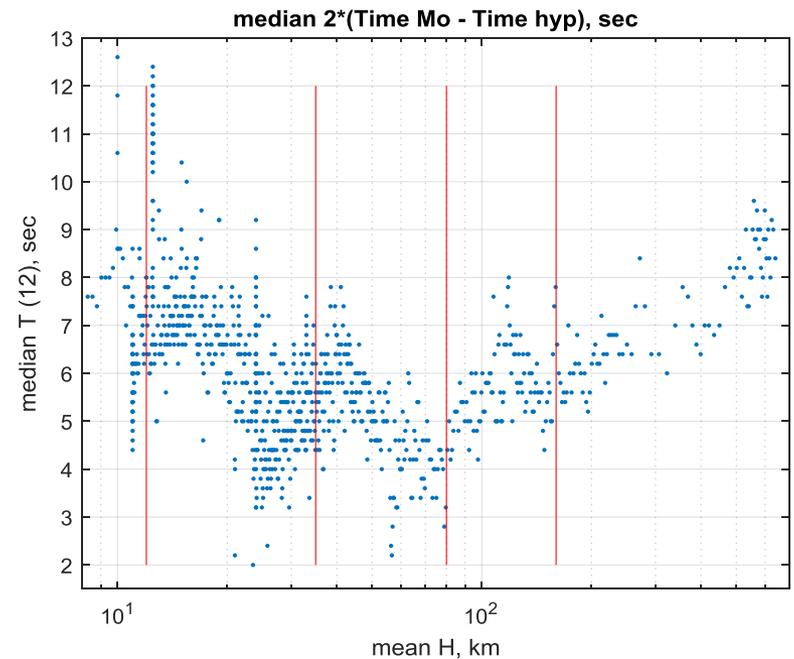
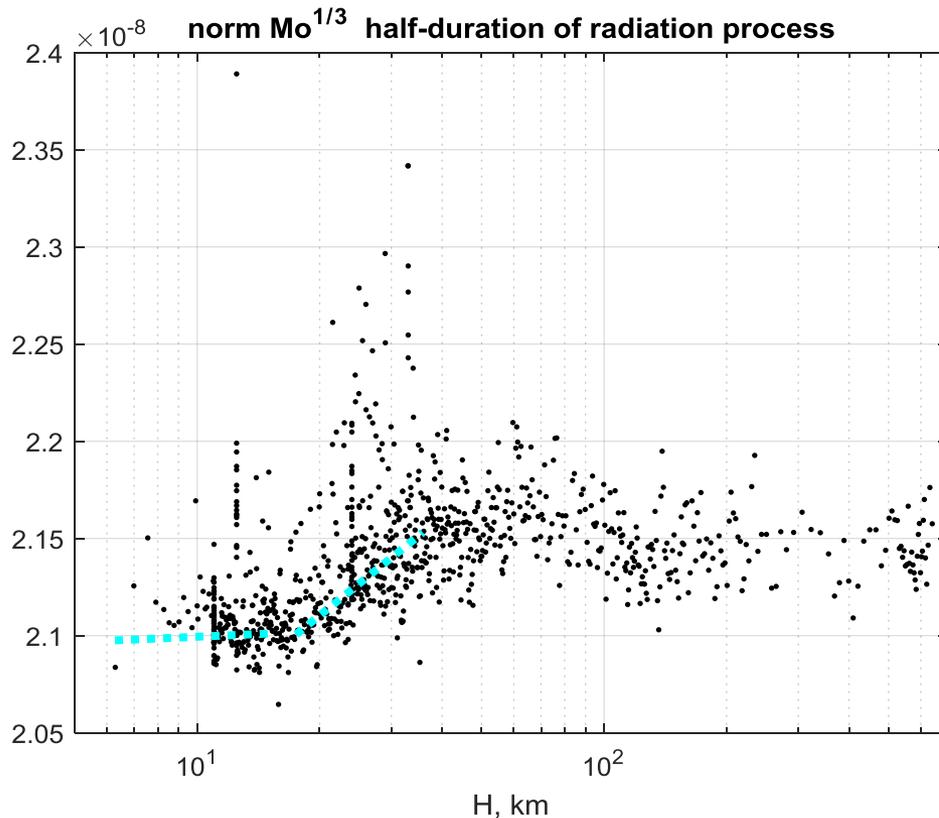
Красным овалом очерчена область, где развит единый характер напряжений, типичный для зон субдукции. Но в середине эта область асейсмична.

Т.е., напряжения есть, но землетрясений нет. Для сейсмогенеза нужен дополнительный «фактор X»? ПРЕВРАЩЕНИЯ????

С глубиной – по физике – хрупкое разрушение должно заменяться более медленным пластическим поведением.

И действительно, нормированные на куб корень из сейсмического момента средние продолжительности сейсмического излучения растут в интервале от 10-25 до 40-50 км(слева).

А максимумы продолжительности как-бы маркируют глубины завершения областей реализации разных механизмов сейсмического разрушения (справа). $H_{max} = 10-15$ км, 30-40 км, 120-150 км, 650 км.

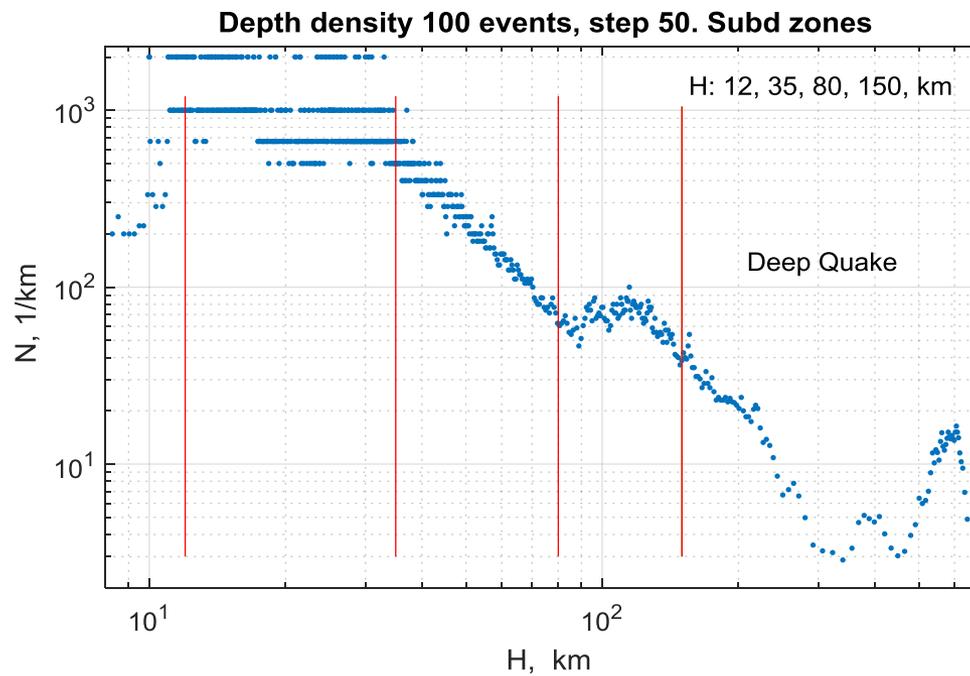


Итак:

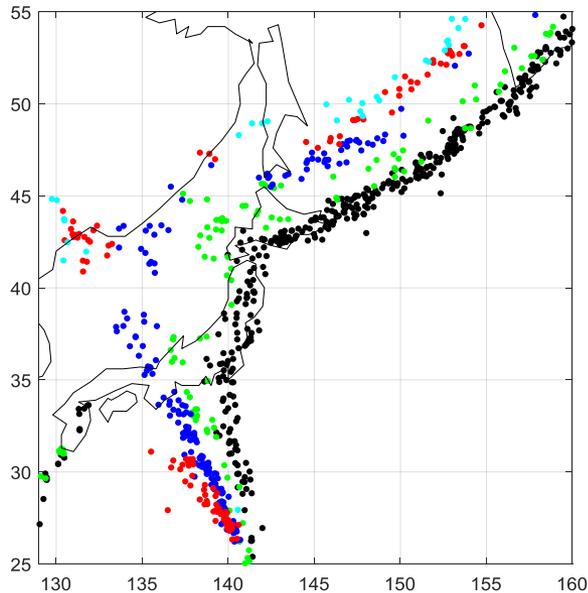
Парадокс сейсмичности – как будто – подтверждается.

Примеры говорят – вполне убедительно – что обычных «нормальных» землетрясений глубже нескольких десятков км действительно не бывает.

Плотность по глубине для последующих групп из 100 событий с шагом 50 землетрясений:



Действительно ли распределение землетрясений по глубине достаточно непрерывно, или его можно четче сопоставить с определенными уровнями глубины (фазовыми переходами???)



Показано расположение землетрясений разной глубины, 80-160 км, черные точки; 160-320, зеленые; 320-460, синие, 460-570, красные и 570-720 голубые; GCMT каталог (1976-2019).

Сравнение с данными ISC-GEM каталога (с 1904 года) показало совпадение полос расположения землетрясений разных глубин.

Структуры стабильны, по крайней мере на уровне 100 лет.

Тенденция типична для разных зон субдукции.

То есть, гипотеза «упирания» плит в границу средней и нижней мантии с широким по глубине максимумом сейсмичности отпадает.

Отпадают и другие модели с непрерывным распределением очагов глубоких землетрясений по глубине.

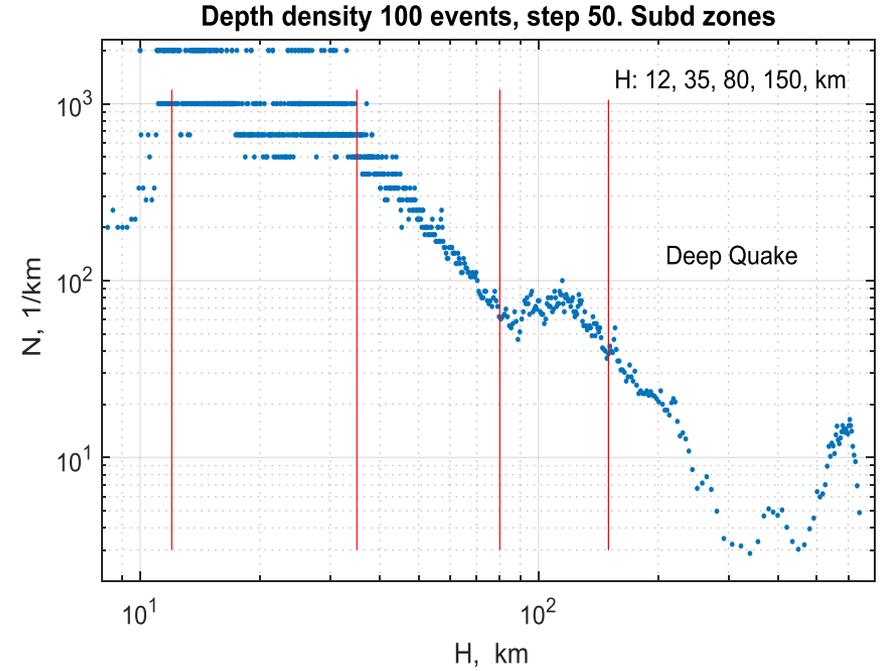
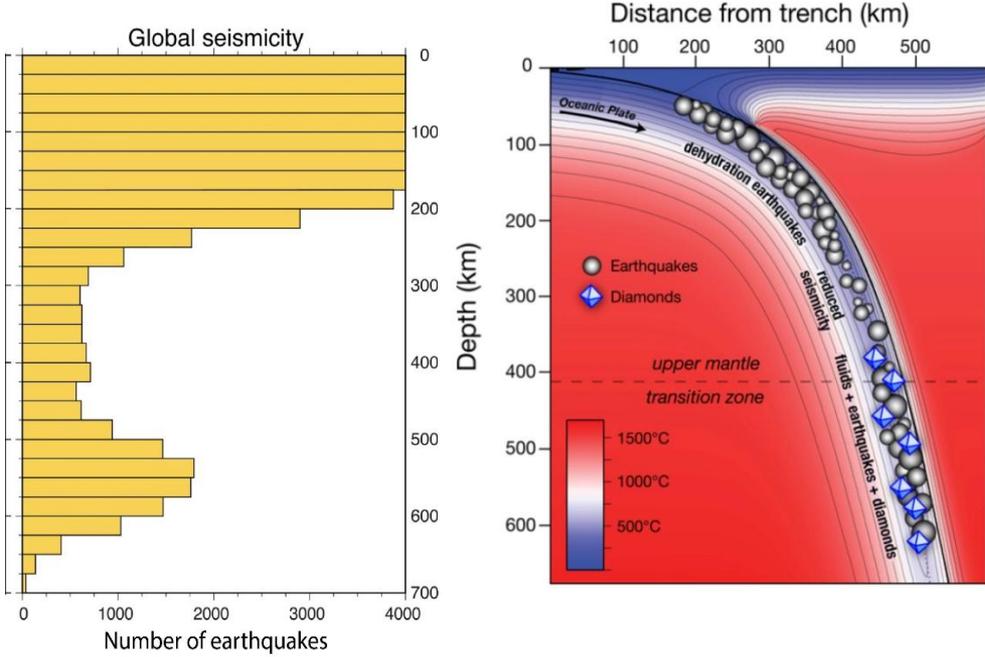
По-видимому, в разных зонах субдукции имеются свои (несколько различающиеся по глубине) но довольно узкие горизонты сейсмической активности

К вопросу о гидроразрывах в очагах глубоких землетрясений:

[Zulian, 2021; Shirey et al., 2021]

A fluid’s journey into deep Earth may explain deep quakes.

Shirey, S. B., Wagner, L. S., Walter, M. J., Pearson, D. G., & van Keken, P. E. (2021). Slab transport of fluids to deep focus earthquake depths—thermal modeling constraints and evidence from diamonds. AGU Advances



We find a remarkable correlation between slabs capable of transporting water to transition zone depths in dense hydrous magnesium silicates with slabs that produce seismicity below ~300-km depth, primarily between 500 and 700 km.

Модель с широким максимумом сейсмичности по глубине [Zulian, 2021; Shirey et al., 2021] Видимо не подтверждается.

Изменение по глубине характерных величин кажущихся напряжений.

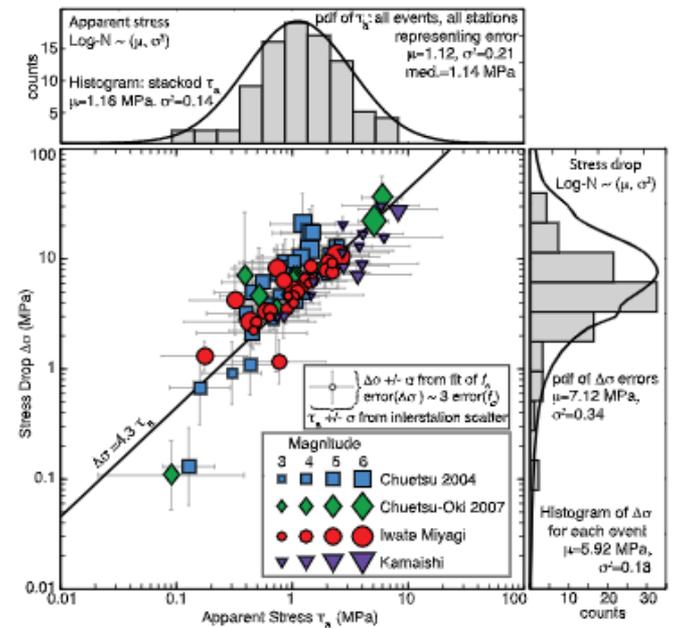
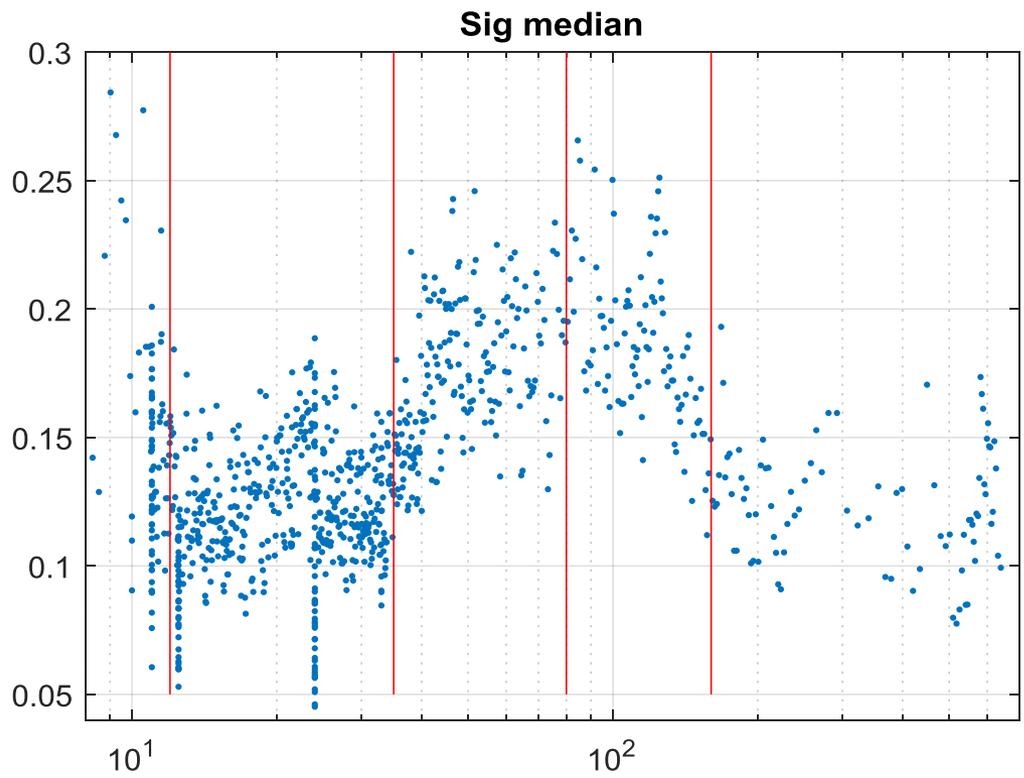
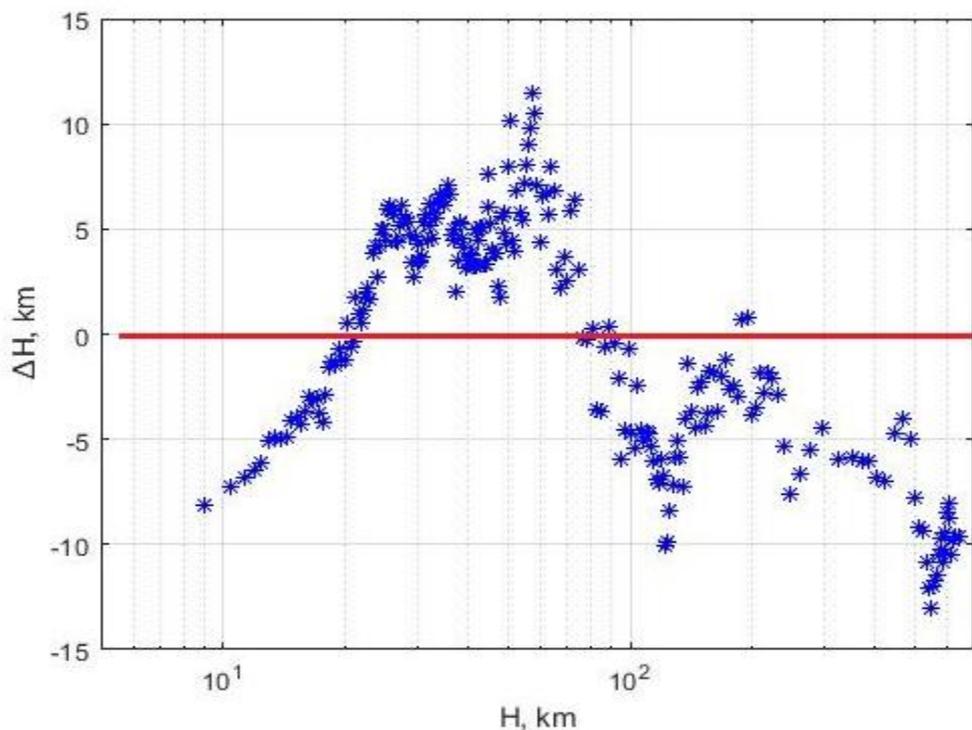


Figure 3. Apparent stress compared to stress drop with error bars, showing theoretical relation in black line. Energetic earthquakes have lower stress drop and apparent stress than expected (lower left) while energetic earthquakes have higher stresses (upper right). Histograms show log-normal distributions of events. Solid lines include the effect of station-to-station variation (apparent stress) and uncertainties in measurements (stress drop).

Наличие в очаговой области флюида малой плотности (не расплава) должно видимо создавать тенденцию прорыва легкого подвижного флюида в верхние горизонты и – соответственно – развития сейсмического разрыва вверх



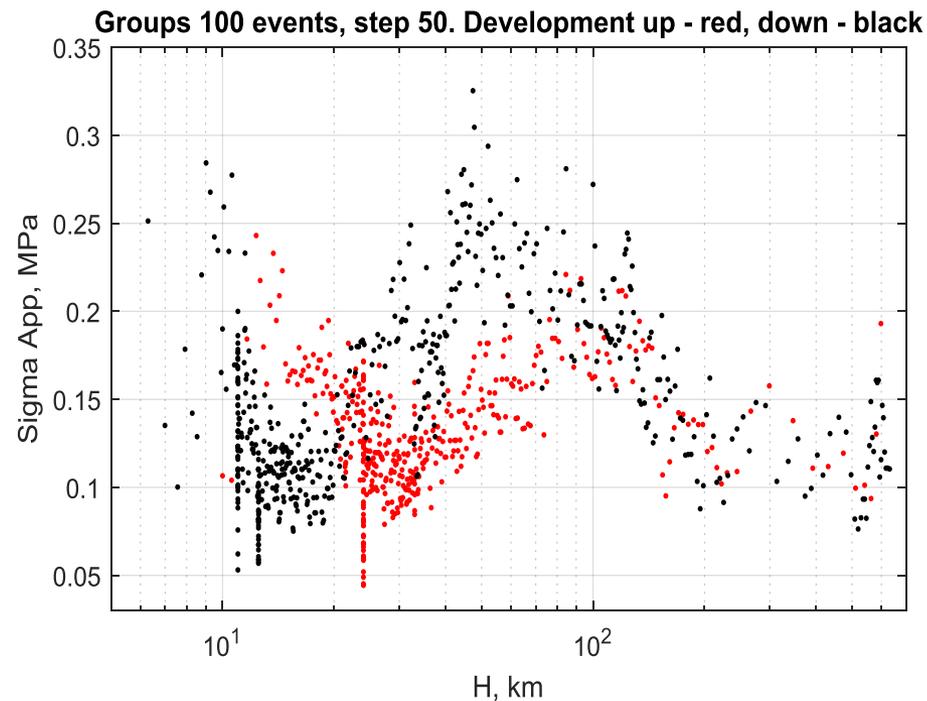
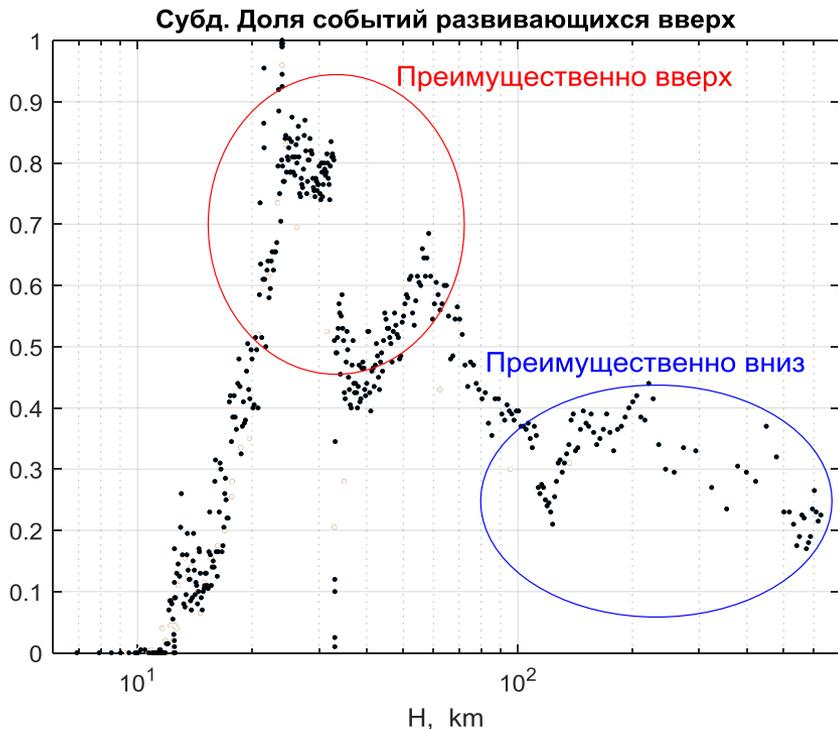
Приведены средние значения разницы глубин землетрясений по данным о положении гипоцентров и по решению сейсмического момента. Точки - средние значения для групп из 120 последовательных по глубине землетрясений с шагом 60 событий, каталог GCMT (1976-2020 гг.)

Тенденция развития разрыва вверх (очаг по решению сейсмического момента расположен выше гипоцентра) характерна для очагов в интервале глубин 20 - 100 км, что отвечает типичным глубинам расположения двойных сейсмофокальных зон в зонах субдукции (отвечающих развитию реакций десерпентинизации?).

Отметим также, что близкие глубины фокальной зоны - от 60-70 до немногим более 120 км отвечают типичному положению вулканов.

Итак, подкрепляется гипотеза связи среднеглубинных землетрясений с дегидратационным охрупчиванием

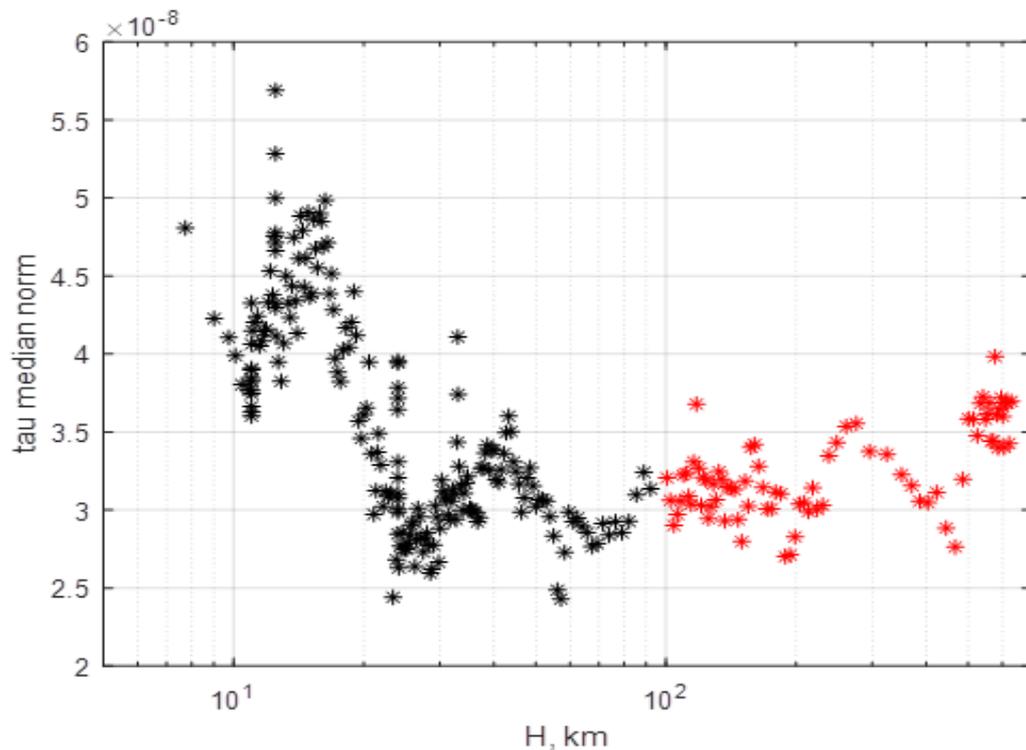
Сравним изменение по глубине доли событий развивающихся вверх и вниз и характерные значения кажущихся напряжений



Красным даны события, развивающиеся вверх – глубина по решению сейсмического момента меньше глубины гипоцентра.

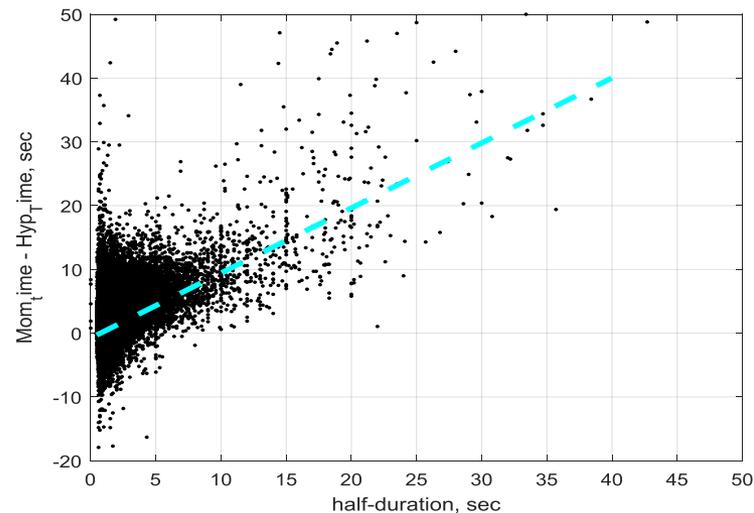
Землетрясения развиваются преимущественно вверх в области, где доминирует дегидратационное охрупчивание (гидроразрывы?); сейсмогенные напряжения для таких событий относительно ниже.

Аналогичный график для медиан нормированных полу-продолжительностей сейсмического процесса. Среднее из разницы времен сейсмического момента и гипоцентра и полу-продолжительности процесса излучения.



Приведены медианы нормированных разностей моментов M_0 и гипоцентра для последовательных по глубине групп из 100 событий с шагом 50 событий, для глубин более 100 км; для 300 событий с шагом 150 для событий с $H < 100$ км.

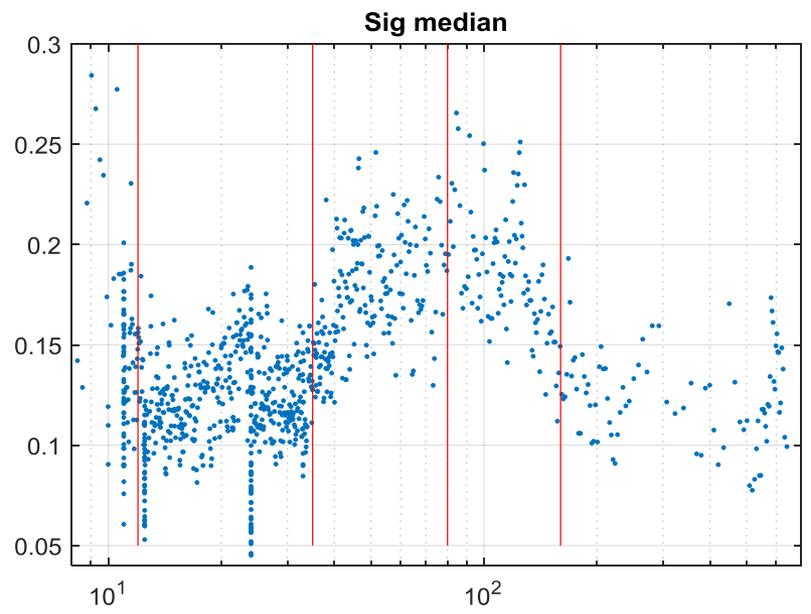
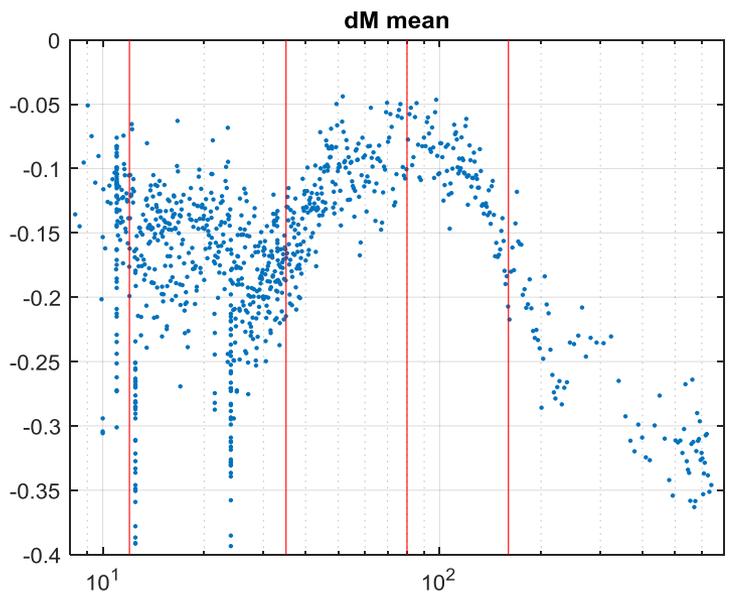
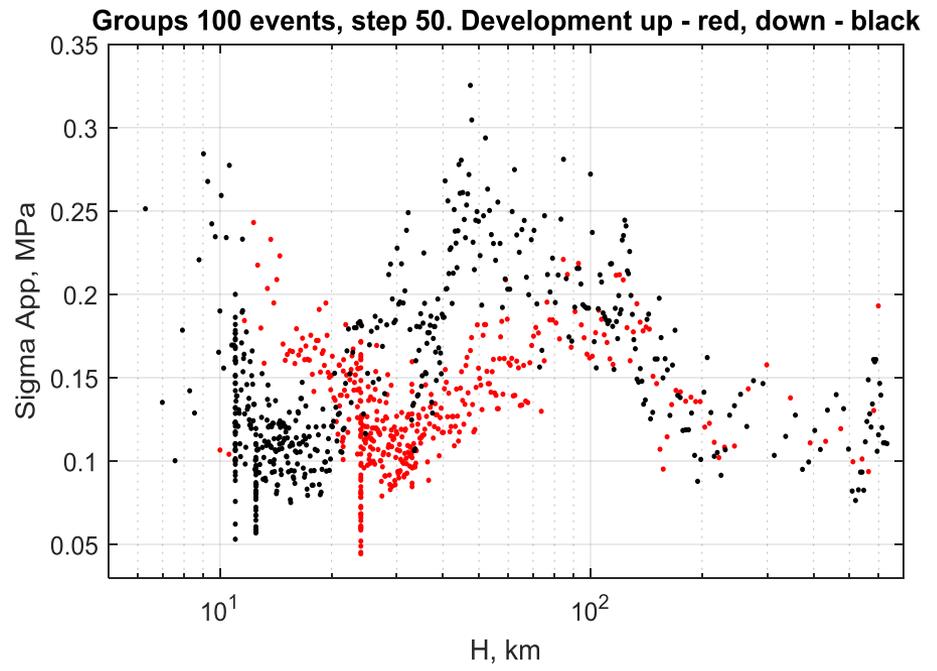
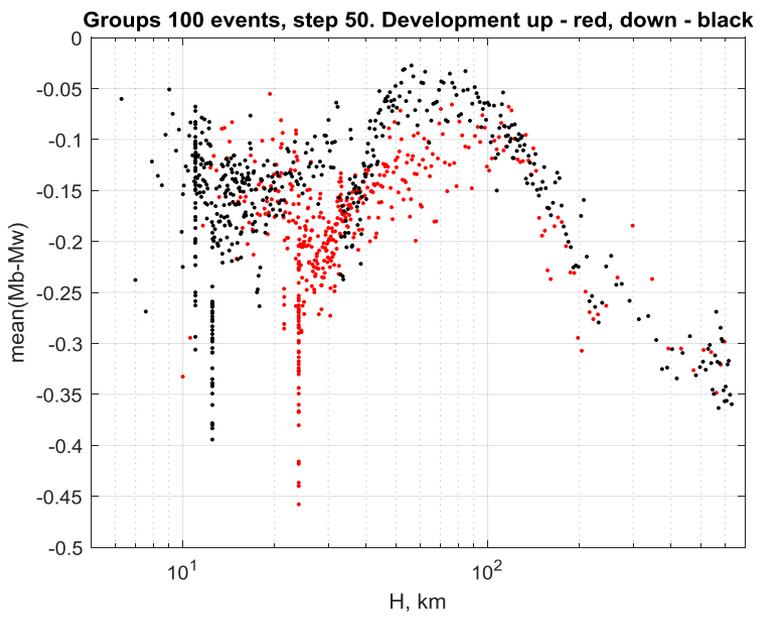
Видны максимумы медиан норм Δt на глубинах 12, 40-50, около 100, 300 и на 600 км.



Выводы:

- 1. Подтверждается парадокс сейсмичности, обычные тектонические напряжения НЕ происходят глубже 40-50 км.**
- 2. Выделяются области с характеристиками отвечающими механизму дегидратационного охрупчивания (гидроразрыва?) и области доминирования роли твердотельных превращений.**
- 3. Границы областей, когда данный механизм сейсмического разрушения становится не эффективным выделяется большей продолжительностью сейсмического процесса и большими значениями кажущихся напряжений.**
- 4. Границы областей примерно соответствуют ранее предлагавшимся границам: 10-15 км - подошва зоны гидростатического давления флюида, 40-50 км до 70 км - зона неглубоких землетрясений, 150 км – подошва двойных сейсмофрктальных зон с погружающихся плит.**

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ



Не все хорошо даже и с неглубокими землетрясениями

Корреляция между пространственной плотностью числа очагов n (в областях радиусом 1° , последовательно центрированных в эпицентрах событий данного региона) и характерными значениями кажущихся напряжений

Район	Коэффициент корреляции между числом событий и медианой и средним значением σ_a для глубин 0-22 Км	Коэффициент корреляции между числом событий и медианой и средним значением σ_a для глубин 22-40 км	Число событий в интервалах: 0-22 / 22-40 км
Африканская рифтовая система	-0.23, -0.09	-, -	106 / 7
Алеутские о-ва	-0.24, -0.11	-0.40, -0.30	258 / 208
Атлантический океан	-0.19, -0.09	-, -	443 / 2
Центр. Америка	-0.26, -0.21	-0.32, -0.31	406 / 141
Евразия	-0.20, -0.05	-0.09, 0.0	554 / 155
Индийский океан	-0.23, -0.12	-, -	488 / 4
Курило-Камчатка	-0.32, -0.30	-0.01, 0.13	346 / 351
Сев. Америка	-0.23, -0.05	-, -	216 / 5
Тихий океан	-0.25, -0.24	-, -	414 / 1
Филиппины	-0.20, -0.15	0.02, 0.22	573 / 387
Южная Америка	-0.37, -0.33	-0.32, -0.35	183 / 125
Тонга-Н.Зеландия	-0.16, -0.10	-0.23, -0.10	1166 / 364
Ява	-0.28, -0.19	-0.26, -0.17	650 / 455

Максимумы величин нормированной продолжительности сейсмического процесса норм Δt и величин σ_a практически совпадают.

Первый максимум соответствует границе свободной порово-трещиноватой циркуляции подземных вод и области закрытия трещин и развития сублитостатических давлений флюида.

Следующий максимум на 40-50 км отвечает границе возможности реализации обычных «нормальных» землетрясений.

Максимум на 100-120 км соответствует нижней границе двойных сейсмофокальных зон в зонах субдукции; эти структуры связываются с процессами дегидратации материала погружающейся плиты.

Таким образом, интервал глубин от 30-50 до 100-150 км может отвечать области активной дегидратации и эффективной реализации землетрясений по механизму дегидратационного охрупчивания.

Неясный максимум на 300 км соответствует минимуму сейсмичности и средней границей между областями разных фазовых переходов.

Максимум на глубине 600 км соответствует области спада глубокой сейсмичности.

Получаем, что выявленные области максимумов отвечают характерным границам смены доминирующих (и теоретически ожидавшихся) механизмов сейсмогенеза.

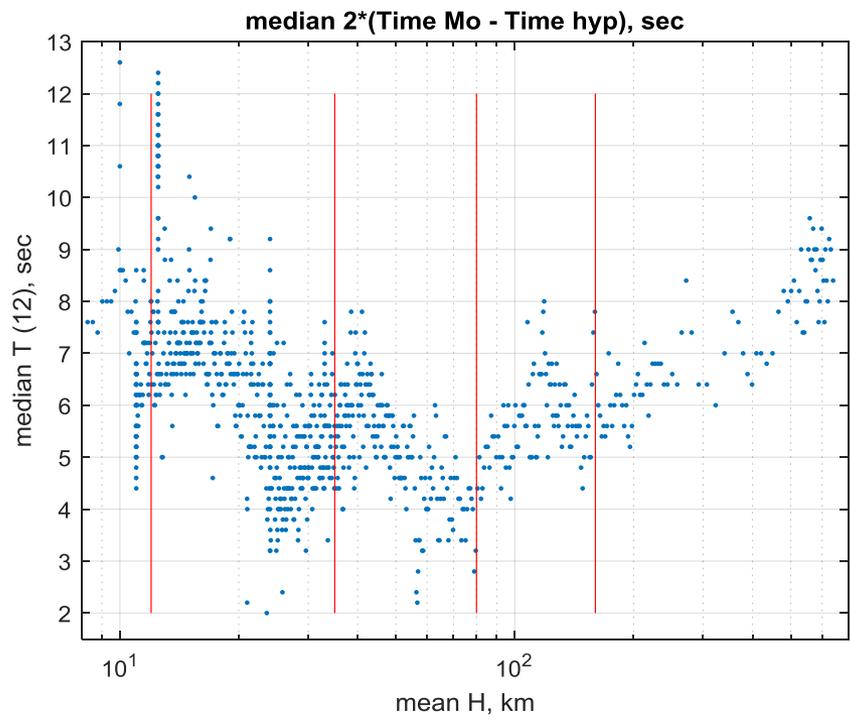
Итак:

Парадокс сейсмичности – как будто – подтверждается.

Примеры говорят – вполне убедительно – что обычных «нормальных» землетрясений глубже нескольких десятков км действительно не бывает.

А что можно сказать про более глубокие землетрясения?

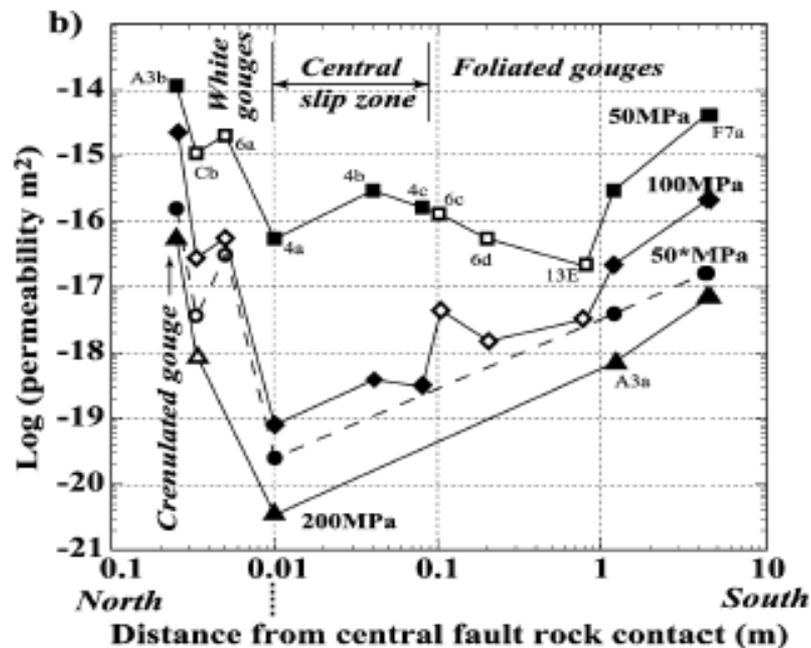
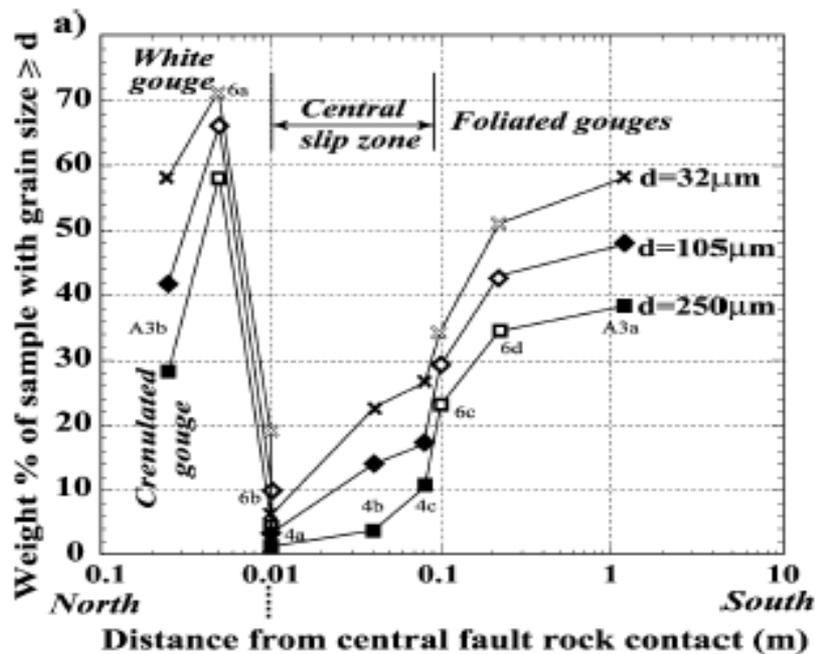
Итак:



Локализация областей высокой проницаемости.

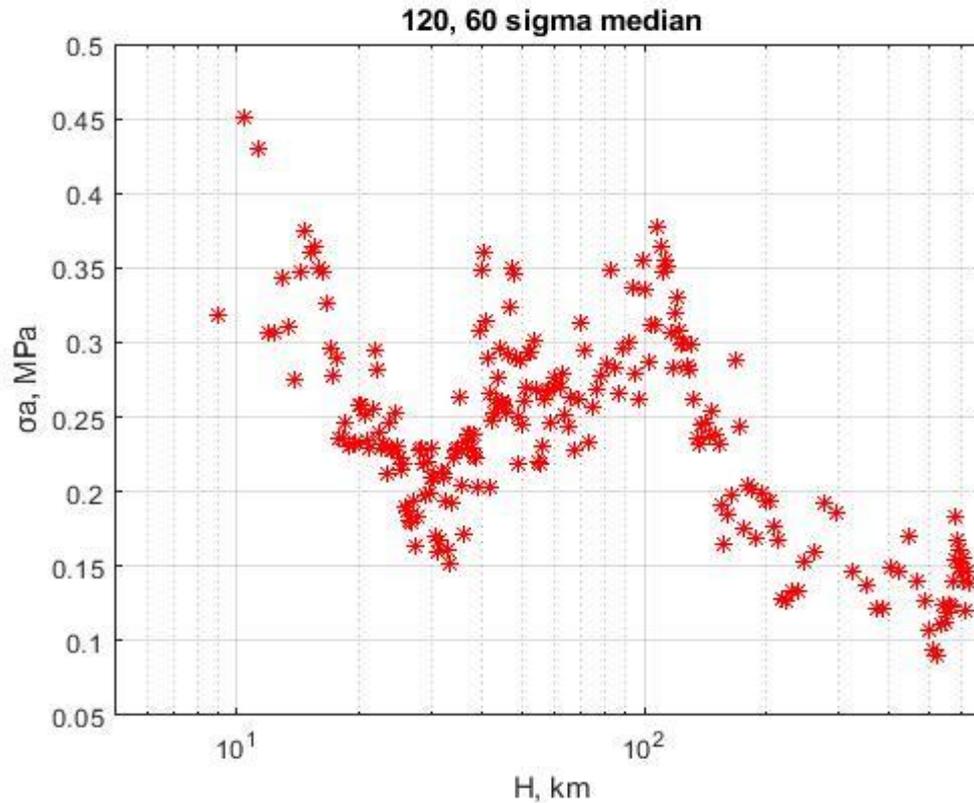
Установлено, что глубинные деформации максимальны в слоях милонитов и ультрамилонитов, здесь же максимальны значения флюидных потоков.

Лабораторные измерения свидетельствуют, однако, об обратном.



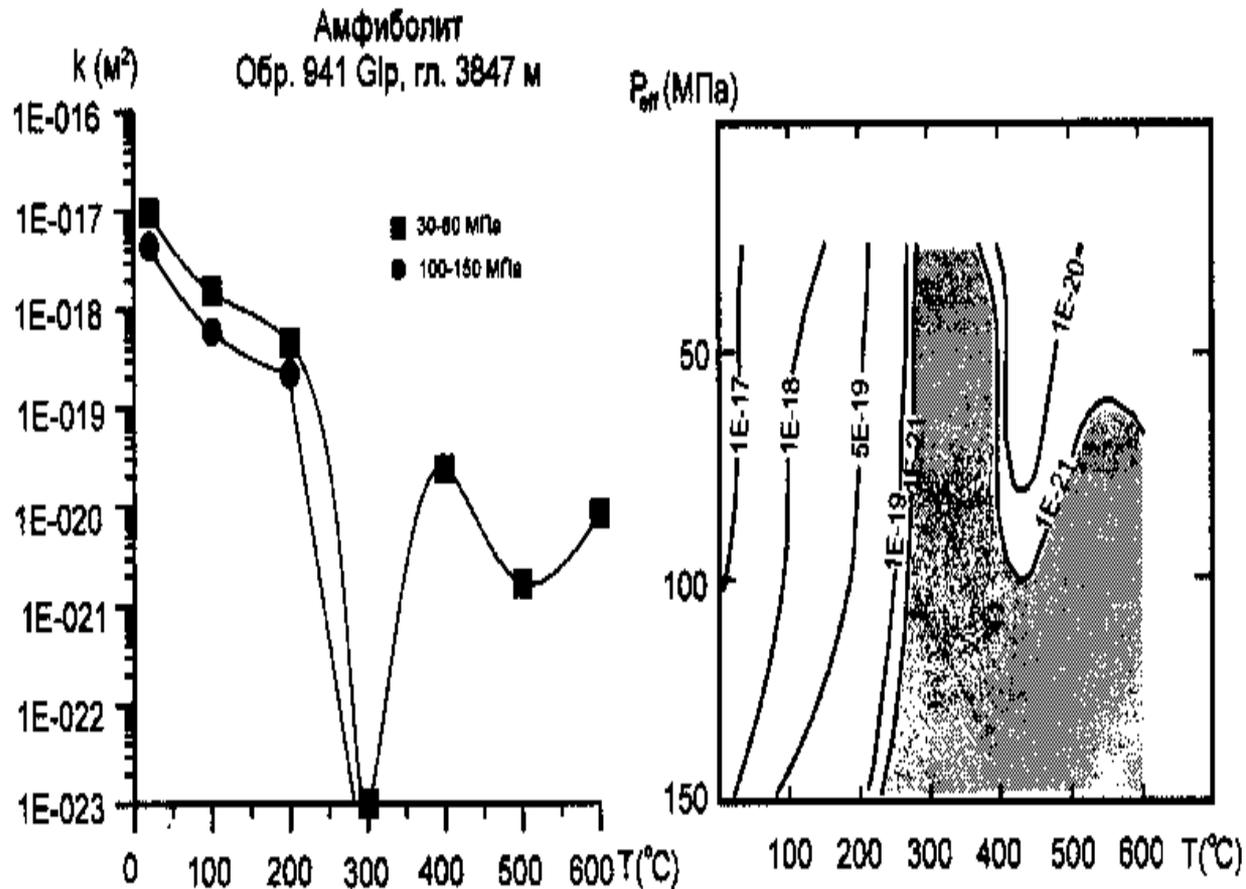
То есть аномальные свойства вещества глубинных сдвиговых зон являются исключительно глубинным эффектом, не характерным для низких P-T параметров

Согласно парадоксу сейсмичности, хрупкое разрушение должно замещаться медленным пластическим. Резонно предположить, что когда данный механизм сейсмичности теряет свою эффективность, очаги становятся более «медленными», а сейсмогенные напряжения, все еще вызывающие землетрясения – большими по величине.



Приведены медианы величин кажущихся напряжений для последовательных по глубине групп из 120 событий с шагом 60 событий.

Видны максимумы медиан σ_a на глубинах около 10, 40, 100-120 и, возможно, 600 км.



Экспериментальные данные дают сильную изменчивость величин проницаемости. В целом эксперименты указывают на уменьшение проницаемости пород с ростом давления, а для высоких давлений также и с ростом температуры. При этом экспериментальные значения на 1-2 порядка ниже пиковых оценок проницаемости по петрологическим данным.

