

# РАЗЛИЧИЕ В ПАРАМЕТРАХ РАЗНОГЛУБИННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РАЗЛИЧИЙ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, СЛЕДСТВИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ

***М.В. Родкин***

*На основе публикаций:*

Rodkin, M.V. The Variability of Earthquake Parameters with the Depth: Evidences of Difference of Mechanisms of Generation of the Shallow, Intermediate-Depth, and the Deep Earthquakes. Pure Appl. Geophys. (2022). <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02927-4>

Родкин М.В., Пунанова С.А. Корреляционный анализ микроэлементного состава нафтидов: метод, результаты, интерпретация // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21, № 4. С. 131–141.

Родкин М.В., Пунанова С.А. Корреляционные зависимости микроэлементного состава природных объектов // Геология нефти и газа. – 2022. – № 4. – С.99–107. DOI: 10.31087/0016-7894-2022-4-99-107.

Родкин М.В., Липеровская Е.В. О РАЗЛИЧИИ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ  
РАЗНОГЛУБИННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ХАРАКТЕРА ИХ ИОНОСФЕРНОГО ОТКЛИКА.  
Физика Земли, 2023, принято к печати

## Постановка задачи.

Известно, что в условиях температур и давления недр Земли хрупкое разрушение по модели Риды невозможно на глубинах более 30-50 км. Однако землетрясения более-менее непрерывно продолжаются до глубин 700 км, причем **существенных изменений в параметрах очагов землетрясений от глубины, выявлено не было.**

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.

Для объяснения парадокса сейсмичности были предложены модели, предполагающие решающую роль процессов дегидратации и фазовых переходов. Модель дегидратации общепринята для объяснения промежуточных землетрясений, для объяснения глубоких землетрясений обычно привлекают модели, связывающие их возникновение с фазовыми превращениями в переходной зоне мантии, но предлагались и иные модели.

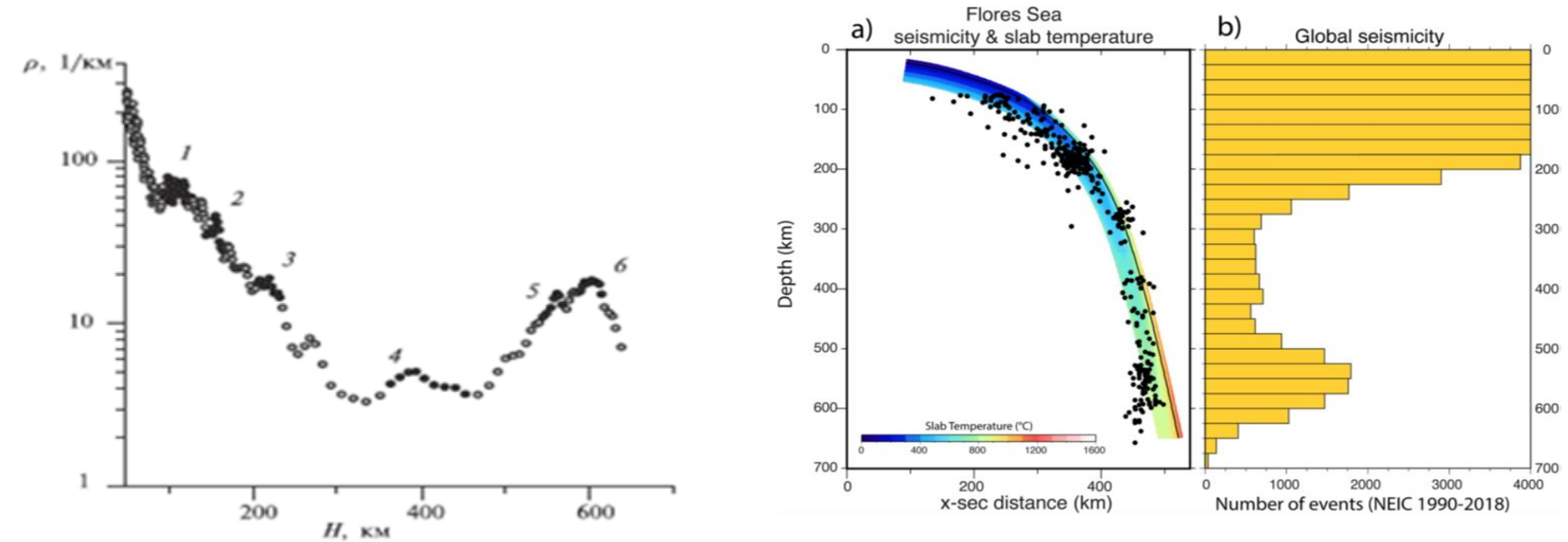
**Различие моделей генезиса землетрясений как бы предполагает различие их характеристик.** Повторимся: соответствующих различий известно не было.

1. Показывается существование искомых различий.
2. Но если физика различна, то и предвестники также могут различаться; соответственно, алгоритмы прогноза также?

## История вопроса

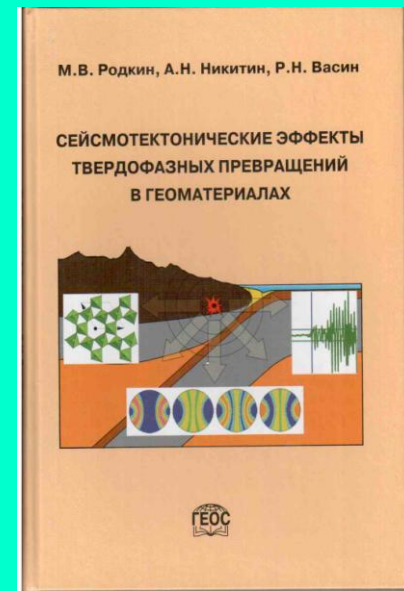
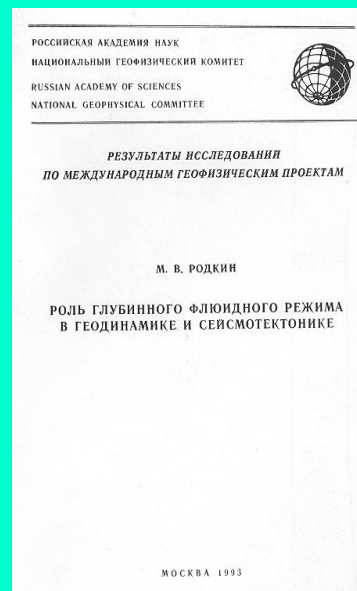
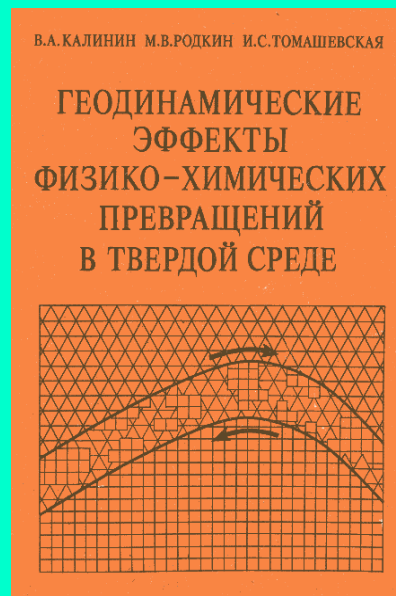
**Распределение сейсмичности по глубине**, подобные графики часто используют как указание на связь глубоких землетрясений и фазовых переходов.

**Горячая дискуссия прошлого - глубокие землетрясения и тектоника плит. Ничья**



Зависимость плотности числа событий  $\rho$  (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 —  $\alpha$ - $\beta$ - превращение; 5 —  $\beta$ - $\gamma$ -превращение; 6 —  $\gamma$ -фаза  $Pv+Mw$  переход. Но максимумы НЕ убедительны.

**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.



Если не проходит вариант изменения объема – может удастся объяснить глубокие очаги аномалиями физических свойств при фазовых переходах – эффектом **трансформационной сверхпластичности**? Теоретически правдоподобно.

Но для такой модели необходимо знать:

- 1) Какова степень задержки реализаций фазовых превращений в погружающихся плитах
- 2) Действительно ли о очагах глубоких землетрясений имеется ~ 10% объемной деформации.

**Оба эти вопроса остаются открытыми**



## 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.**

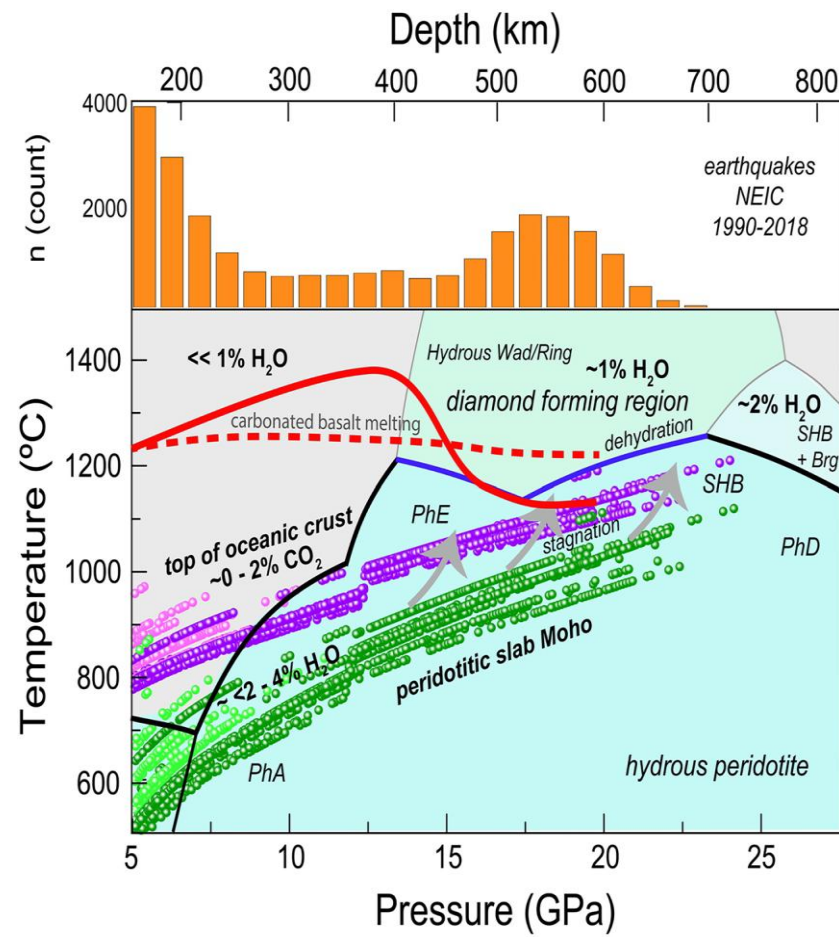
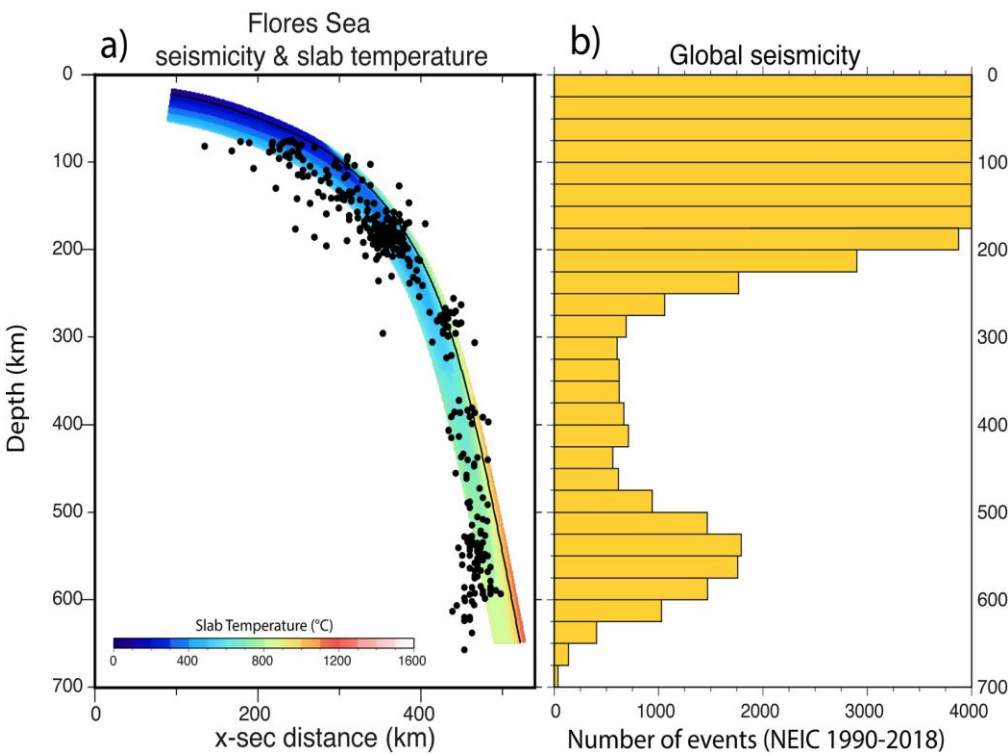
It is generally well known **that different mechanisms are responsible for shallow and deep earthquakes**

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:**

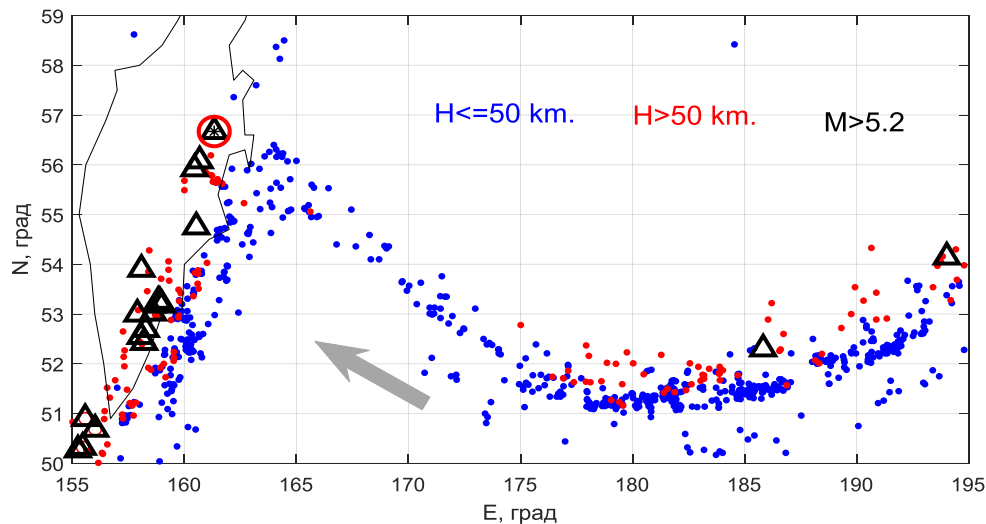
1. The first, dehydration embrittlement
2. The second, transformation-induced faulting, involves localized generation of a nanocrystalline solid material that behaves very much like a fluid
3. The third mechanism, adiabatic shear instability, involves positive feedback between heat produced by deformation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

**Недавняя альтернатива** — и в глубоких **ТОЖЕ** «виноват» флюид. Steven B. Shirey et al. (2021)  
 Slab Transport of Fluids to Deep Focus Earthquake Depths—Thermal Modeling Constraints and  
 Evidence From Diamonds и др.



## 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.



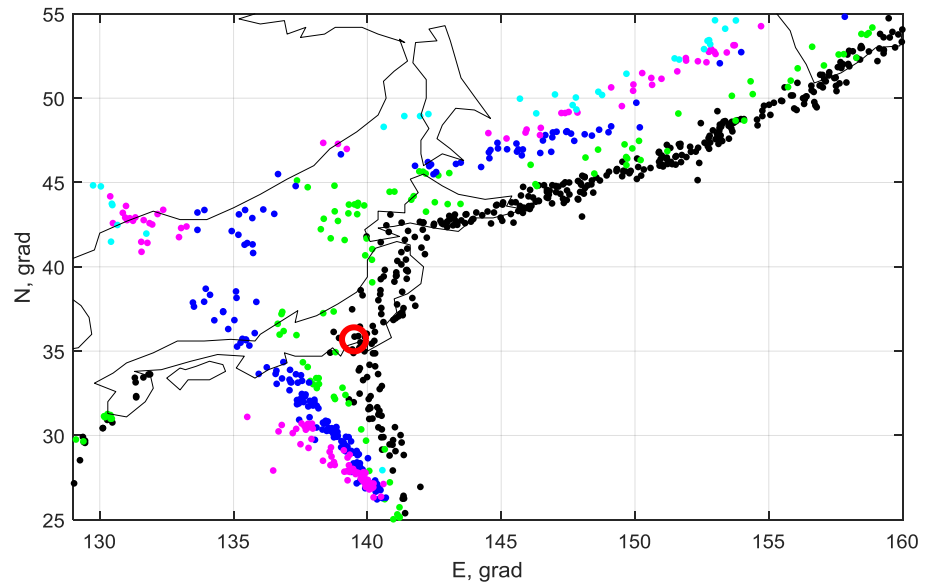
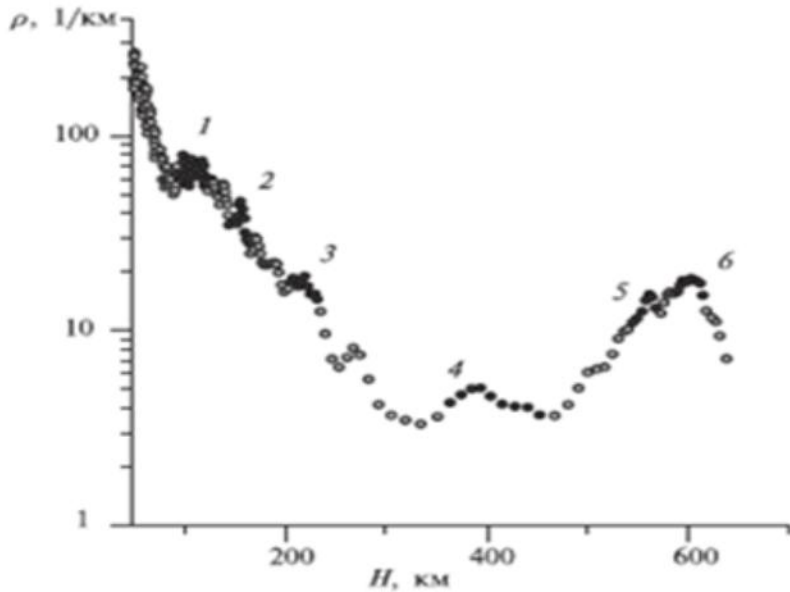
Землетрясения с  $H < 50$  км распространены вдоль всей зоны субдукции. Очагов с  $H > 50$  км и современных вулканов нет на Командорском участке зоны, где движение плиты почти параллельно островной дуге. Скорость проскальзывания вдоль желоба составляет 8 см/год, интенсивные деформации и напряжения есть, 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 в ряде иных зон субдукции: Марианская, Юж.Сандвичевы острова, иные.

# Распределение по глубине – действительно ли непрерывное?

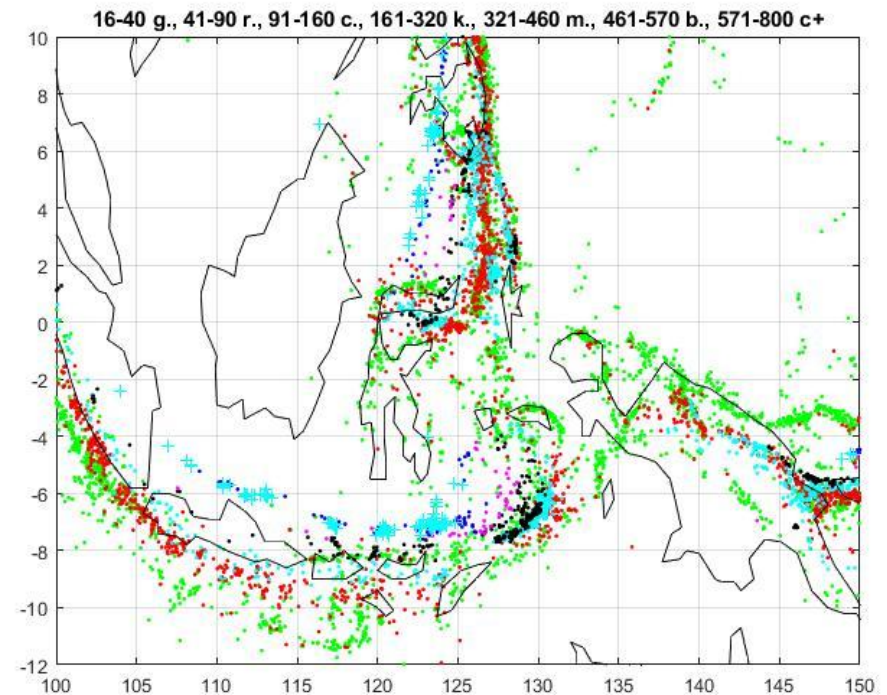
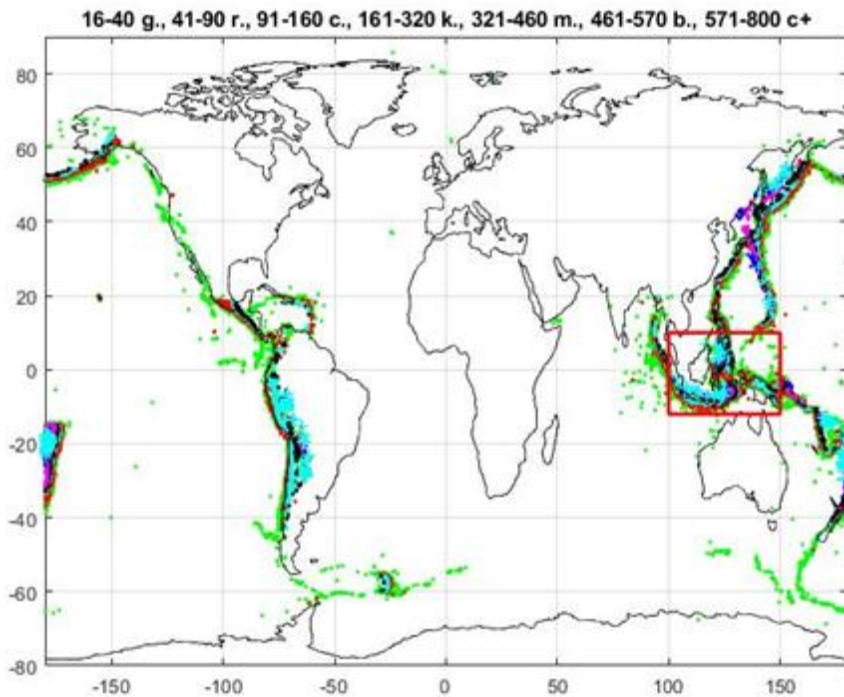


Расположение землетрясений разной глубины, 80-160 км, черные точки; 160-320, зеленые; 320-460, синие, 460-570, розовые и 570-720 голубые; GСMT каталог (1976-2019). Видно, что землетрясения отвечают достаточно узким полосам, соответственно и малым интервалам глубины. Большим красным кружком показано положение станции вертикального зондирования ионосферы «Токио».

Основные зоны субдукции, без неглубоких ( $H < 16$  км) землетрясений.

**Распределение землетрясений по глубине существенно разрывное.**

Непрерывность является следствием наложения разных зон субдукции, с разным тепловым режимом и глубинами превращений.

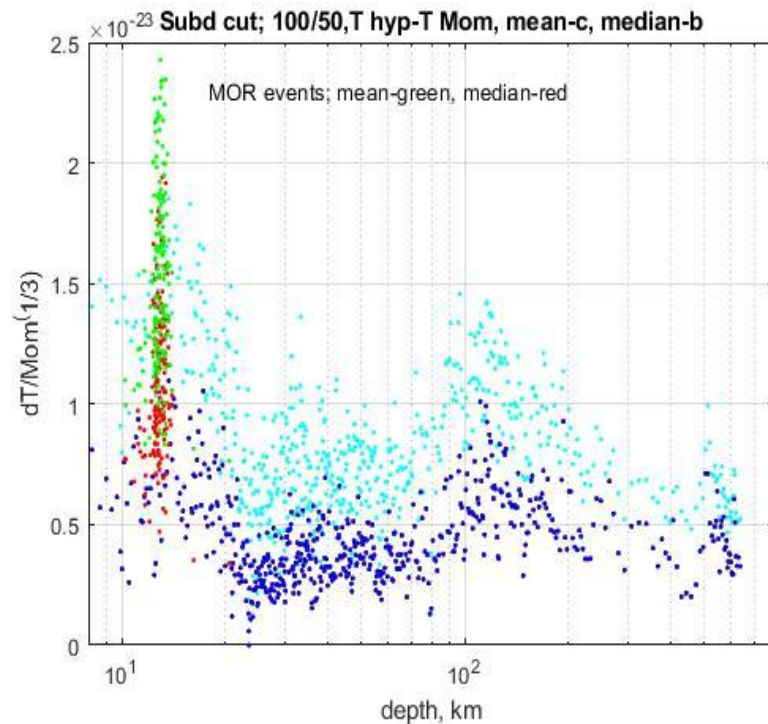




Если физика процесса разрушения меняется (старый механизм становится неэффективным), то следует ожидать переход к пластическому типу разрушения, ожидаем тогда:

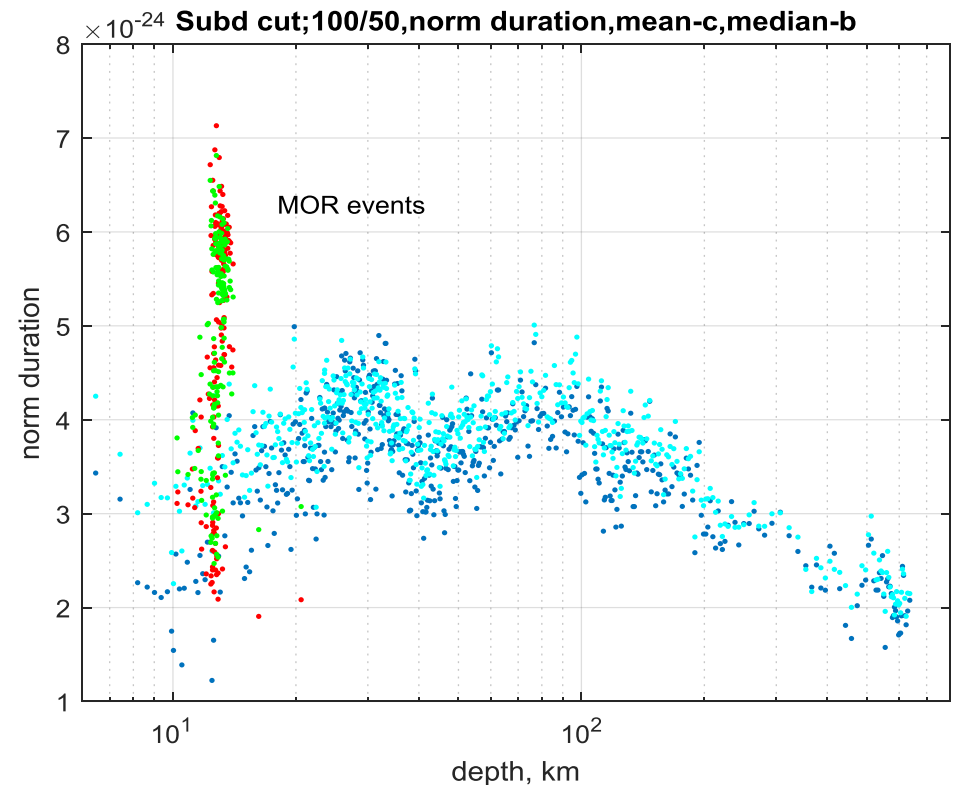
- 1) увеличения длительности процесса хрупкого разрушения
- 2) рост величины разрушающих напряжений

Имеем максимумы длительности событий на глубинах: >10 км, 30-40 и около 100 км, может еще около 500 км

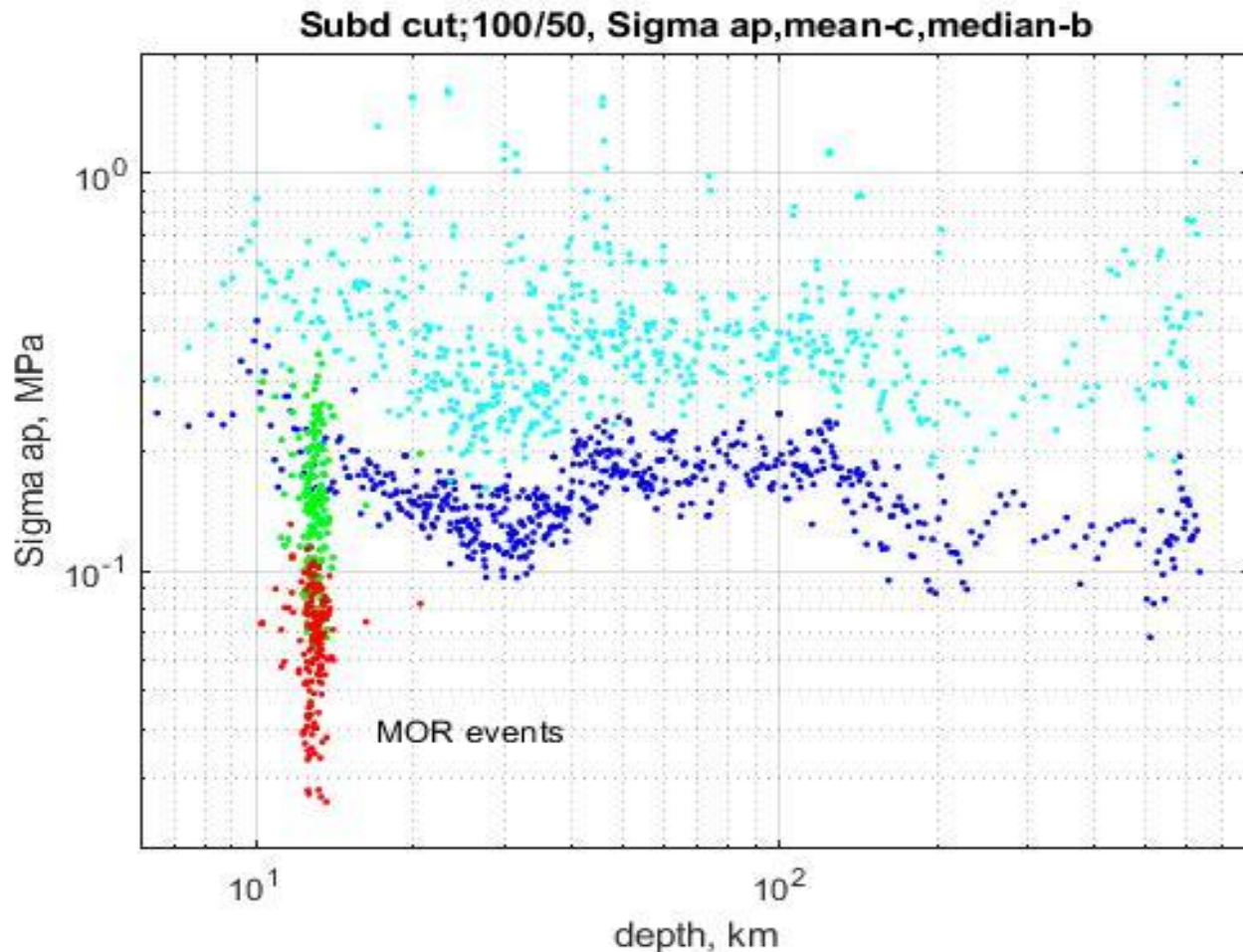


Нормированная ( на  $/Mom^{(1/3)}$ )  
продолжительность основной части  
цуга колебаний

Нормированное ( на  $/Mom^{(1/3)}$ ) различие моментов  
времени по данным по первым вступлениями и по  
решению сейсмического момента



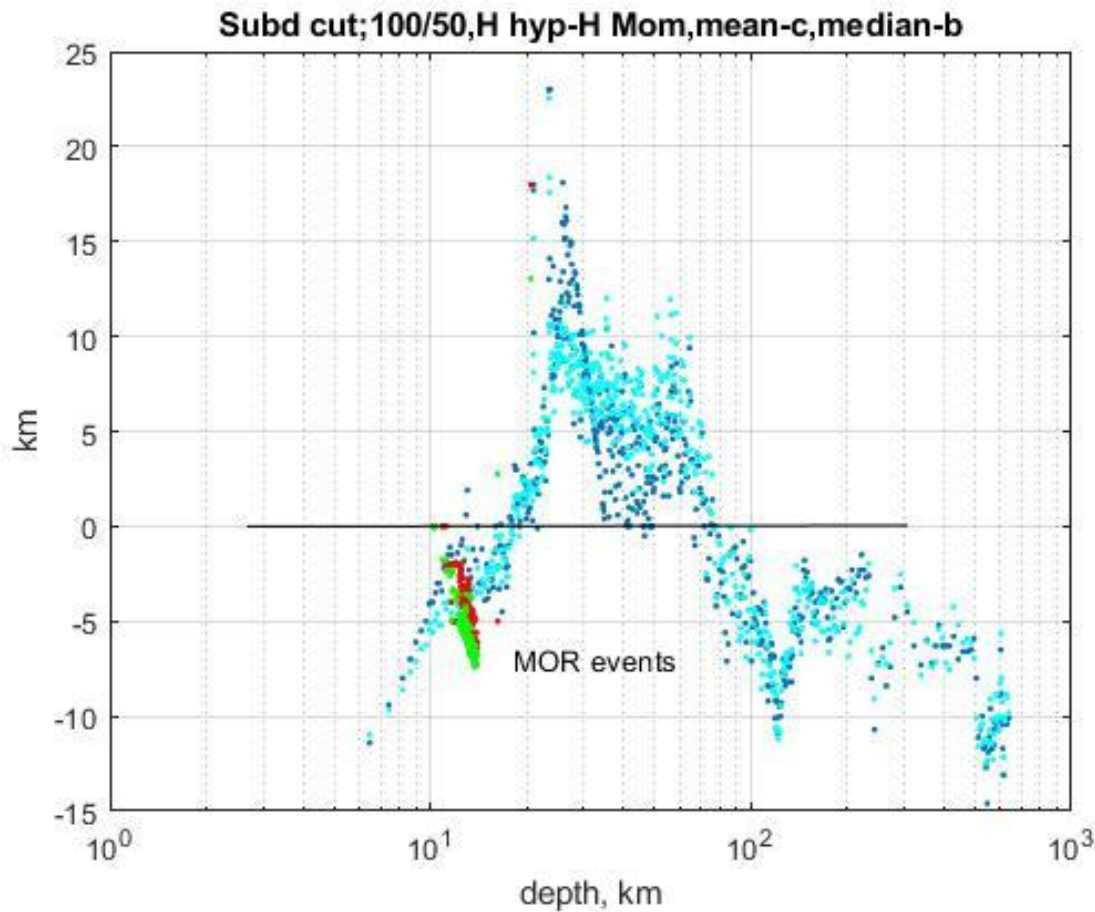
Рост величин кажущихся разрушающих напряжений,  $\sigma_a$ .  
Снова видим интервалы глубин около 10, 40-50 и чуть более 100 км,  
возможно еще на 600 км.





Если решающую роль для промежуточных землетрясений играет выделение флюида, то легкий флюид будет стремиться вверх, средние глубины гипоцентров будут больше средних глубин по решению сейсмического момента. Даны данные для зон субдукции, исключены события с типовыми глубинами 10, 15, 33 км.

**Да, очаги с глубинами от 20 до 80 км систематически развиваются вверх.**



## **Некоторые выводы:**

**Выявляется различие параметров разноглубинных землетрясений.**

**Переходные зоны:**

**чуть >10 км, 30-50 км, около 100 км.**

**Глубина переходных зон хорошо согласуются с ранее предложенными моделями различия физических механизмов землетрясений.**

**Более глубокие землетрясения (> 100км) вряд ли связаны с выделением флюида:**

- 1) Нет тенденции развития очага вверх**
- 2) Выявляются четкие сейсмогенные горизонты («алмазная» модель этого не предполагает).**

**Отличие характеристик очагов MOR от субдукционных хорошо согласуется с развитием в очагах MOR процессов подплавления.**

В подкрепление существования  
восходящих сквозькоровых  
потоков флюидов.

Анализ базы данных (около 200  
анализов) по микроэлементному  
составу углеводородных,  
углекислых и  
грязевулканических флюидов и  
корреляции их МЭ состава со  
средним химическим составом  
верхней, средней и нижней  
коры.

Систематически наблюдается  
более высокая связь с составом  
нижней, реже средней коры,  
нежели с верхней.

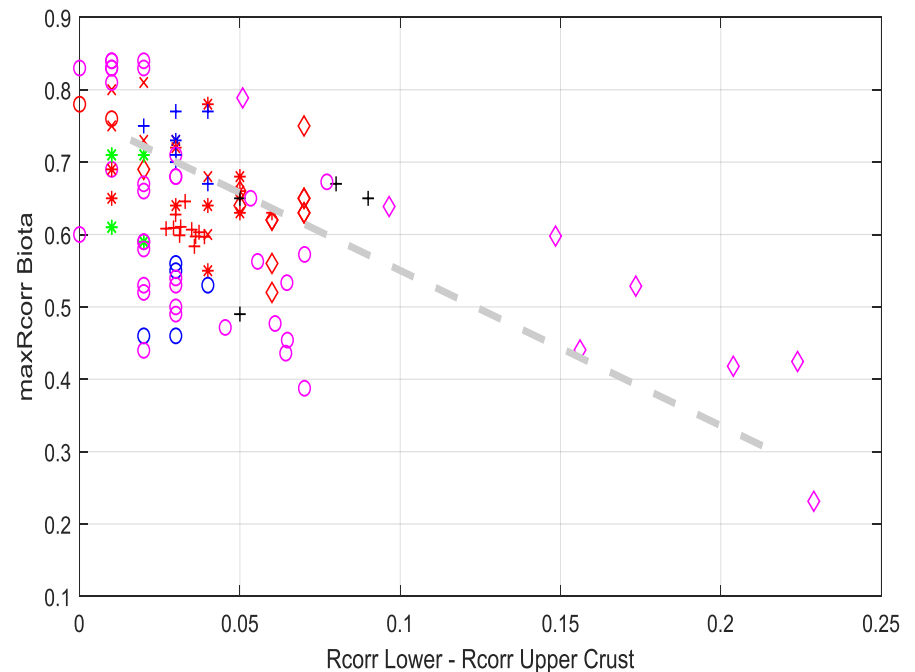
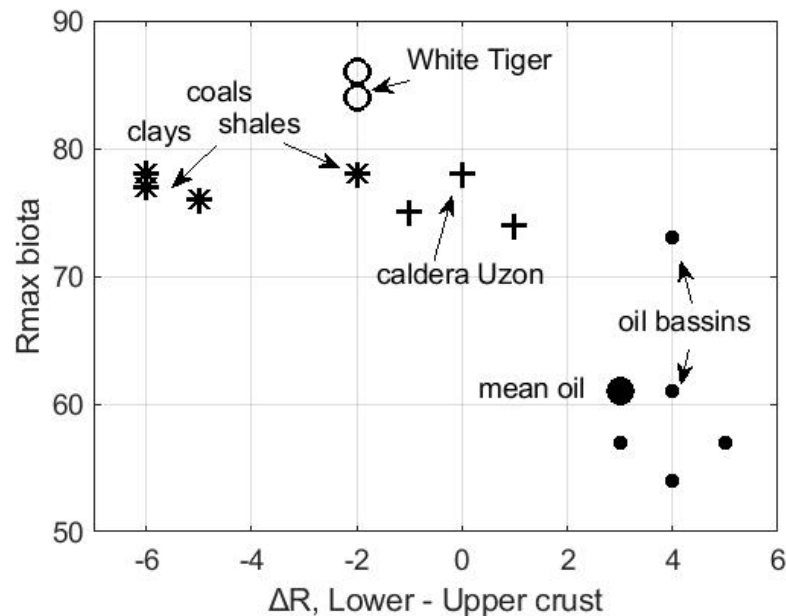
Естественное  
объяснение - восходящий поток  
флюида

| Средние значения коэффициентов корреляции для разных подборок данных |             |           |           |                     |                      |                     |                      |
|----------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|-----------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Порода,<br>расположение                                              | Земная кора |           |           | Биота               |                      |                     |                      |
|                                                                      | верхняя     | средняя   | нижняя    | Растения<br>морские | Растения<br>наземные | Животные<br>морские | Животные<br>наземные |
| Угли, сланцы, глины                                                  |             |           |           |                     |                      |                     |                      |
| Угли                                                                 | 0.84        | 0.76      | 0.77      | 0.78                | 0.71                 | 0.48                | 0.50                 |
| Горючие сланцы                                                       | 0.84        | 0.76      | 0.79      | 0.76                | 0.74                 | 0.54                | 0.55                 |
| Черные сланцы                                                        | 0.82        | 0.83      | 0.80      | 0.78                | 0.75                 | 0.57                | 0.56                 |
| Глины                                                                | 0.90        | 0.85      | 0.83      | 0.77                | 0.72                 | 0.53                | 0.46                 |
| Среднее                                                              | 0.85±0.02   | 0.80±0.03 | 0.80±0.01 | 0.77±0.01           | 0.73±0.01            | 0.53±0.02           | 0.52±0.02            |
| Битумоиды, углеродистое вещество, еще не нефть                       |             |           |           |                     |                      |                     |                      |
| Щиты                                                                 | 0.67±0.07   | 0.66±0.08 | 0.58±0.09 | 0.45±0.1            | 0.36±0.08            | 0.28±0.04           | 0.30±0.05            |
| Углеродистое<br>вещество                                             | 0.74±0.05   | 0.69±0.05 | 0.73±0.05 | 0.69±0.02           | 0.48±0.05            | 0.49±0.05           | 0.38±0.05            |
| Битумоиды,<br>порода                                                 | 0.65±0.05   | 0.63±0.05 | 0.66±0.04 | 0.66±0.04           | 0.69±0.03            | 0.62±               | 0.56±0.03            |
| Разные области                                                       | 0.47±0.02   | 0.50±0.02 | 0.50±0.02 | 0.31±0.03           | 0.50±0.03            | 0.49±0.02           | 0.43±0.02            |
| Разные области                                                       | 0.79±0.03   | 0.79±0.03 | 0.79±0.03 | 0.71±0.02           | 0.66±0.01            | 0.61±0.01           | 0.57±0.01            |
| Нефти                                                                |             |           |           |                     |                      |                     |                      |
| Днепровско-<br>Донецкий грабен                                       | 0.58±0.02   | 0.59±0.02 | 0.66±0.02 | 0.58±0.04           | 0.61±0.02            | 0.56±0.03           | 0.60±0.02            |
| [Готтх и др., 2016]                                                  |             |           |           |                     |                      |                     |                      |
| Тимано-Печорская                                                     | 0.66±0.02   | 0.66±0.02 | 0.72±0.02 | 0.60±0.02           | 0.63±0.02            | 0.59±0.02           | 0.54±0.01            |
| [Вешев и др., 2000]                                                  |             |           |           |                     |                      |                     |                      |
| Балтия                                                               | 0.51±0.02   | 0.51±0.02 | 0.57±0.02 | 0.60±0.5            | 0.53±0.05            | 0.29±0.03           | 0.39±0.03            |
| [Маслов и др., 2010]                                                 |             |           |           |                     |                      |                     |                      |
| Удмуртия                                                             | 0.70±0.01   | 0.69±0.01 | 0.74±0.01 | 0.41±0.01           | 0.61±0.01            | 0.53±0.01           | 0.55±0.01            |
| [Ясныгина и др., 2006]                                               |             |           |           |                     |                      |                     |                      |
| Разные области                                                       | 0.58±0.03   | 0.57±0.03 | 0.74±0.02 | 0.24±0.07           | 0.51±0.05            | 0.41±0.05           | 0.39±0.05            |
| Исключение: Камчатка                                                 |             |           |           |                     |                      |                     |                      |
| Камчатка,<br>кальдера Узона                                          | 0.64        | 0.60      | 0.64      | 0.78                | 0.74                 | 0.70                | 0.78                 |
|                                                                      | 0.64        | 0.60      | 0.65      | 0.74                | 0.69                 | 0.67                | 0.76                 |
|                                                                      | 0.73        | 0.73      | 0.72      | 0.75                | 0.68                 | 0.60                | 0.67                 |
| Сибирь и Ромашкино                                                   |             |           |           |                     |                      |                     |                      |
| Октябрьский район,<br>Западная Сибирь                                | 0.71±0.03   | 0.70±0.03 | 0.72±0.02 | 0.77±0.03           | 0.72±0.03            | 0.72±0.03           | 0.76±0.03            |
| Шаимский район,<br>Западная Сибирь                                   | 0.57±0.01   | 0.58±0.01 | 0.59±0.01 | 0.60±0.03           | 0.55±0.02            | 0.53±0.02           | 0.62±0.02            |
| Ромашкино,<br>Березовская<br>площадь                                 | 0.57±0.01   | 0.59±0.01 | 0.60±0.01 | 0.53±0.08           | 0.53±0.05            | 0.67±0.07           | 0.61±0.06            |
| Ромашкино,<br>Абдрахмановская<br>площадь                             | 0.57±0.01   | 0.57±0.01 | 0.59±0.01 | 0.44±0.07           | 0.46±0.04            | 0.56±0.06           | 0.54 ±0.05           |

## В подкрепление существования восходящих сквозькоровых потоков флюидов:

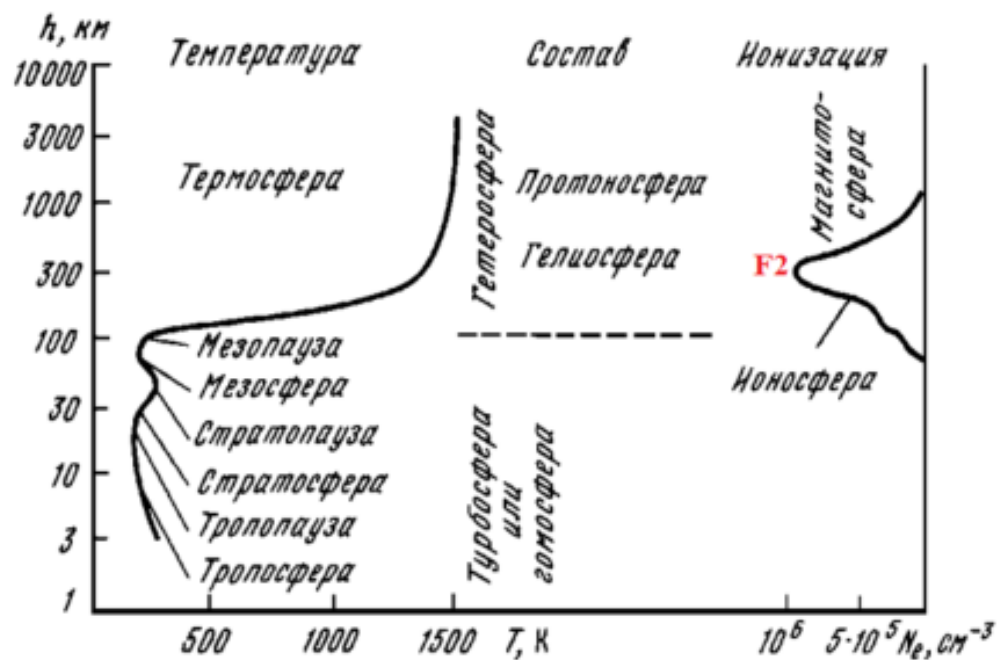
Результаты корреляционного анализа микроэлементного состава приповерхностных пород и каустобиолитов (глины, угли, сланцы), углеродистого вещества «преднефти», нефтей и продуктов деградации нефти в этой последовательности указывают на прогрессивную тенденцию – уменьшения корреляции с составом живых организмов и составом верхней коры и роста вклада связи с нижней континентальной корой - “Rcorr Lower Crust - Rcorr Upper Crust” .

### Разные примеры



**Если физика разрушения разная – то и характер предвестников - в частности сейсмоионосферных эффектов - может быть разным.**

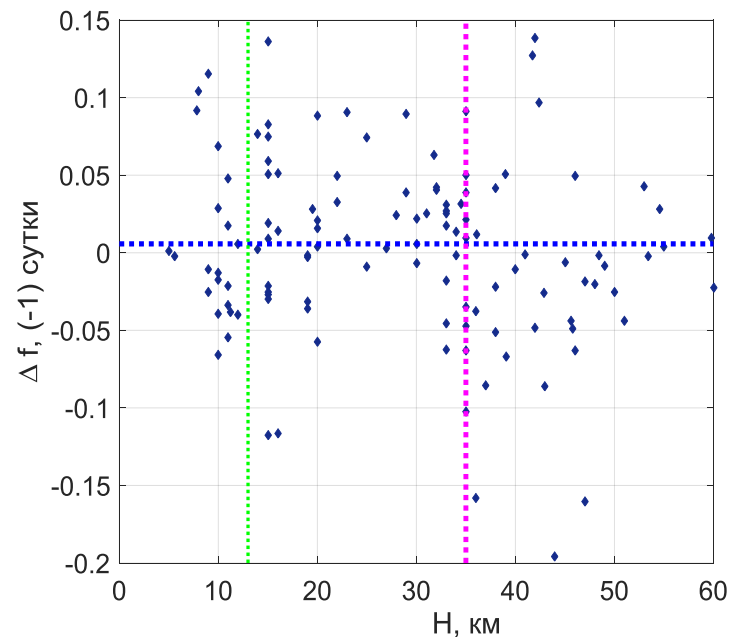
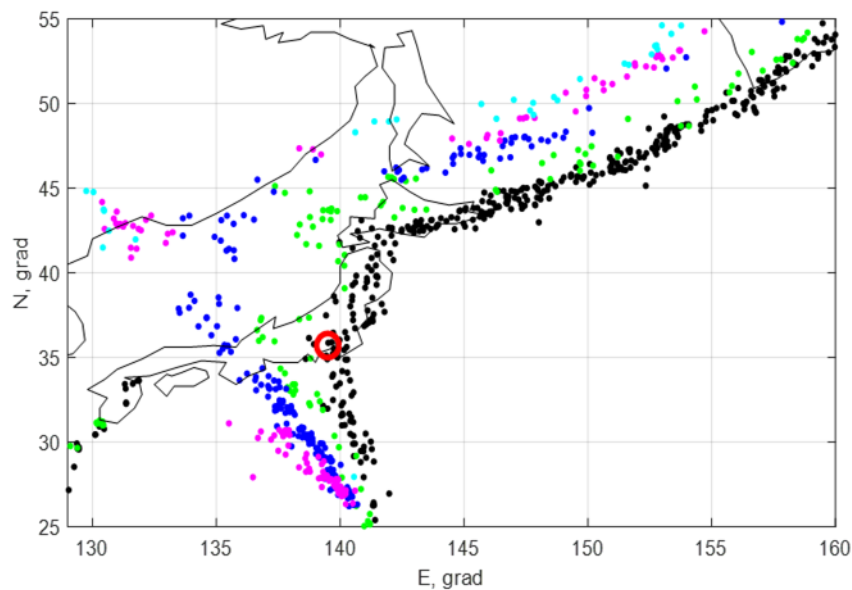
Структура, основные физические процессы в ионосфере,  
и методы исследования



**Рис. 1.** Классификация областей атмосферы по высотной зависимости параметров, температуры, состава и степени ионизации



# Разные механизмы сейсмогенеза - разные предвестники – в частности, отклики в ионосфере



Для станции вертикального зондирования ионосферы Токио рассмотрена

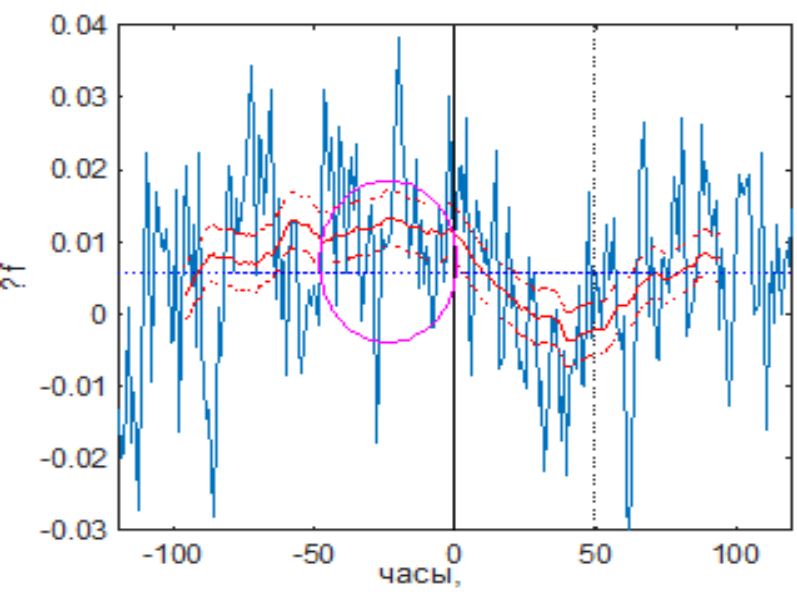
Зависимость **средних значений  $\Delta f(-1)$  сутки** от глубины землетрясений  $M6.0+$ ,  $R \leq 600$  км.

Горизонтальной линией показано среднее фоновое значение  $\Delta f$ .

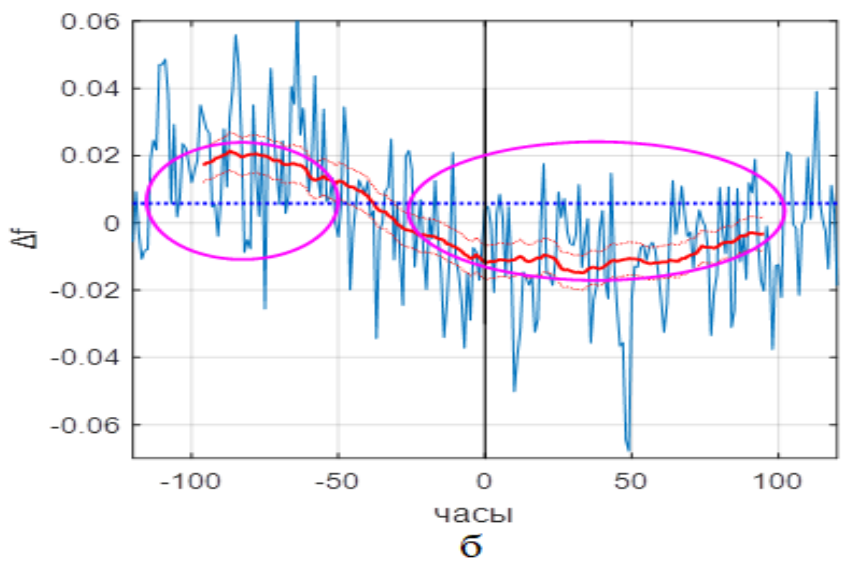
Вертикальными линиями даны предположительно возможные границы смены характера сейсмоионосферного отклика - на глубине 12 и 35 км.

Естественно, при выборе положения границ учитывали данные по изменениям физики очагов землетрясений

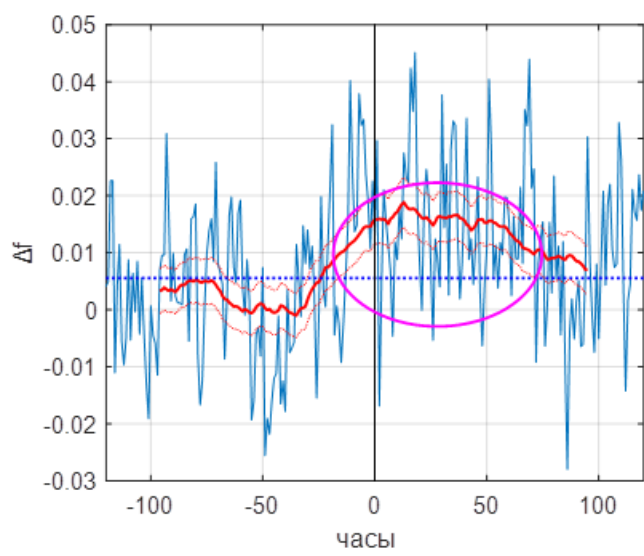
Аномалии средних значений  $\Delta f(-1)$  сутки от глубины землетрясений M6.0+, R ≤ 600 км



а

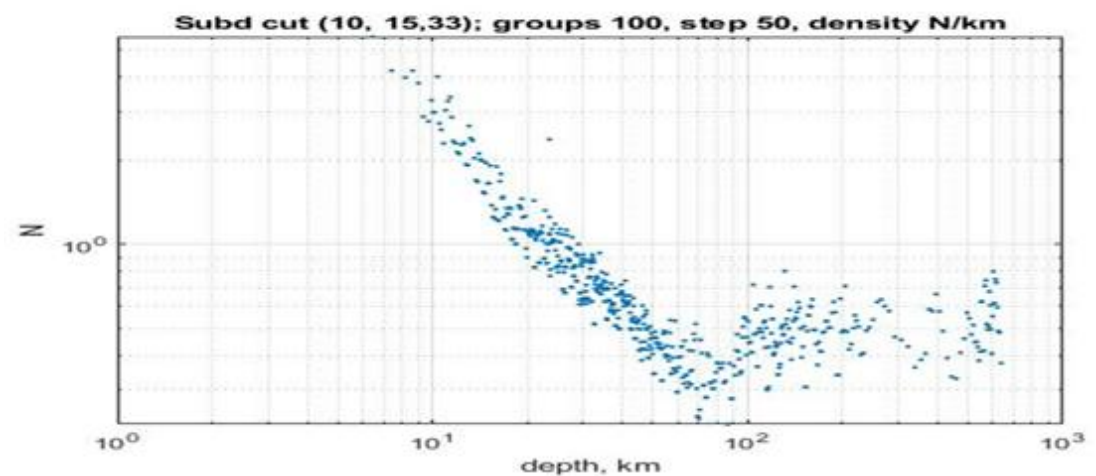


б



в

омалия для событий  $N < 35$  (а); для событий  $35 < N < 70$  (100) км (б); для  $N > 70$  (100) км (в).



# Таблица статистической достоверности аномалий (критерий Смирнова отклонения от фона)

Таблица

Различия характера сейсмоионосферных аномалий для разноглубинных землетрясений  
( $M \geq 6.0$ ,  $R < 600$  км; для событий глубже 70 км,  $R < 1000$  км)

| Диапазон глубин, км | Число землетрясений | Знак аномалии | Интервал времени проявления сейсмоионосферного эффекта (час) | Число часовых значений за указанный интервал | Вероятность случайного характера отклонения от фона |
|---------------------|---------------------|---------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| $H < 35$            | 177                 | +             | -50...0                                                      | 3247                                         | <b><math>P &lt; 0.6\%</math></b>                    |
|                     |                     | -             | +20...+60                                                    | 2632                                         | $P < 2\%$                                           |
| $35 \leq H < 70$    | 77                  | +             | -120...-50                                                   | 2420                                         | <b><math>P &lt; 0.001\%</math></b>                  |
|                     |                     | -             | -25...+100                                                   | 4775                                         | <b><math>P &lt; 0.001\%</math></b>                  |
| $H < 70$            | 254                 | +             | -90...-40                                                    | 1940                                         | <b><math>P &lt; 1\%</math></b>                      |
|                     |                     | -             | 0...+90                                                      | 7652                                         | <b><math>P &lt; 0.01\%</math></b>                   |
| $H > 70$            | 96                  | -             | -60...-30                                                    | 1723                                         | $P < 9\%$                                           |
|                     |                     | +             | -20...+70                                                    | 4525                                         | <b><math>P &lt; 0.001\%</math></b>                  |

Заметим, что учет возможного различия характера сейсмоионосферных аномалий заметно повышает их статистическую достоверность.

В [Fuying Zhu et al., 2018] на основе статистического анализа данных по ПЭС сделан вывод, что статистически надежных сейсмоионосферных эффектов выявить не удалось.

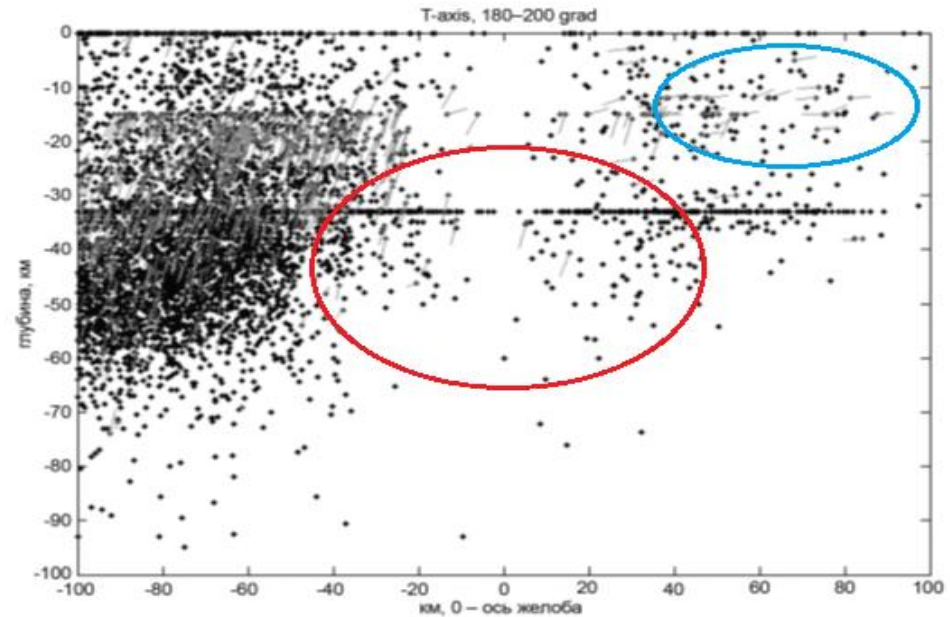
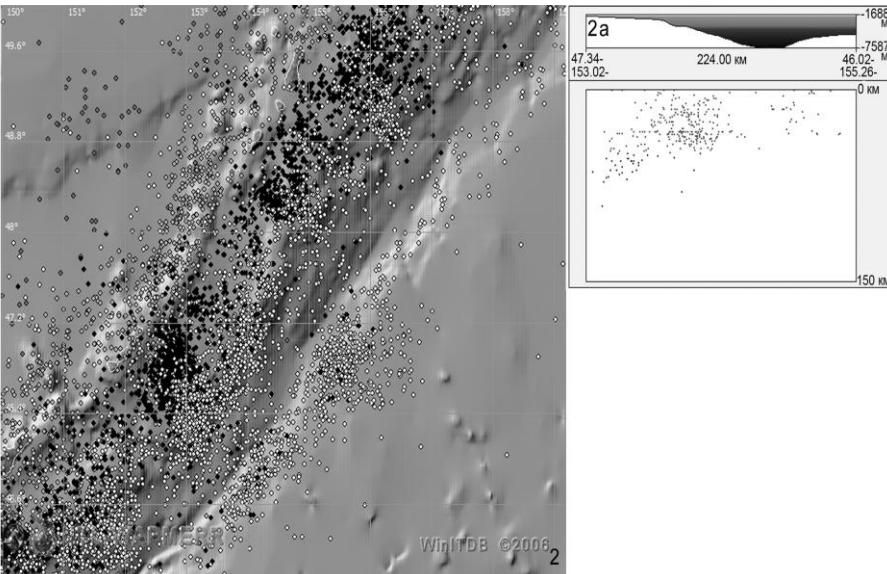
## Выводы:

1. Показано различие средних параметров разноглубинных землетрясений
2. Характер различия согласуется с ранее предложенными теоретическими моделями разделения землетрясений на приповерхностные (обычные), среднеглубокие (с доминирующей ролью в очаге флюидной компоненты) и глубокие (связанные с фазовыми превращениями).
3. Разноглубинным землетрясениям с разной физикой очага могут отвечать разные типы прогнозные признаков. В частности, показано различие сейсмоионосферного отклика на разноглубинные землетрясения.
4. Учет возможного различия существенно повышает статистическую значимость выявленных сейсмоионосферных эффектов.
5. Развитие сквозькоровых восходящих флюидных потоков весома подкрепляется данными корреляционного анализа микроэлементного состава углеводородных, углекислых и грязевулканических флюидов.

*Спасибо за внимание*

# Парадокс скоростей - «нормальные» землетрясения ДОЛЖНЫ прекращаться и, ДА, прекращаются на глубинах нескольких десятков км.

## Пример №1



Район Центральных 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).

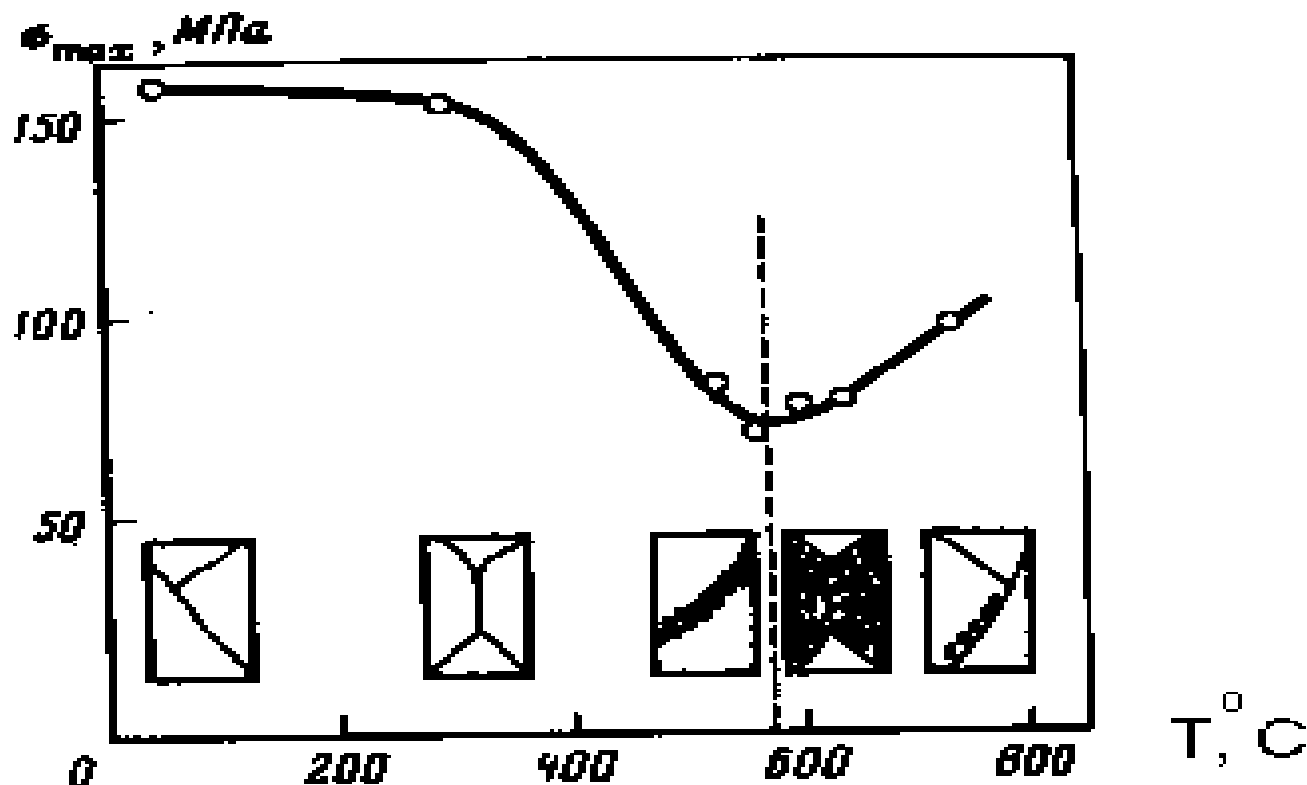
Красным овалом очерчена область, где развит единый характер напряжений, типичный для зон субдукции. Но в середине эта область асейсмична.

**Рабочая гипотеза: напряжения есть, но землетрясений нет. Для сейсмогенеза нужен дополнительный «фактор X»!?**

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

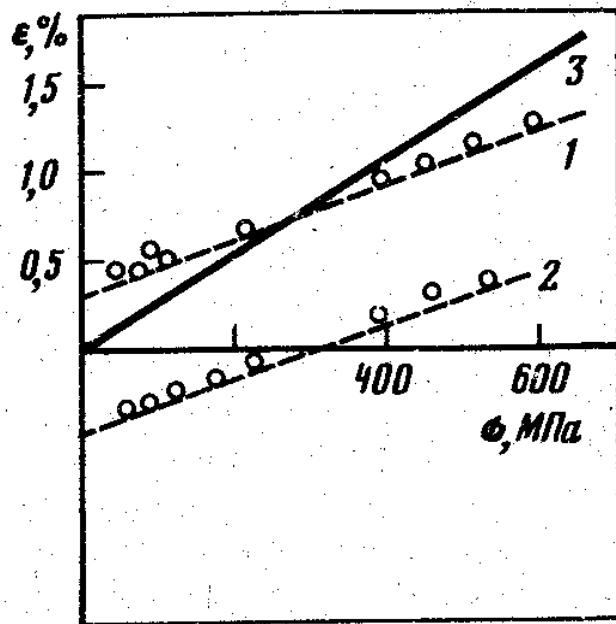


Рис. 3.1. Деформация образца Fe + 0,08% N в процессе фазового перехода при циклическом изменении температуры (по: [202])

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

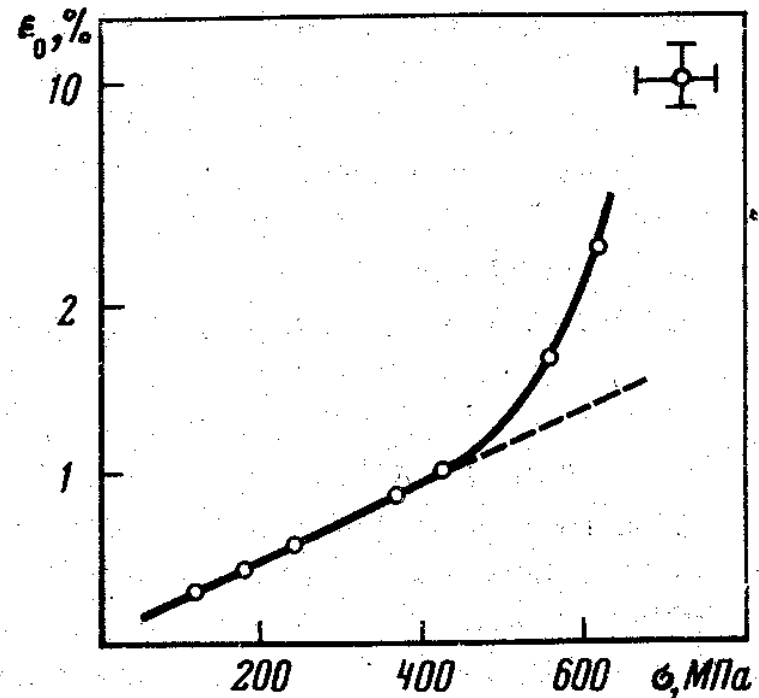


Рис. 3.2. Зависимость деформации железа за цикл ( $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ )-перехода ( $T = 910\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta V/V = 1\%$ ) от приложенного напряжения [220]

## 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  $\eta$  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  $\delta L$  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

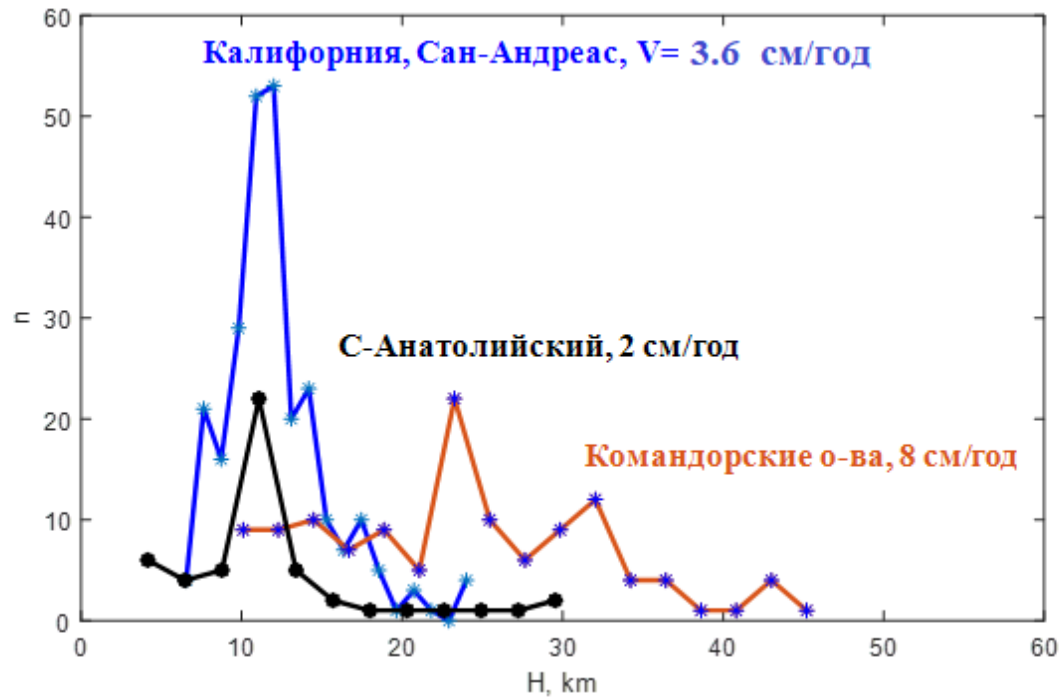
$$\delta L = vt, \quad (3.20b)$$

где  $\sigma$  — действующие вдоль слоя сдвиговые тектонические напряжения;  $\delta h$  — 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.

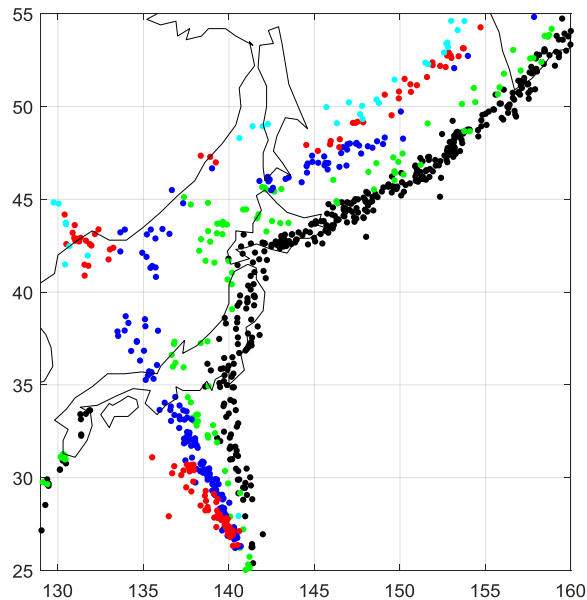
Аналогично, нет сомнений, что смещения плит по Северо-Анатолийскому разлому и по системе Сан-Андреас не ограничивается верхними 20-30 км. Но более глубоких землетрясений и здесь нет (рис., распределение землетрясений по глубине).

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



**Но глубже 50 км «нормальных» землетрясений нет нигде?**

**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.

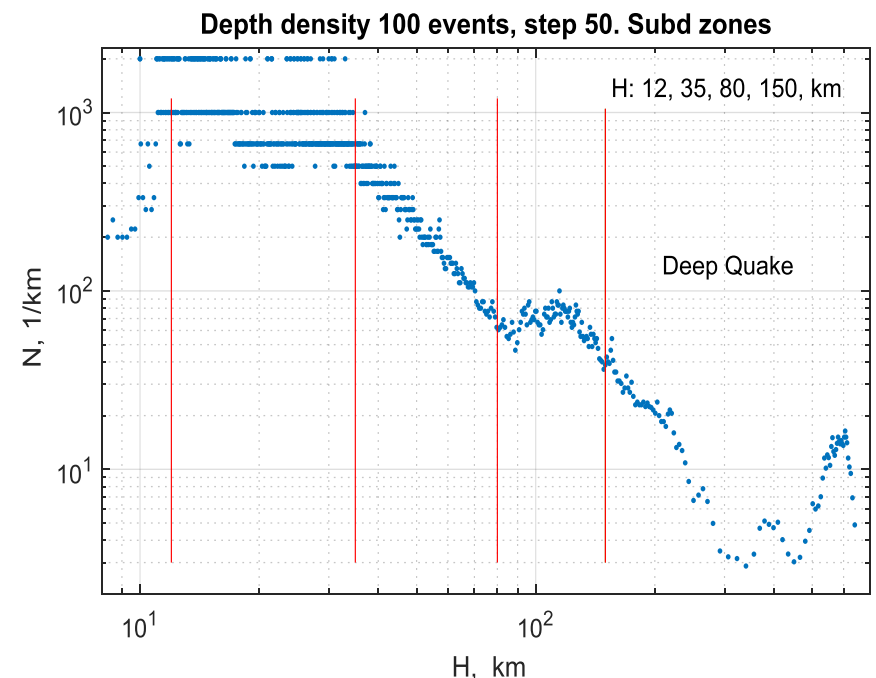
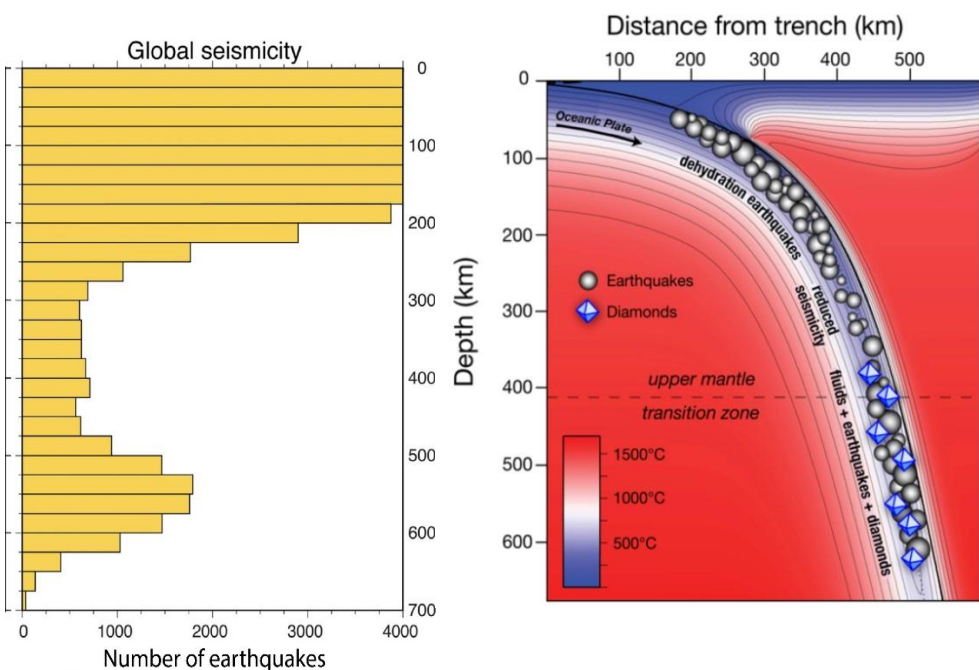
**То есть, гипотеза «упирания» плит в границу средней и нижней мантии с широким по глубине максимумом сейсмичности отпадает.**

**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.**

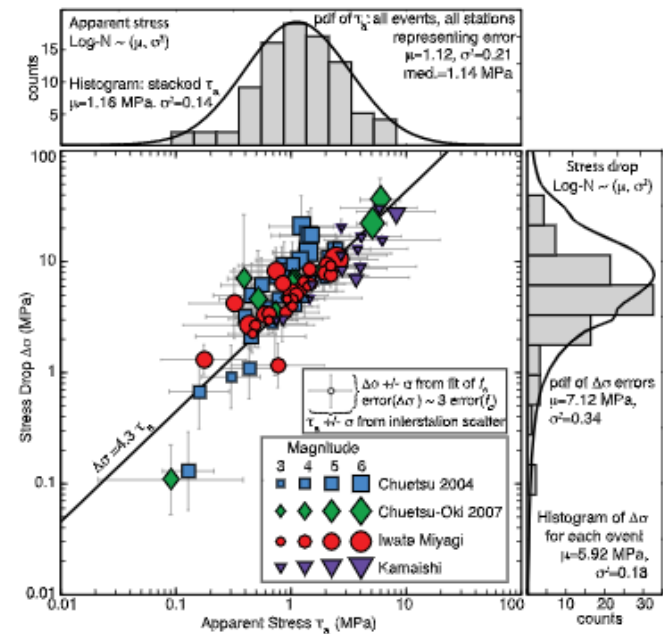
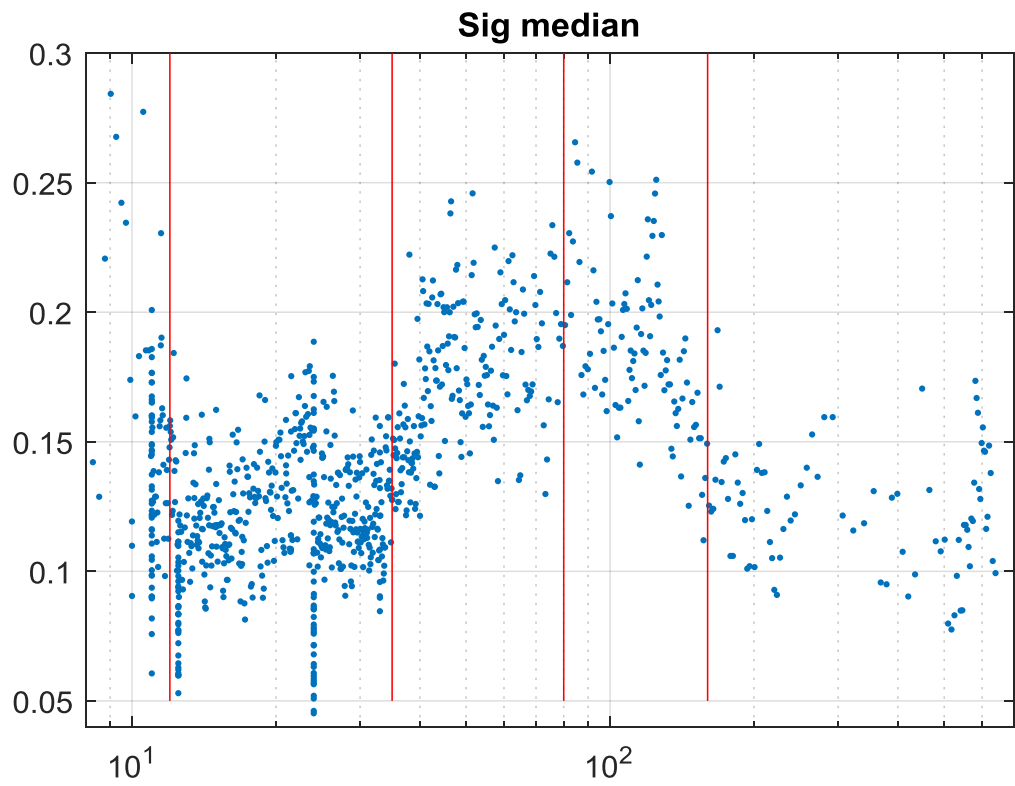
**Shirey, S. B., Wagner, L. S., Walter, M. J., Pearson, D. G., & van Keken, P. E. (2021). Slab transport of fluids to deep focus earthquake depths—thermal modeling constraints and evidence from diamonds. AGU Advances**



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.**

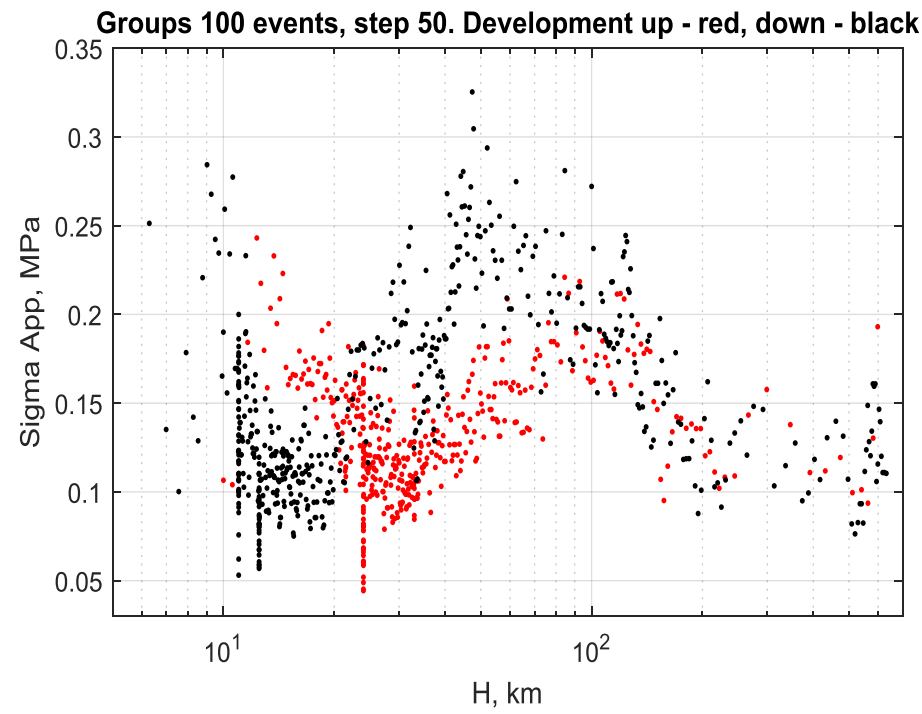
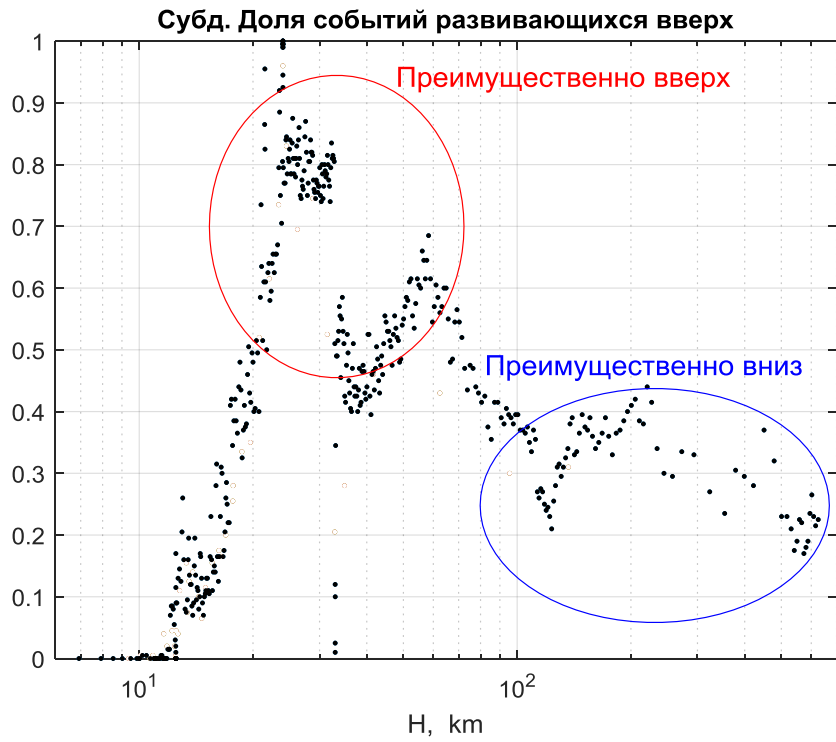
Изменение по глубине характерных величин кажущихся напряжений.



**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).



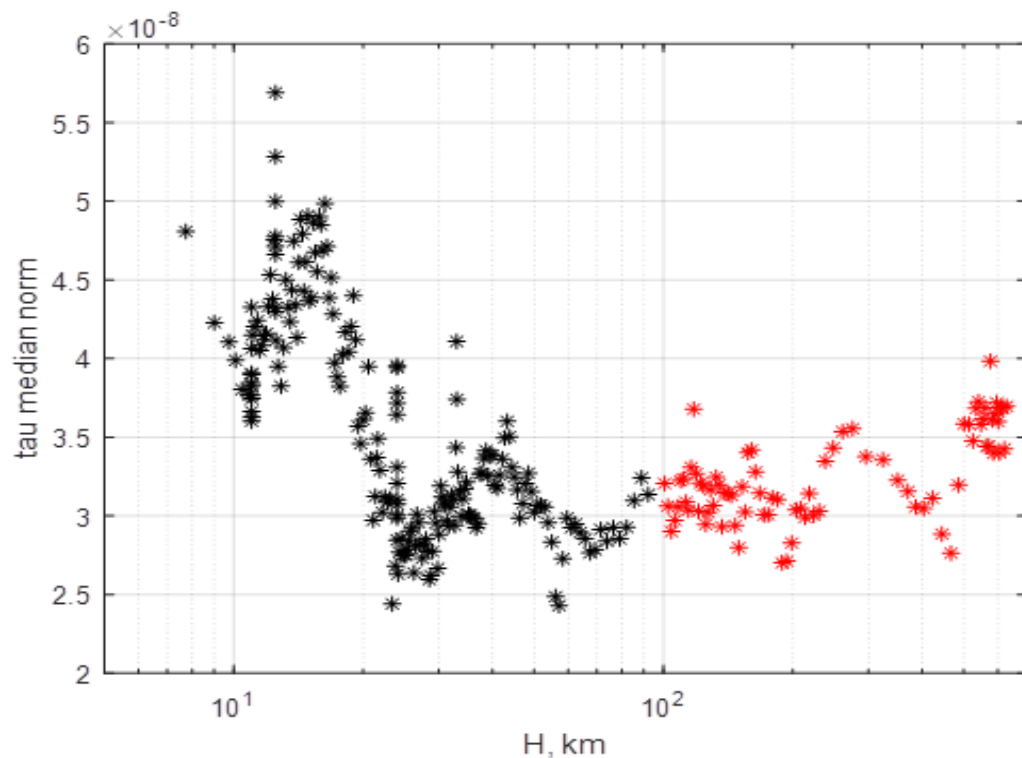
**Сравним изменение по глубине доли событий развивающихся вверх и вниз и характерные значения кажущихся напряжений**



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

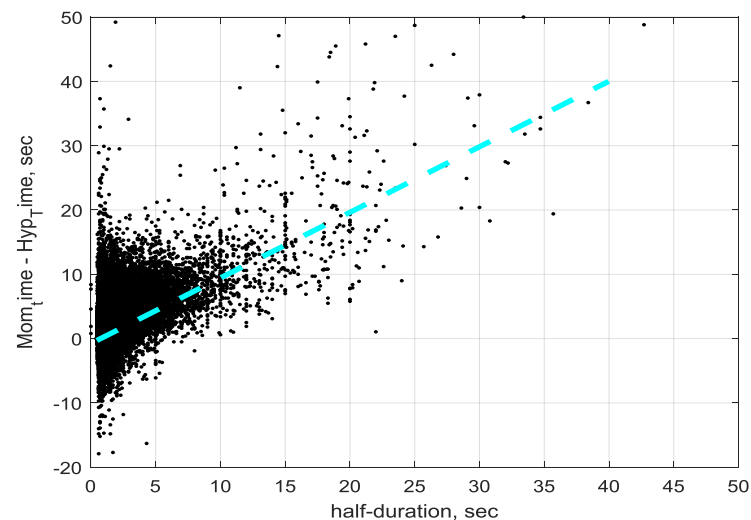
Землетрясения развиваются преимущественно вверх в области, где доминирует дегидратационное охрупчивание (гидроразрывы?); сейсмогенные напряжения для таких событий относительно ниже.

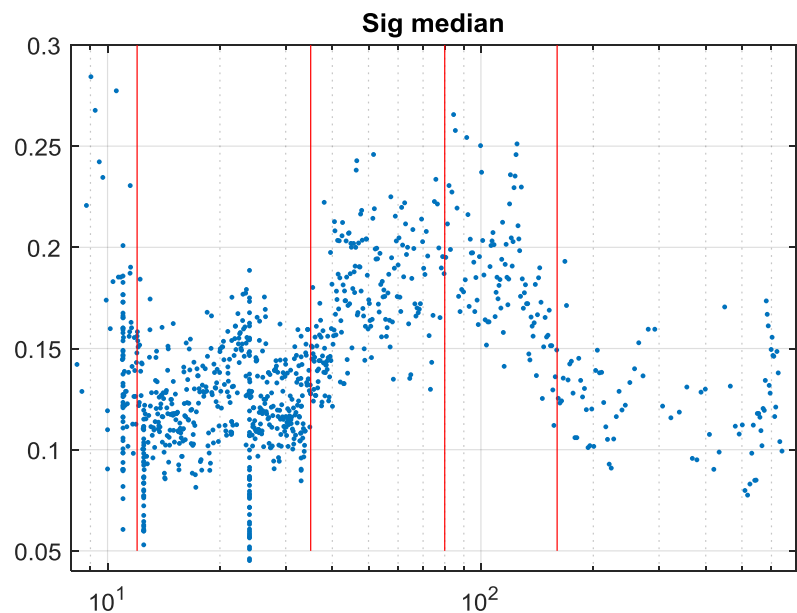
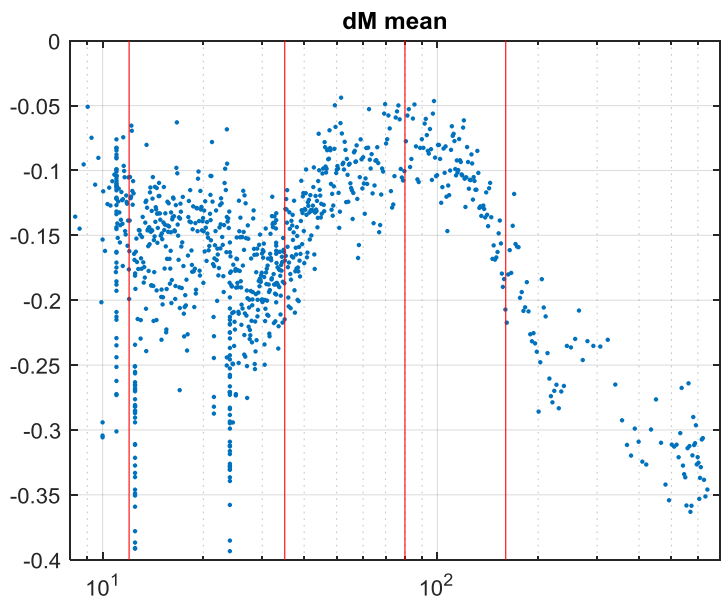
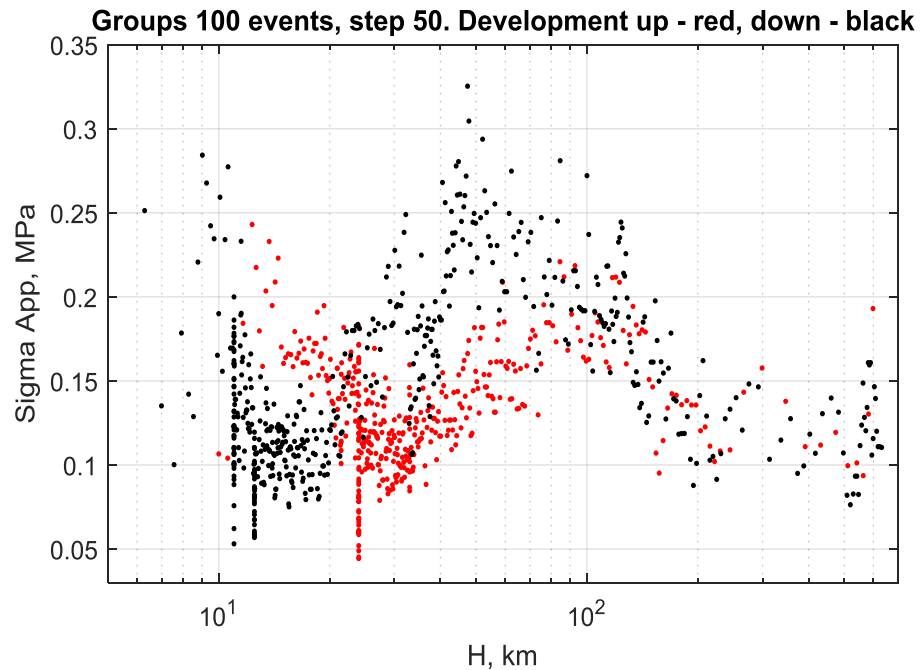
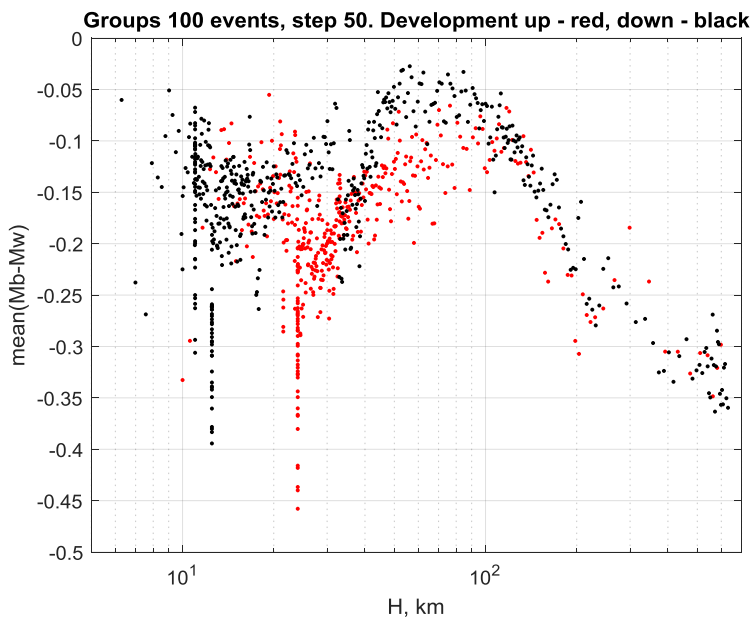
**Аналогичный график для медиан нормированных полу-продолжительностей сейсмического процесса. Среднее из разницы времен сейсмического момента и гипоцентра и полу-продолжительности процесса излучения.**



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  $\Delta t$  на глубинах 12, 40-50, около 100, 300 и на 600 км.**



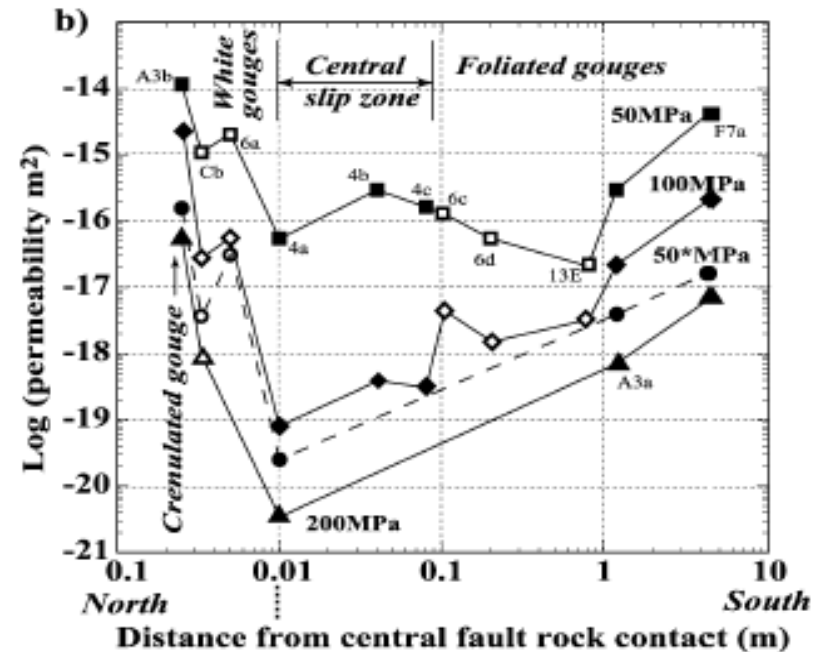
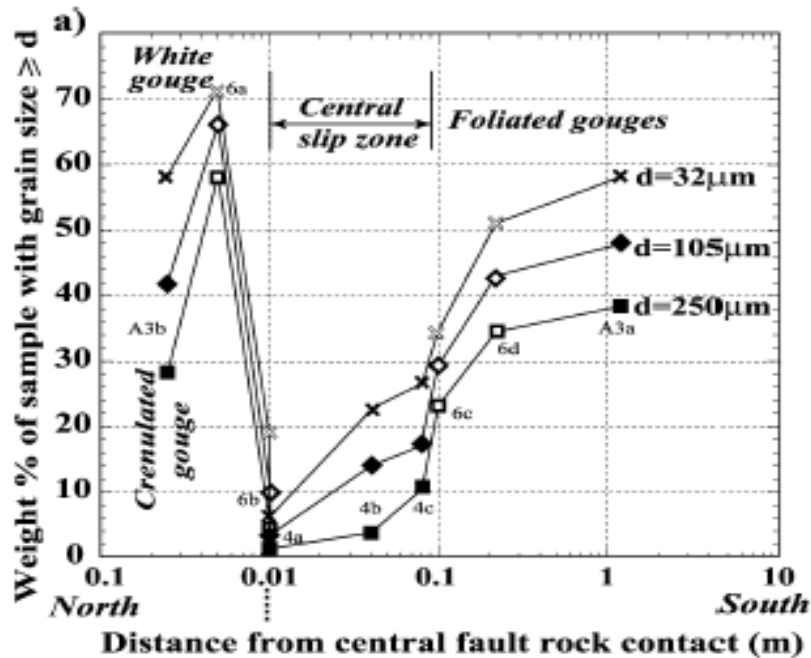


Не все хорошо даже и с неглубокими землетрясениями

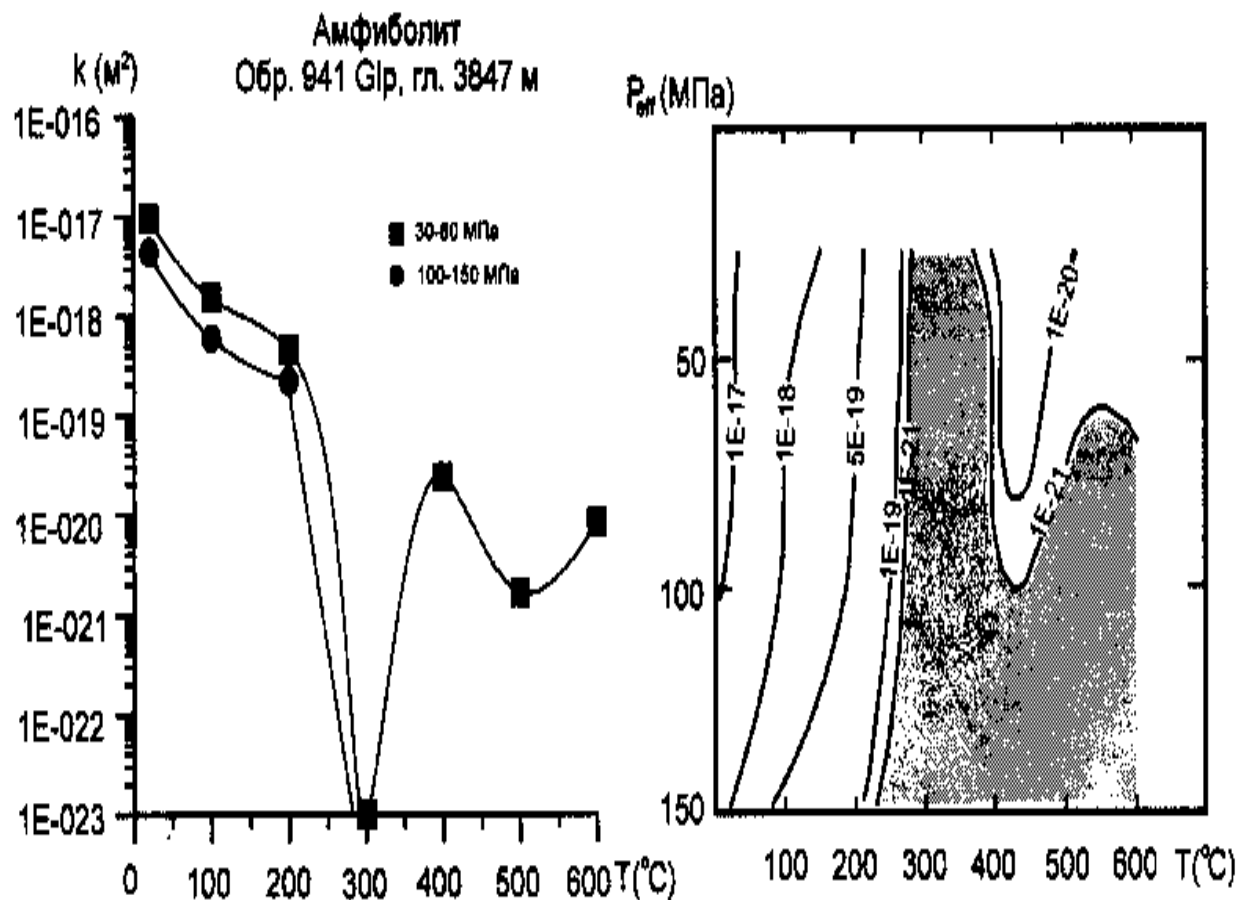
## Локализация областей высокой проницаемости.

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



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.