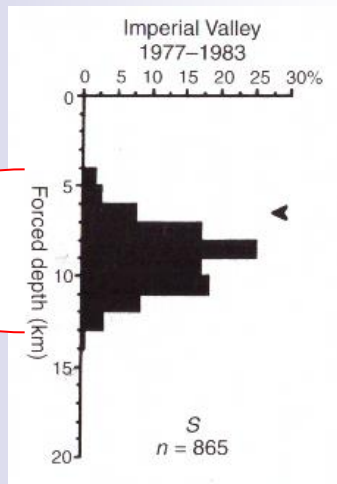
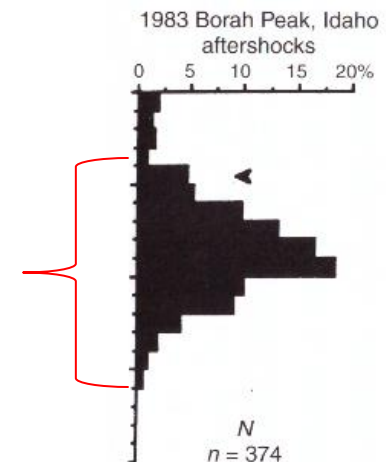


“Веерный” механизм разрушения цельных горных пород – как триггер динамических процессов на сейсмических глубинах в земной коре

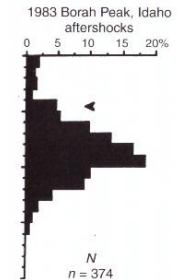
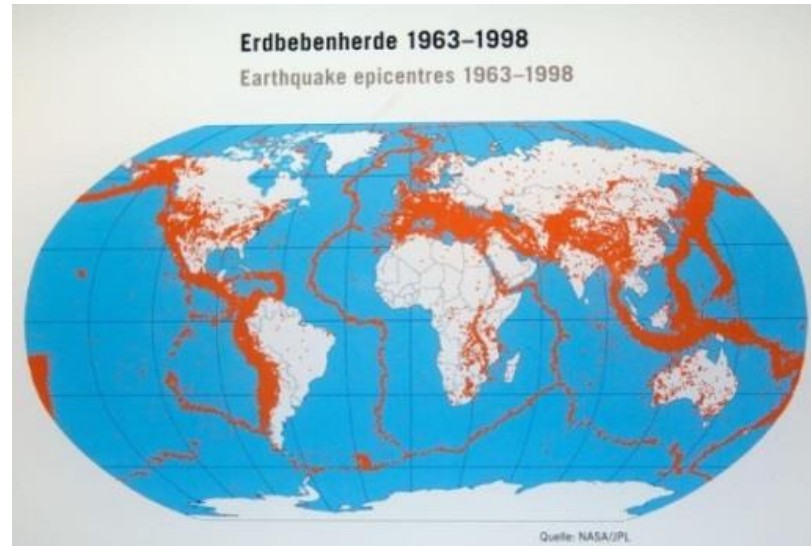


Тарасов БГ

ВНИМИ



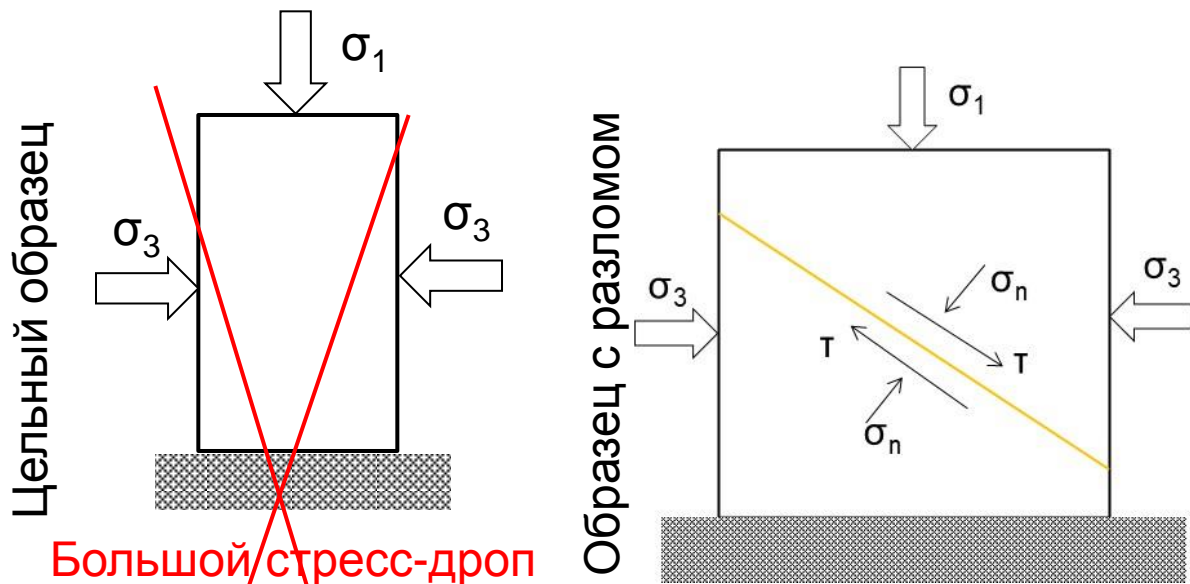
Стик-слип процесс как основной механизм землетрясений в земной коре



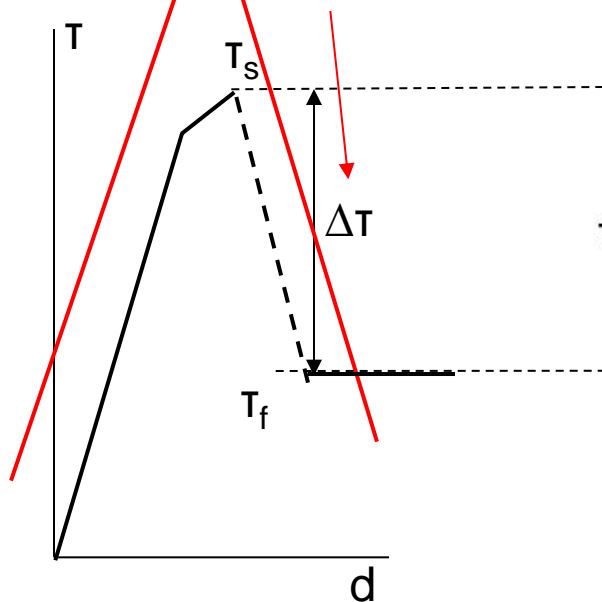
Активизация землетрясений осуществляется

- на базе существующих дефектов
- при низком уровне сдвиговых напряжений (ниже прочности трения)
- сопровождается малым сбросом напряжений (малым стресс дропом)

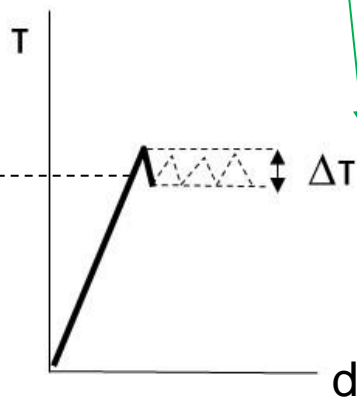
Обоснование стик-слип механизма



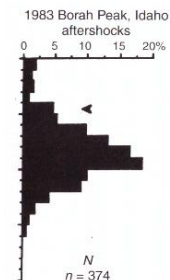
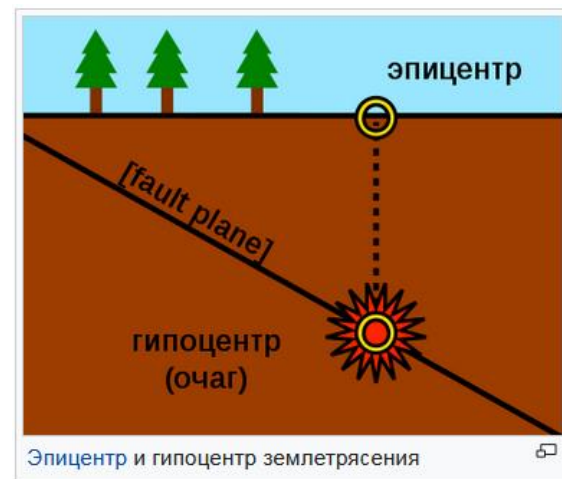
Большой стресс-дроп



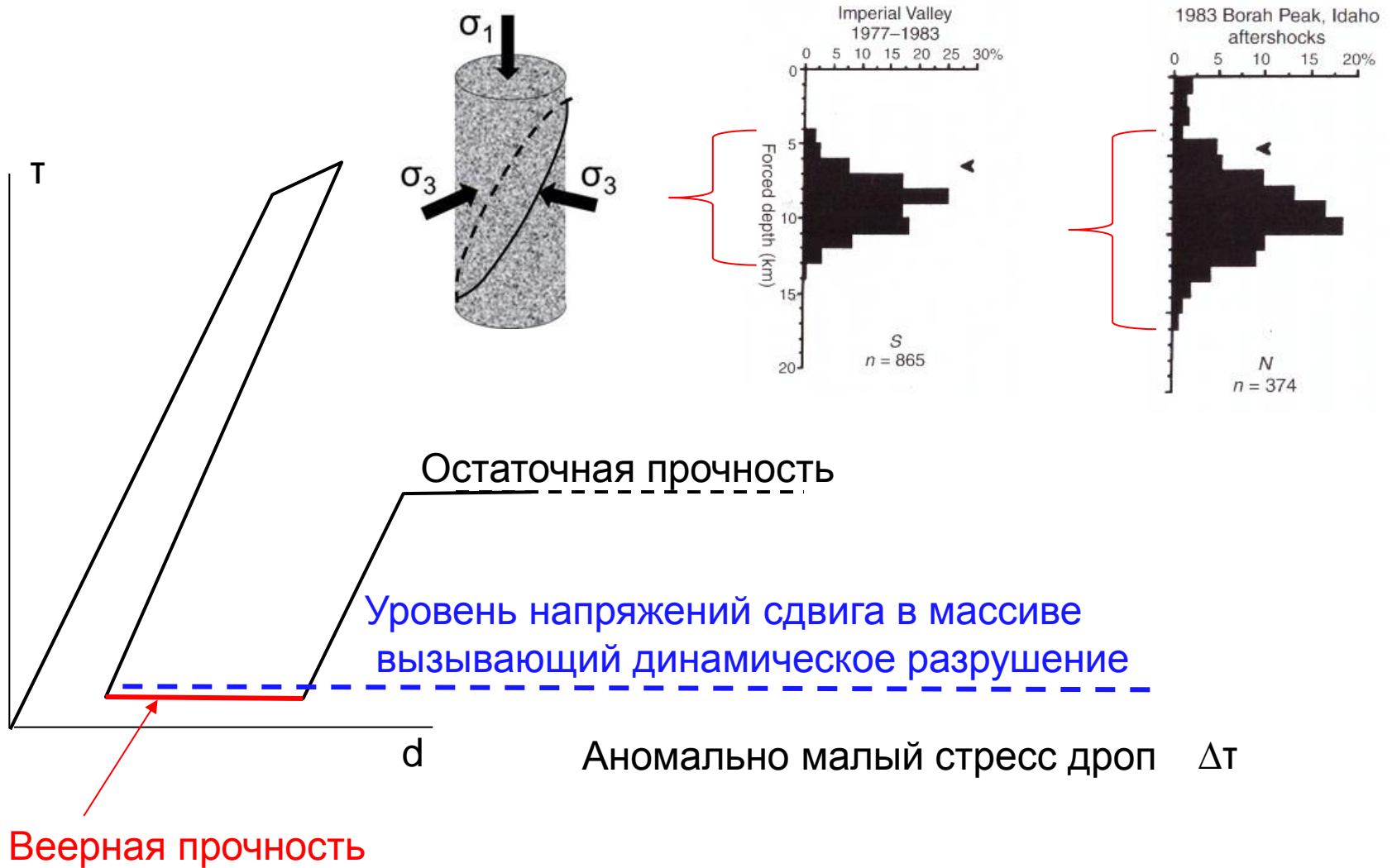
Малый стресс-дроп



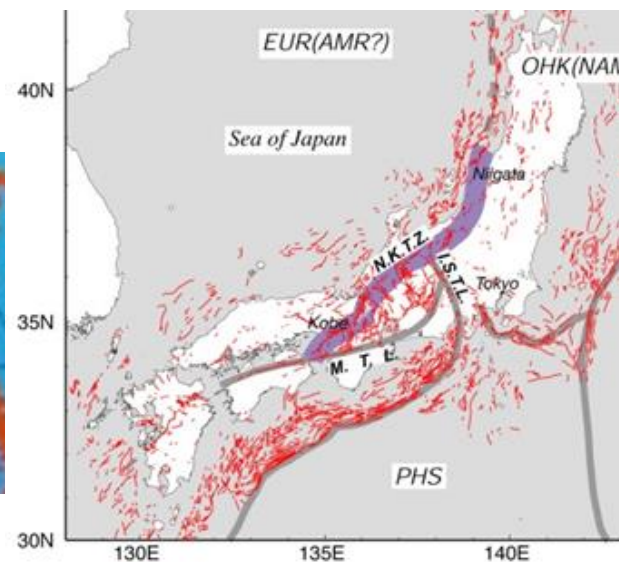
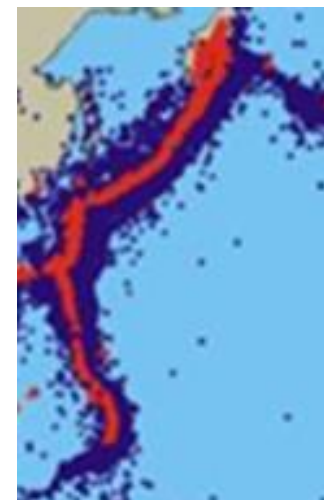
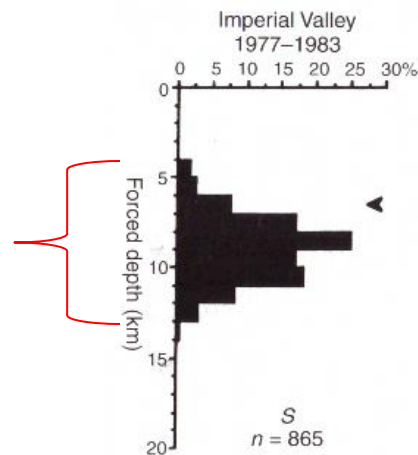
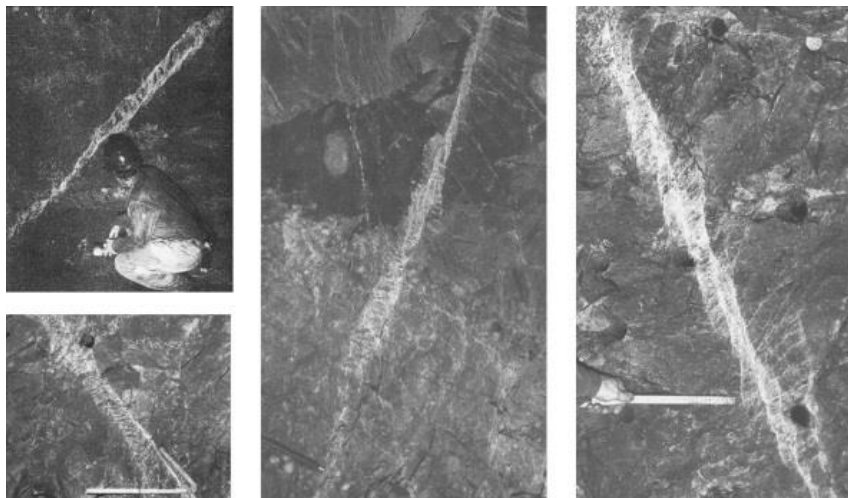
Brace, Byerlee, 1966.
Stick-slip as a mechanism
for earthquakes. Science,
N. Ser. 153 (3739), 990–992.



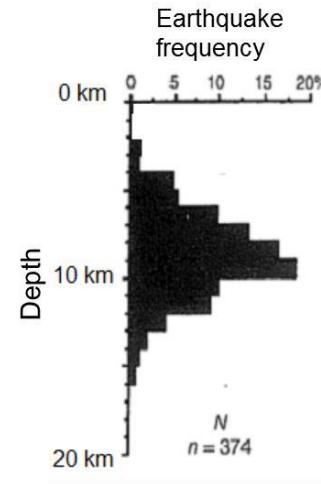
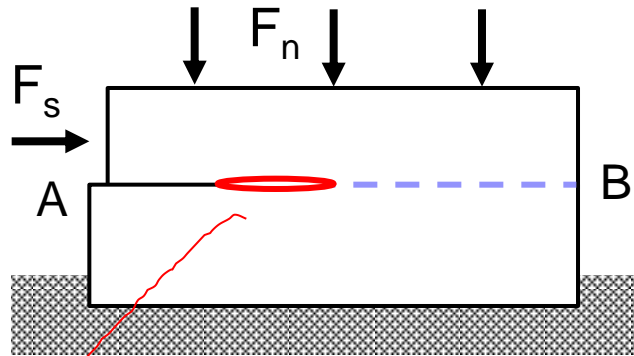
Низкая прочность цельных пород в процессе разрушения



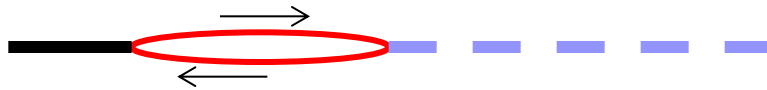
Динамические явления на сейсмических глубинах вызваны сдвиговыми трещинами в цельных породах



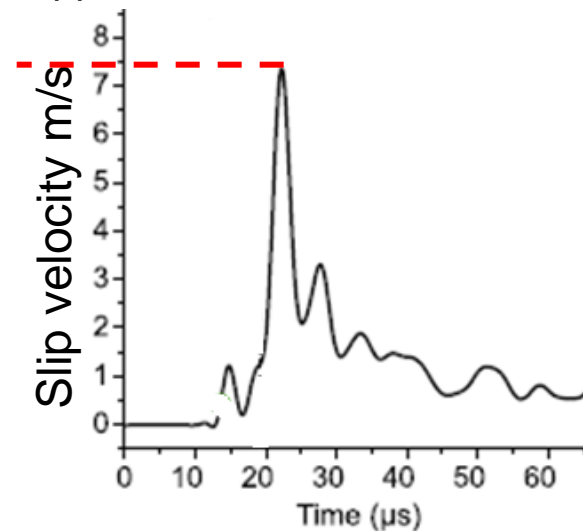
Парадоксы скорости и температуры трещин сдвига



Сверхзвуковые скорости распространения трещин до **9 km/s**
Скорость сдвига в голове трещин до **10 m/s**

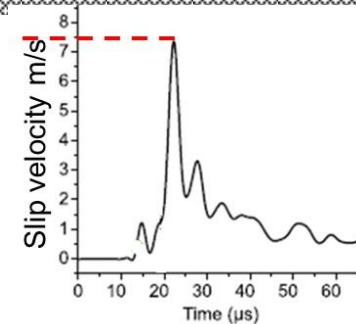
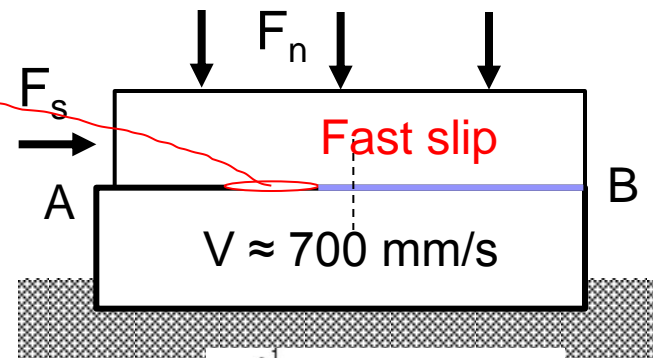
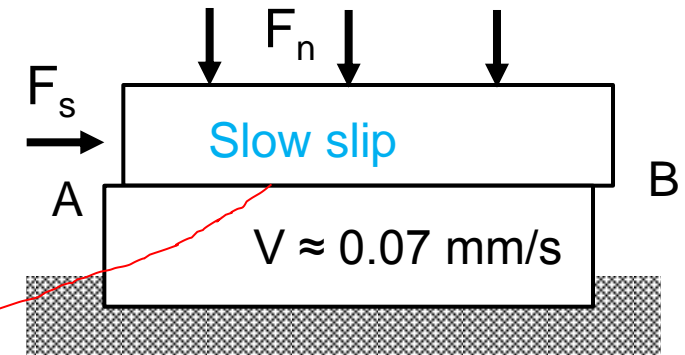
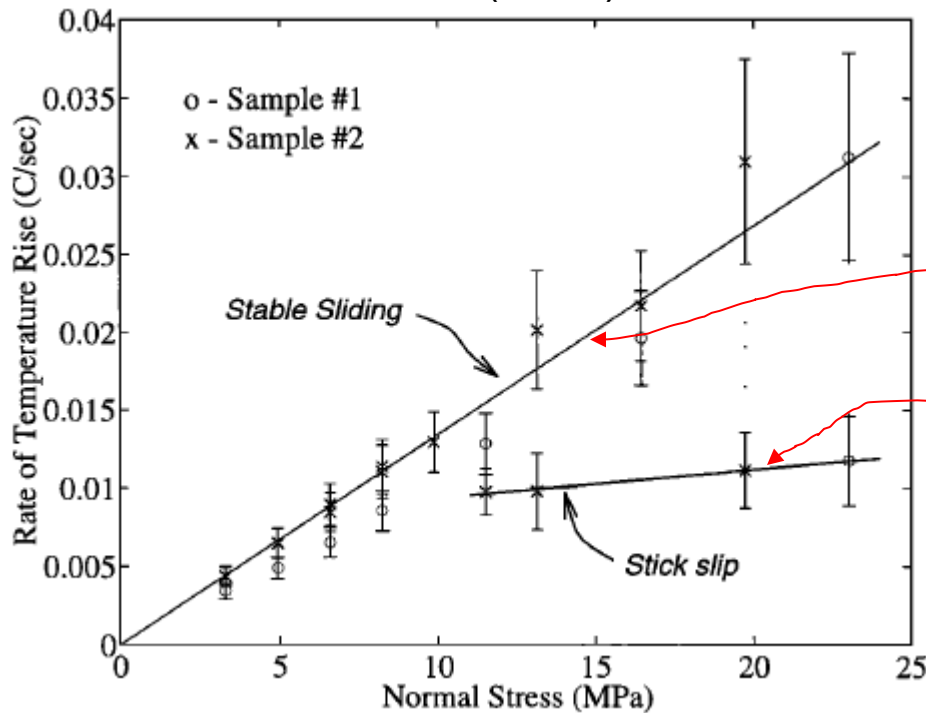


Температурный парадокс



Температурный парадокс (Heat flow paradox)


Brown (1998)



Heat flow paradox was observed for the San Andreas fault (Lachebruch and Sass, 1980)

In total more than 40 papers on this subject have been published

- Tarasov B (2022). Physical sense of rock brittleness in compression and the associate universal brittleness criterion. *GORNYI ZHURNAL*, № 1, pp. 15–22
- Tarasov B. (2021). Class III post-peak rock behavior and a new concept of dynamic instability. Chapter 20 of the book *Modeling in Geotechnical Engineering*, Elsevier, Academic Press, 471-491
- Tarasov B. (2020). The fan mechanism as an initiator of deep-level earthquakes and rock bursts. *GORNYI ZHURNAL*, 2020, № 3, pp. 18–23
- Tarasov B. (2019). Dramatic weakening and embrittlement of intact hard rocks in the Earth's crust at seismic depths. Chapter of the book *Earth Crust*, DOI:<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.85413>.
- Tarasov BG, Sadovskii VM, Sadovskaya OV, Cassidy MJ, Randolph MF (2018). Modelling the static stress–strain state around the fan-structure in the shear rupture head. *Applied Mathematical Modelling* 57, 268-279.
- Tarasov B, Guzev M, Sadovskii V, Cassidy M (2017). Modeling the mechanical structure of extreme ruptures with friction approaching zero generated in brittle materials. *Int. J. Fracture*, DOI 10.1007/s0704-017-0223-1.
- Tarasov B. (2017). Discussion of the features of a shear rupture rockburst mechanism based upon a recently identified fan-head dynamic shear rupture mechanism. *Rockburst*, Chapter 6.3. Butterworth-Heinemann.
- Tarasov B. (2016). Shear fractures of extreme dynamics. *Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 49, 3999-4021
- Tarasov B. and Randolph M. (2016). Improved concept of lithospheric strength and earthquake activity at shallow depths based upon the fan-head dynamic shear rupture mechanism. *Tectonophysics*, 667, 124-143.
- Tarasov B. (2014). Hitherto unknown shear rupture mechanism as a source of instability in intact hard rocks at highly confined compression. *Tectonophysics*, 621; 69-84.
- Tarasov, B. (2014). Fan-structure shear rupture mechanism as a source of shear rupture rockbursts. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 114(10): 773 - 784.
- Tarasov B. and Potvin Y. (2013). Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 59, 57-69.
- Tarasov B. and Potvin Y. (2012). Absolute, relative and intrinsic rock brittleness at compression. *Mining Technology*, vol 121, no.4, 218-225.
- Tarasov B. (2012) Superbrittle failure regime of rocks at conventional triaxial compression. In book: *True Triaxial Testing of Rocks*, edited by M. Kwasniewski, X. Li, M. Takahashi, CRC Press.
- Tarasov B. and M.F. Randolph. (2011) Superbrittleness of rocks and earthquake activity. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*., 48: 888-898.
- Tarasov B. (2008) Intersonic shear rupture mechanism. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*., 45,6, pp. 914-928.
- Tarasov B., and M. Randolph (2007) Frictionless shear at great depth and other paradoxes of hard rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. 45, 3, pp. 316-328

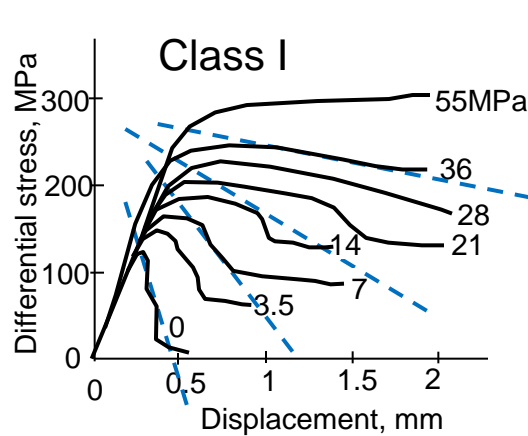


Запредельные свойства пород в условиях сейсмических глубин

Неисследованные запредельные свойства прочных горных пород при высоких боковых давлениях σ_3

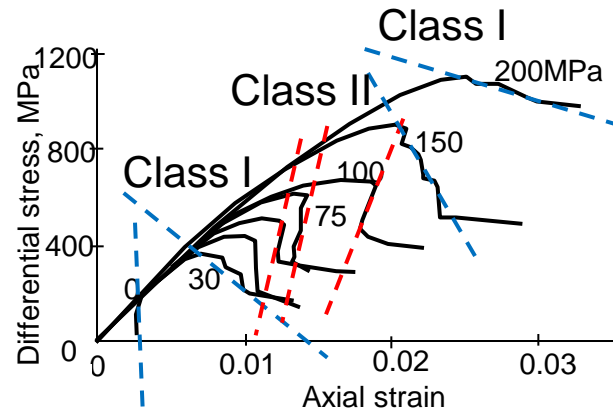
слабые

UCS = 130 MPa
marble



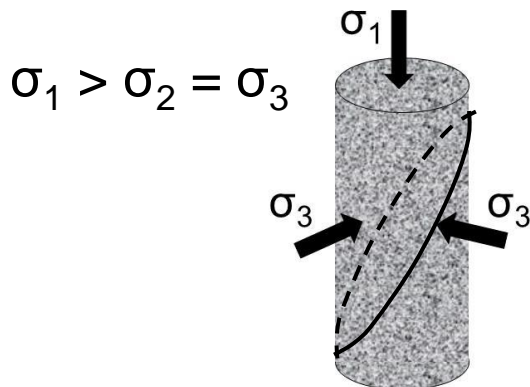
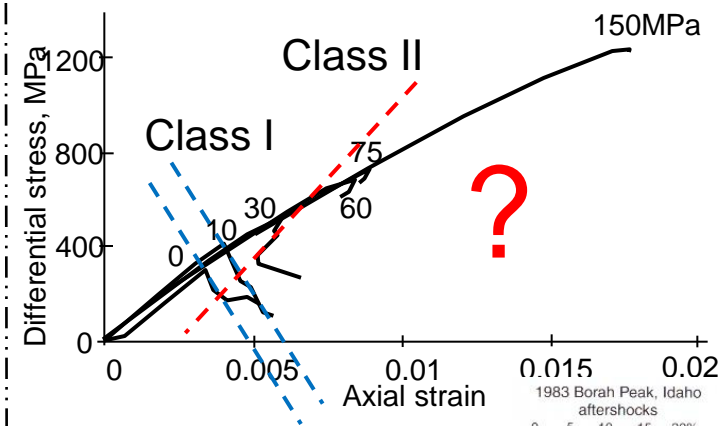
средние

UCS = 180 MPa
quartzite



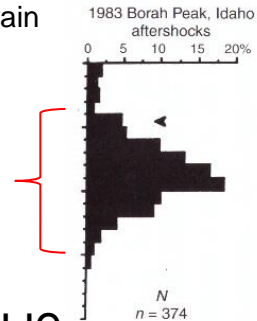
прочные

UCS = 300 MPa
dolerite



← UCS < 250 MPa UCS > 250 MPa →

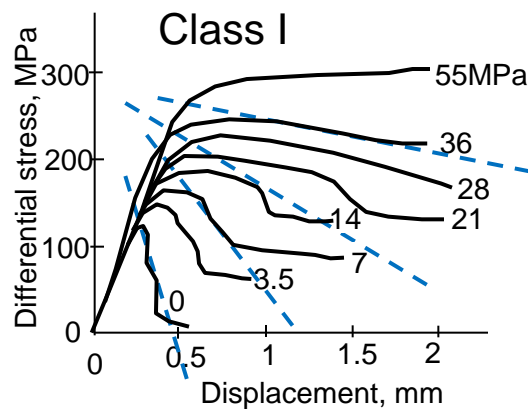
Сильно метаморфизованные и вулканические породы



Неисследованные запредельные свойства прочных горных пород при высоких боковых давлениях σ_3

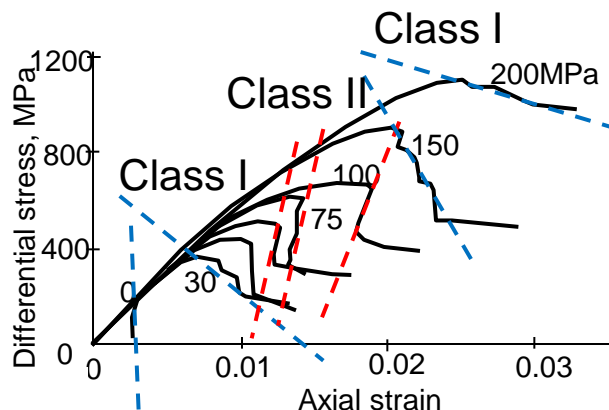
слабые

UCS = 130 MPa
marble



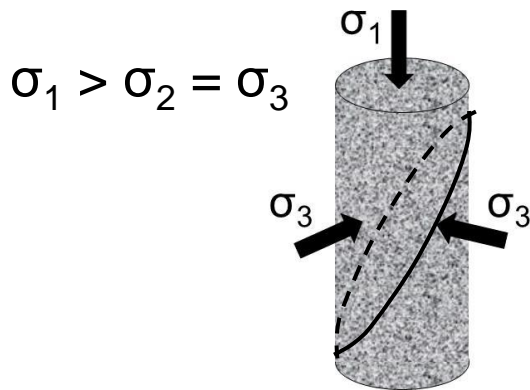
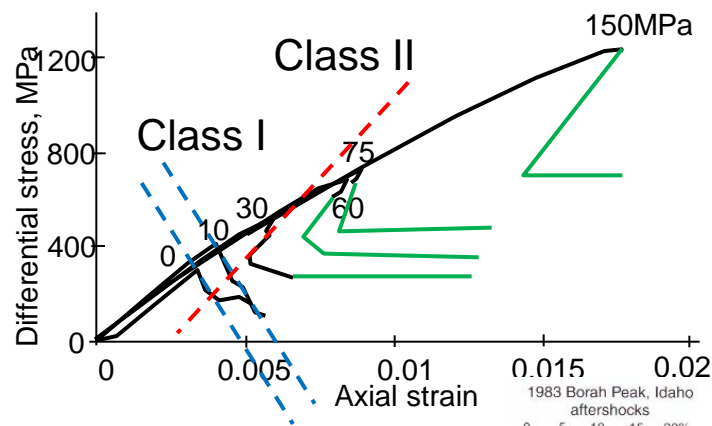
средние

UCS = 180 MPa
quartzite



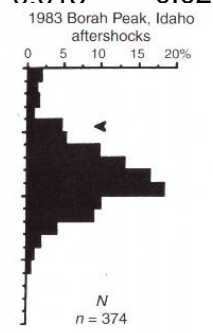
прочные

UCS = 300 MPa
dolerite

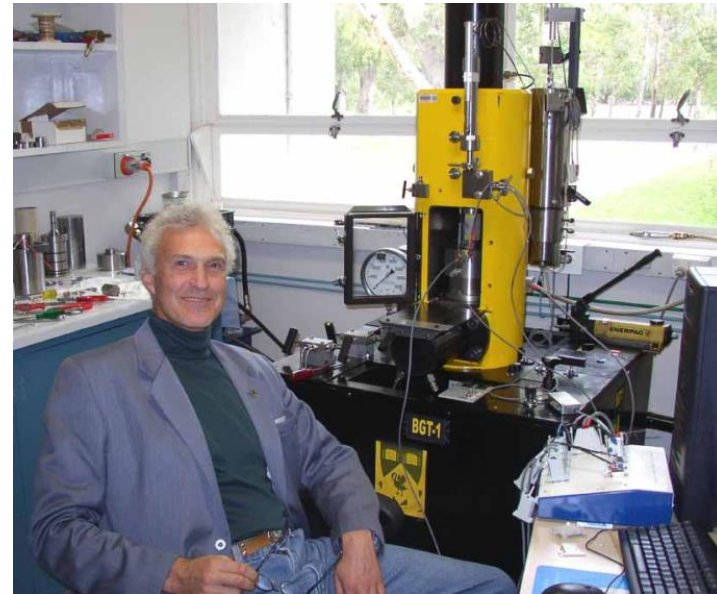
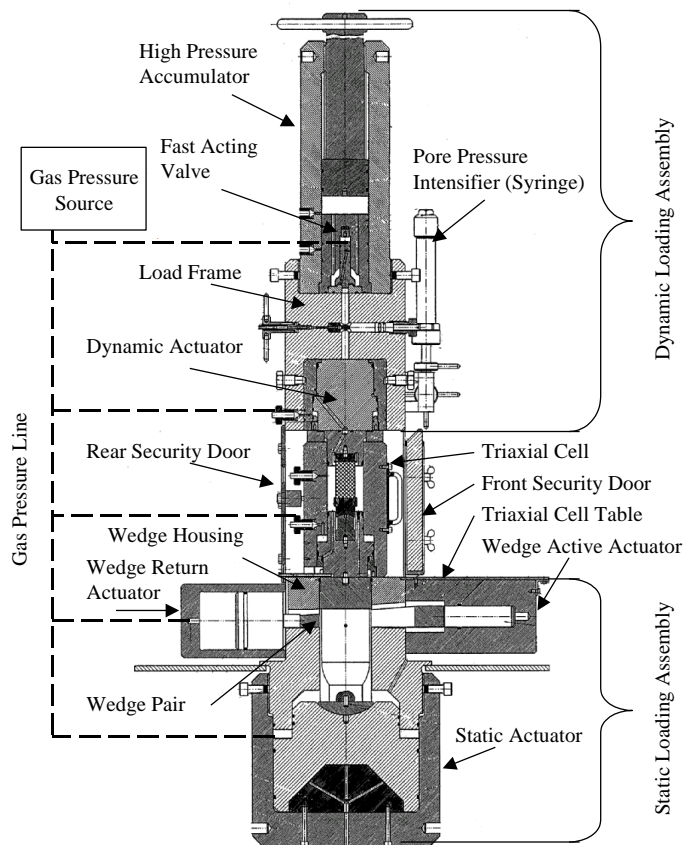


← UCS < 250 MPa UCS > 250 MPa →

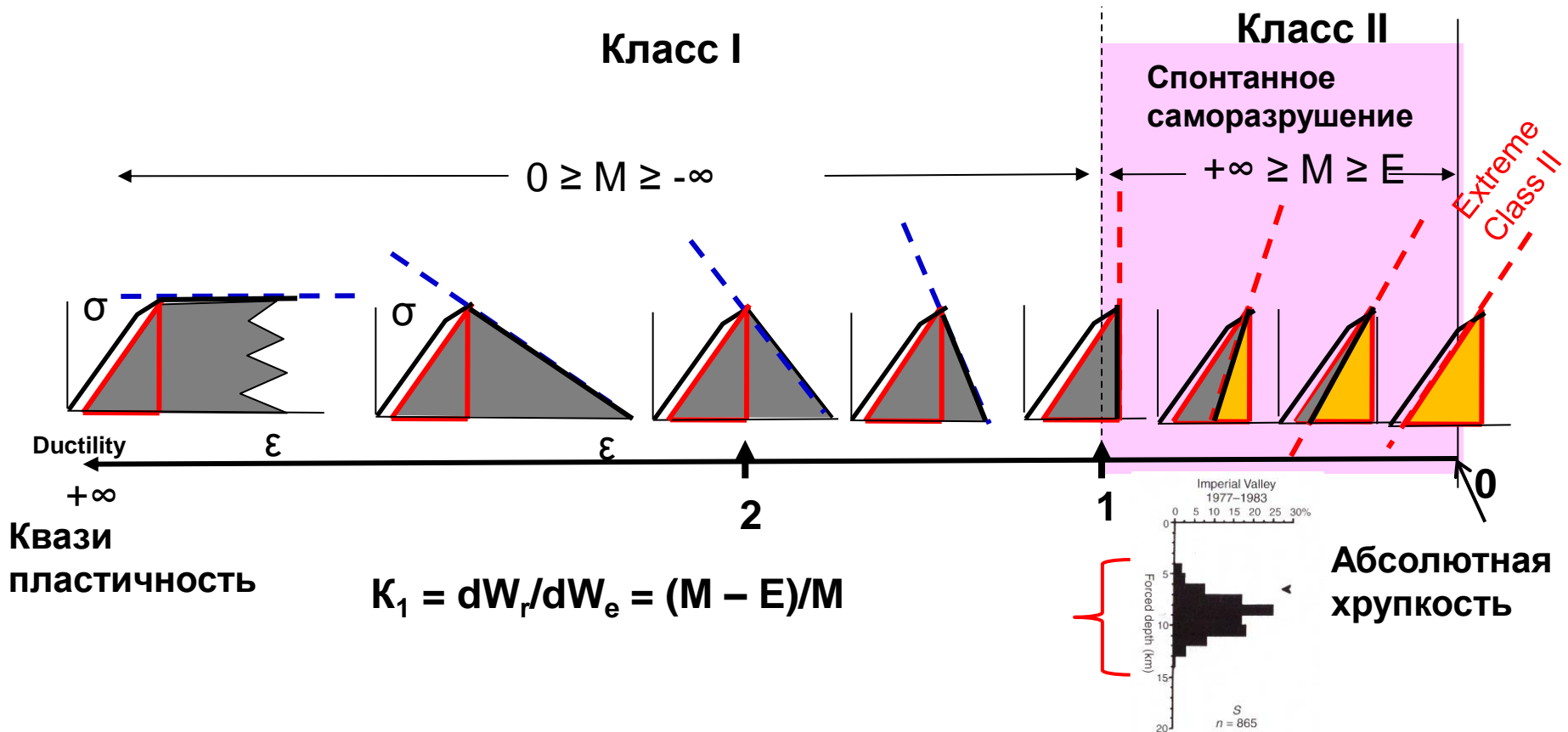
Сильно метаморфизованные и вулканические породы



Ультра-жесткая, серво-контролируемая, статическая-динамическая установка высоких давлений



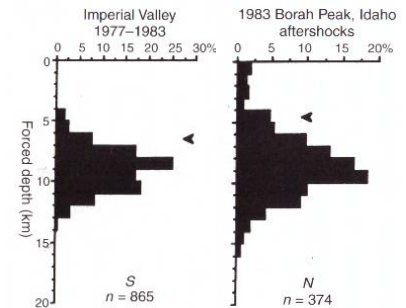
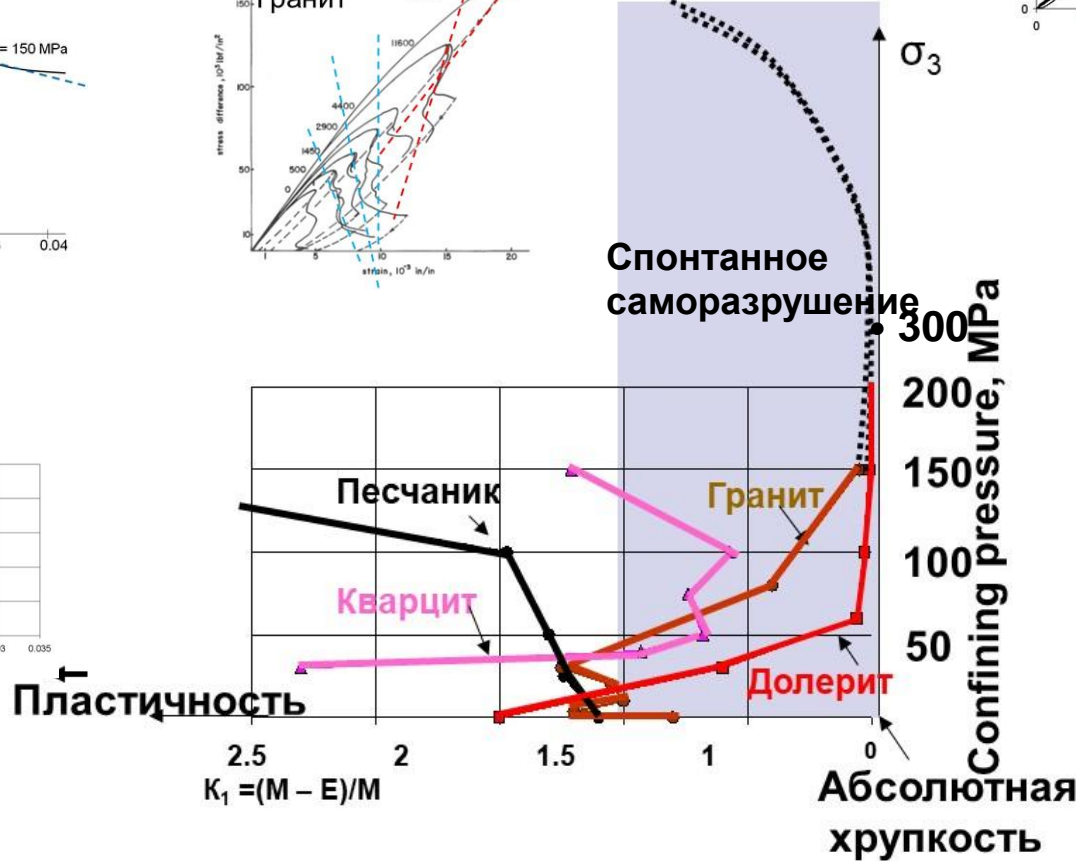
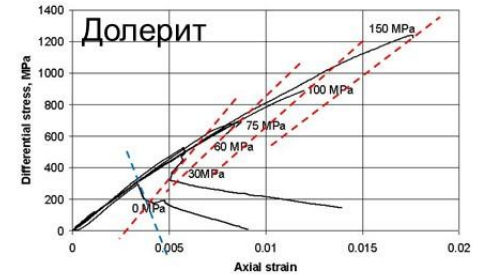
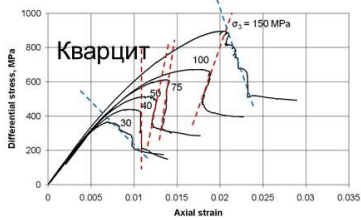
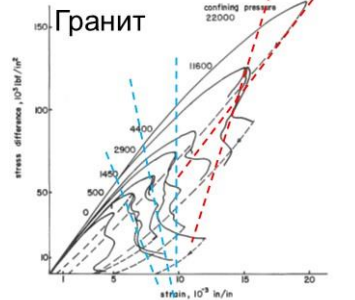
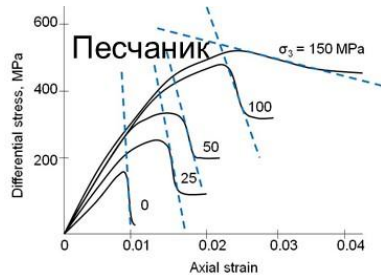
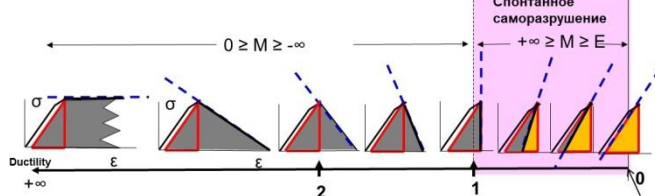
Универсальная шкала хрупкости



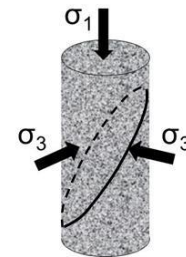
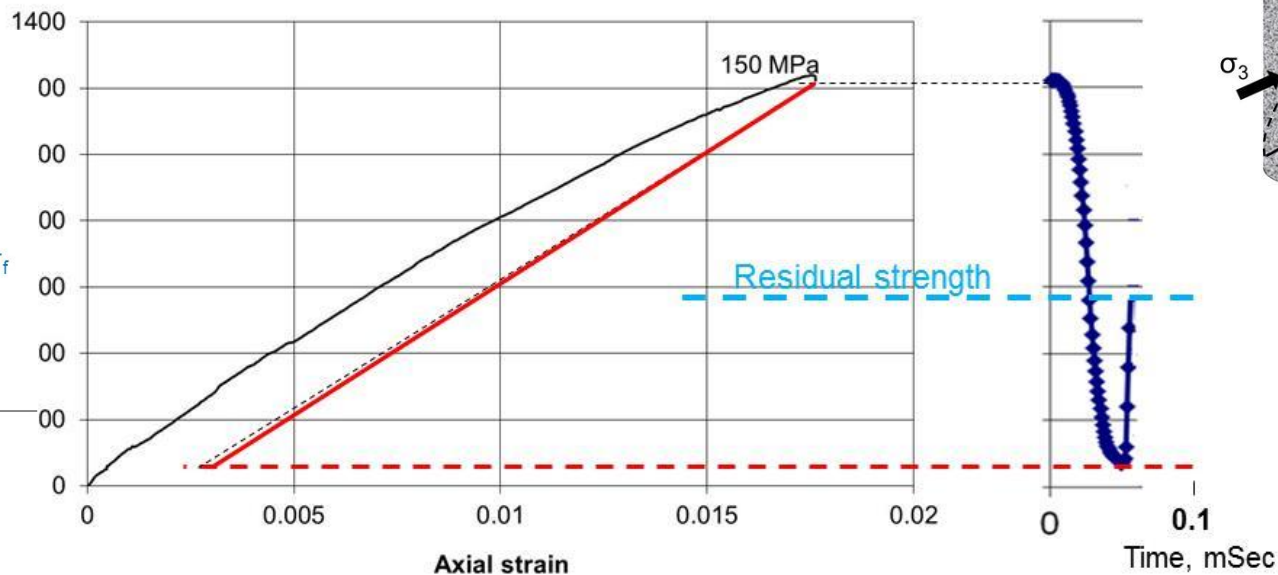
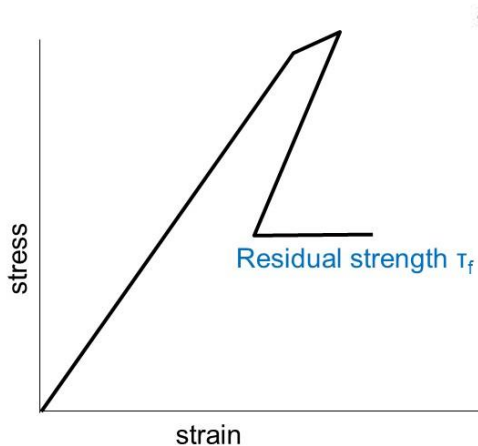
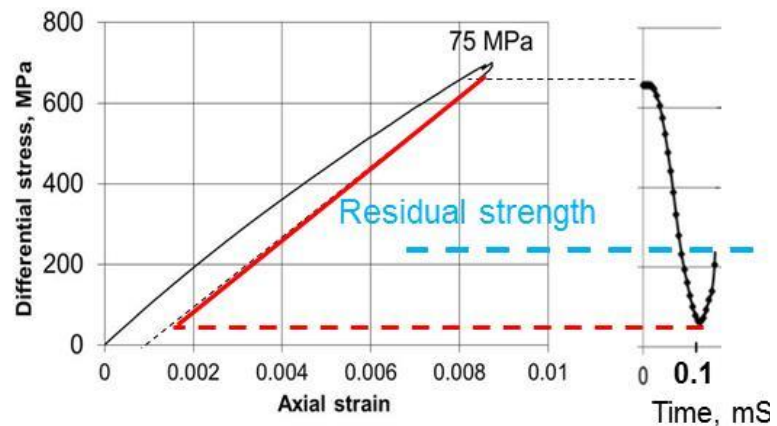
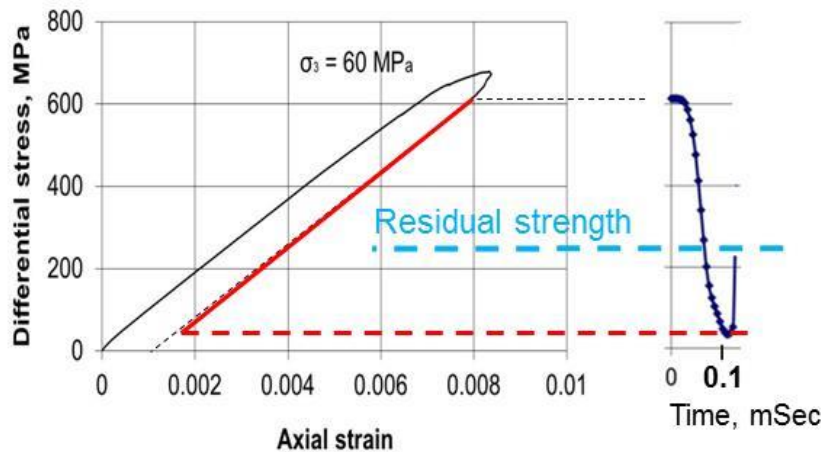
K_1 характеризует степень склонности пород к саморазрушению за счет упругой энергии, накопленной в материале до предела прочности.


Условие спонтанного саморазрушения при высоких σ_3

Шкала хрупкости
Класс I



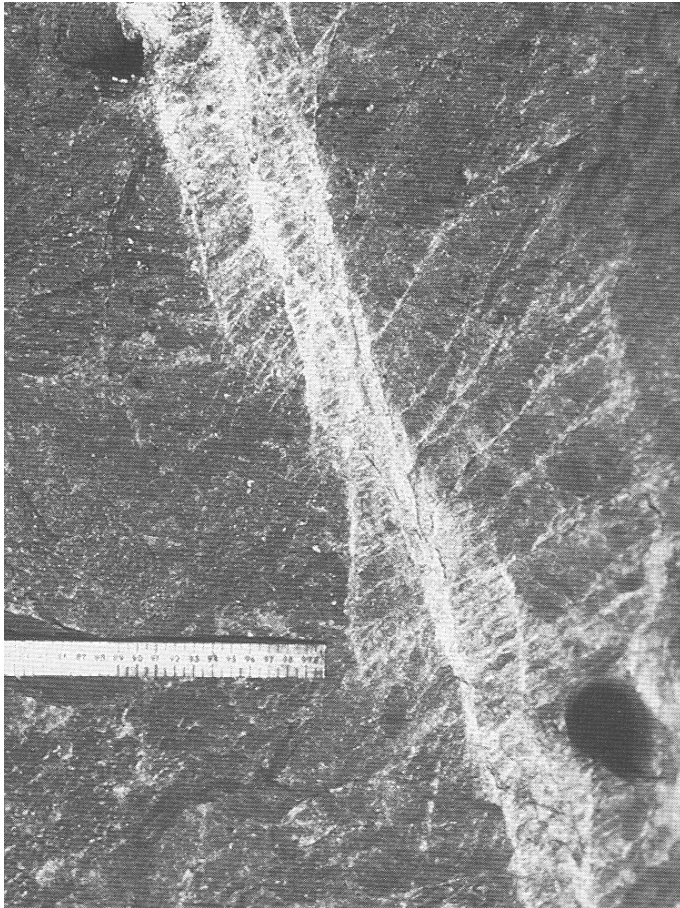
Прочность пород близкая к нулю во время спонтанного разрушения при высоких σ_3





Структура динамических трещин сдвига и веерный механизм разрушения

Типичная структура динамических трещин сдвига любого масштаба в прочных горных породах при высоких σ_3

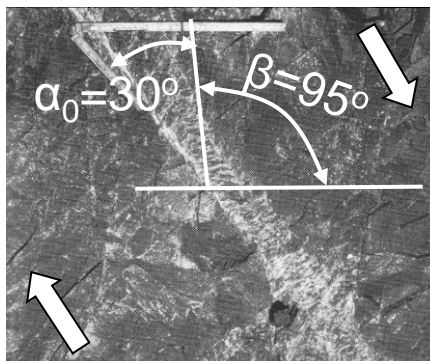
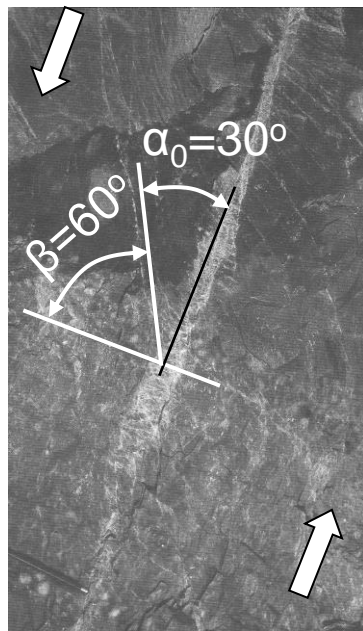
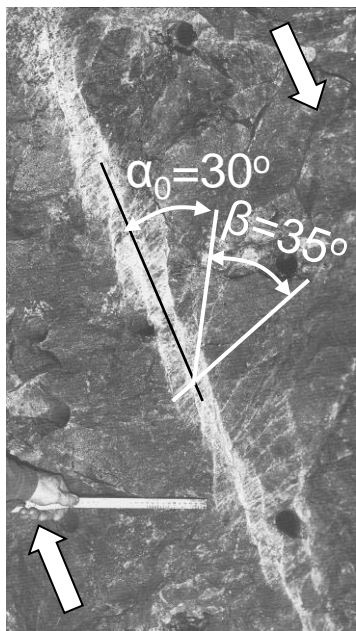


Южная Африка

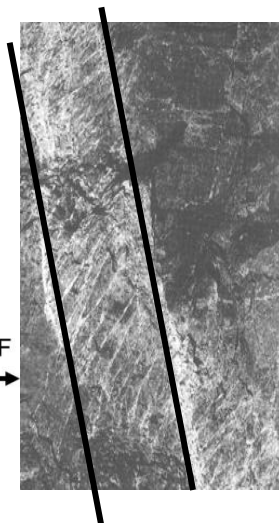
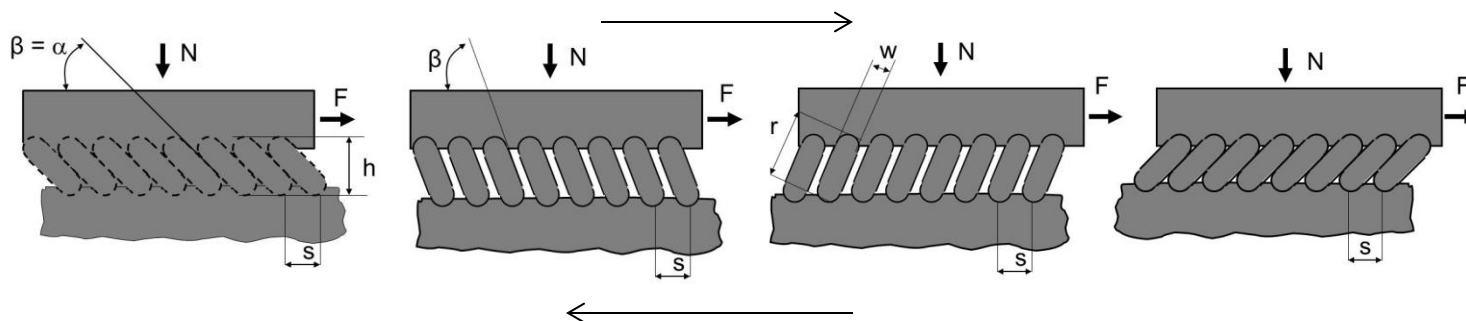
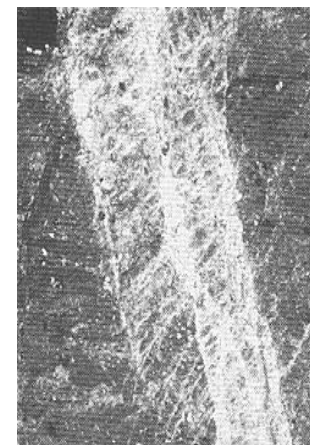


Сан Андреас

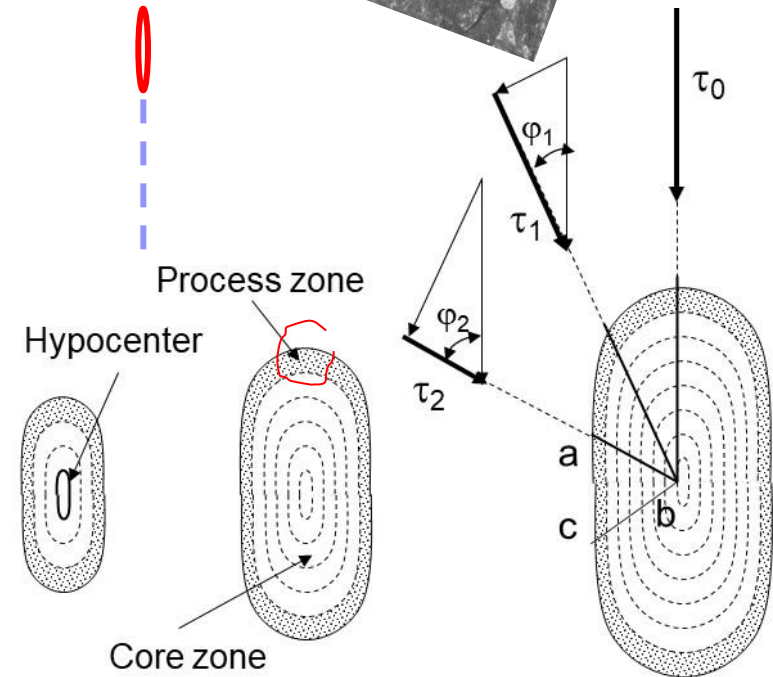
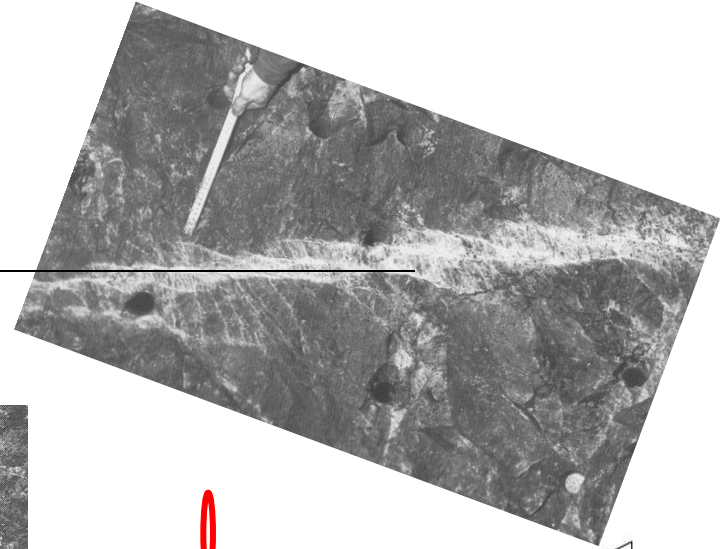
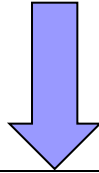
Разворот структурных пластин при сдвиге вдоль трещины



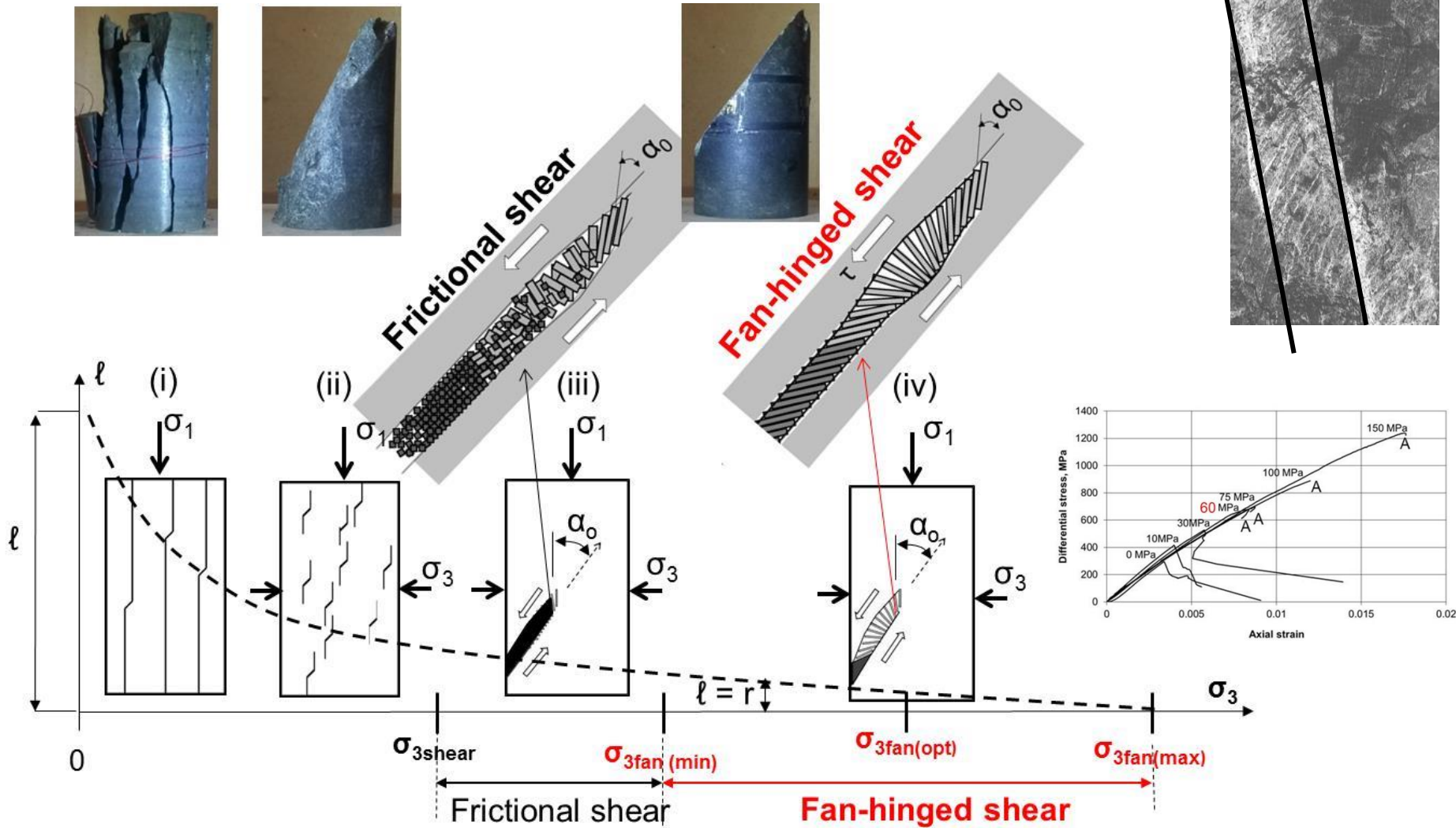
Modified from Ortlepp, 1997



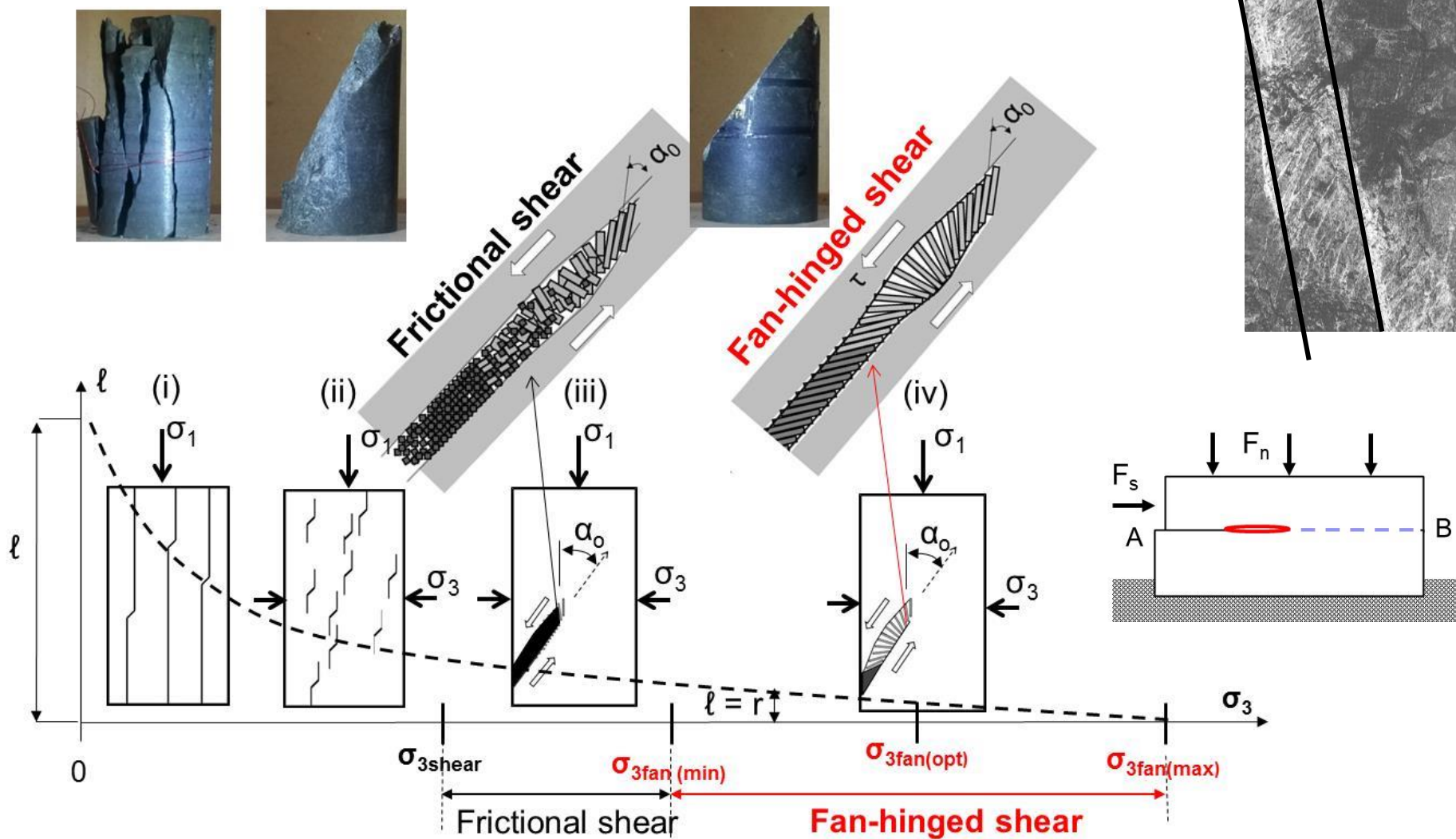
Развитие трещины сдвига в плане



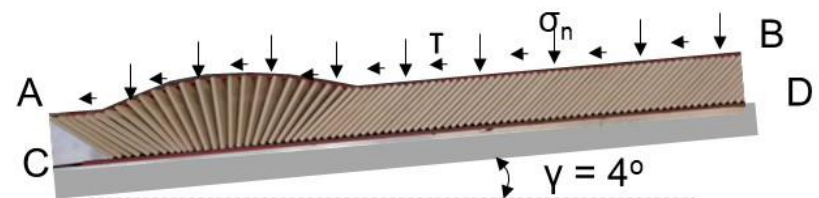
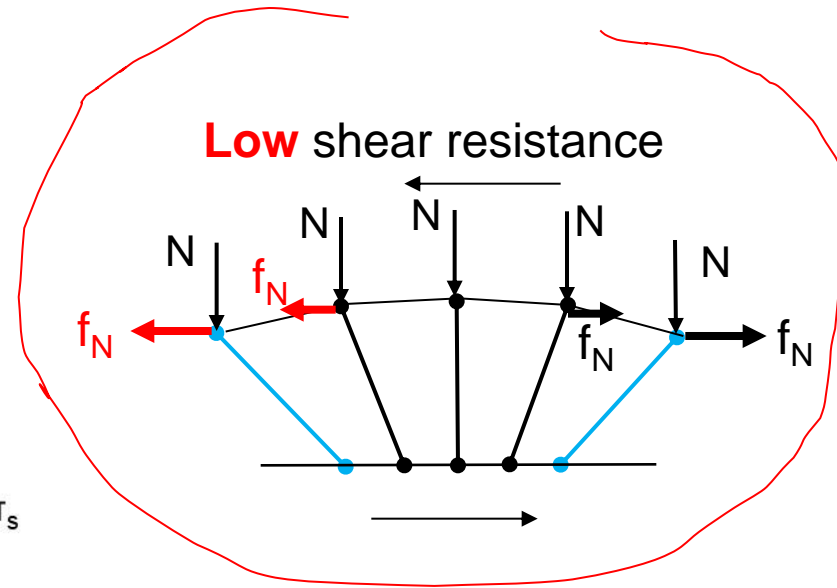
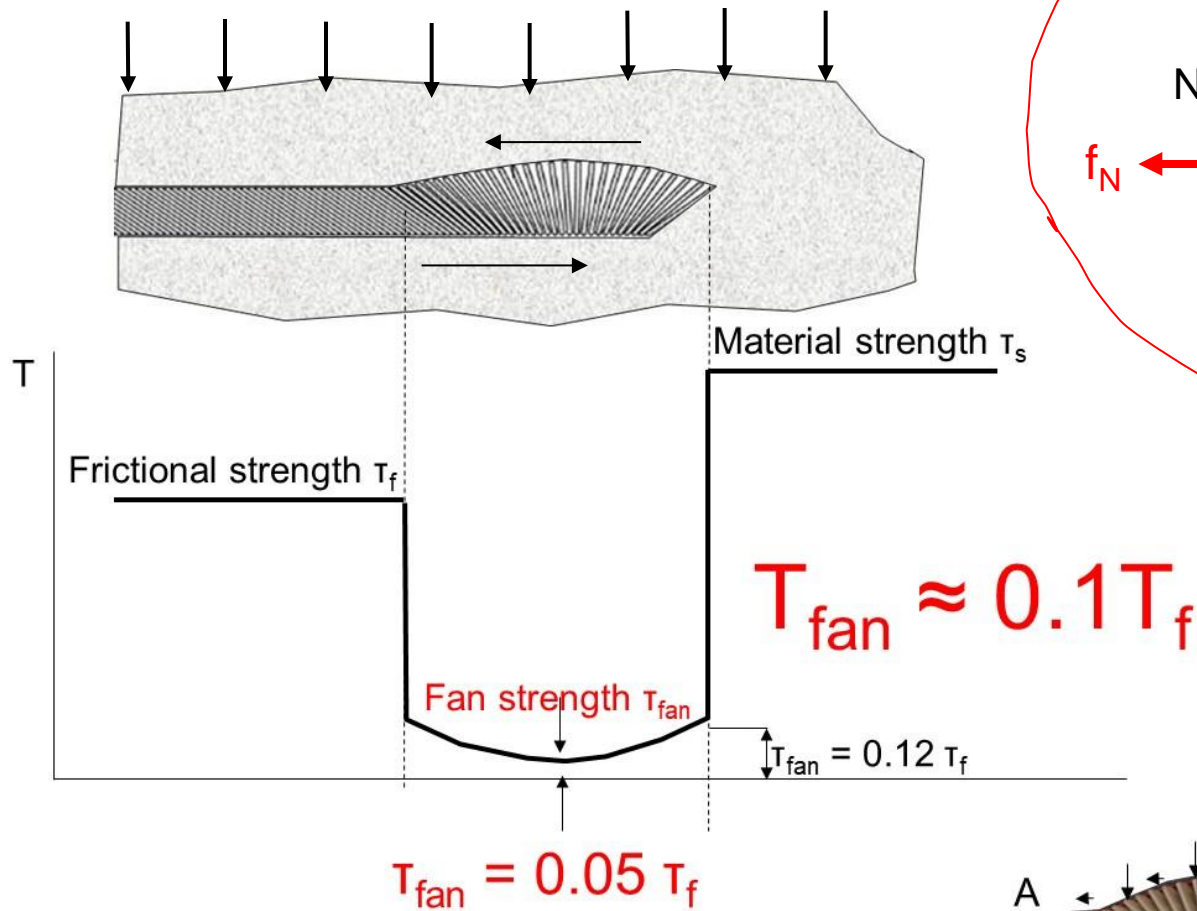
Вариация механизмов разрушения прочных пород с ростом бокового давления σ_3 . Веерная структура головы сдвиговой трещины при высоких σ_3 .



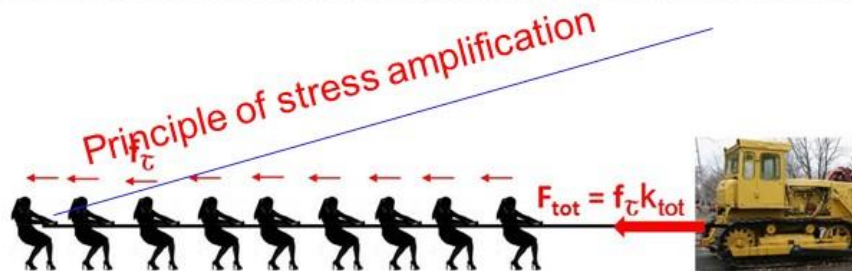
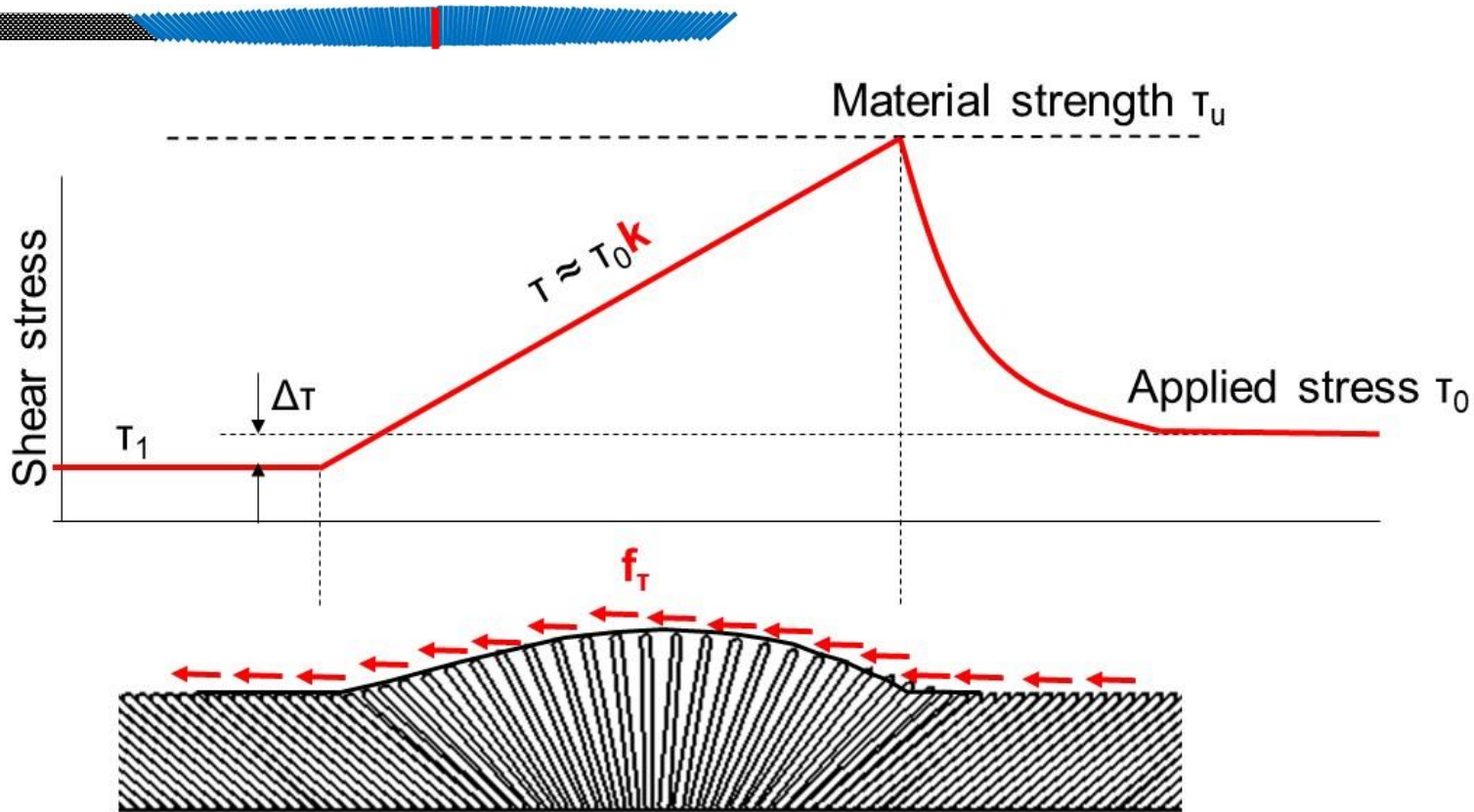
Вариация механизмов разрушения прочных пород с ростом бокового давления σ_3 . Веерная структура головы сдвиговой трещины при высоких σ_3 .



Соппротивление сдвигу веерной структуры близко к нулю

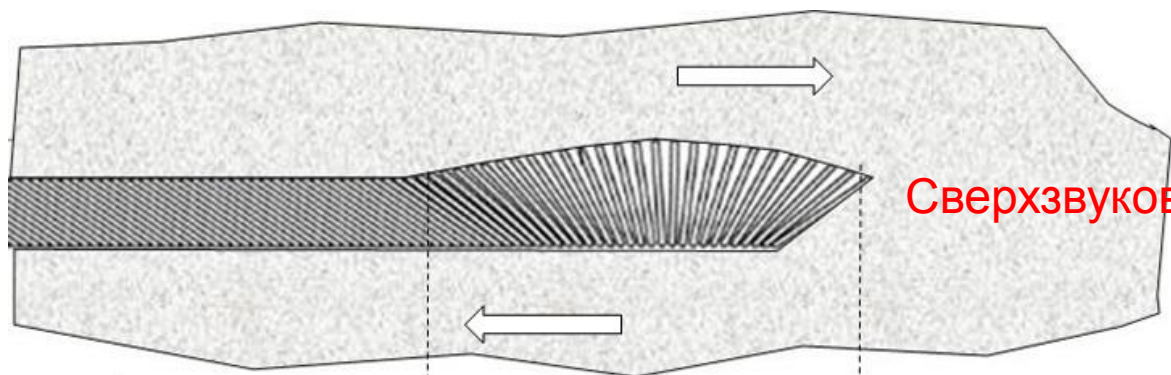


Веерная структура как мощный усилитель сдвиговых напряжений

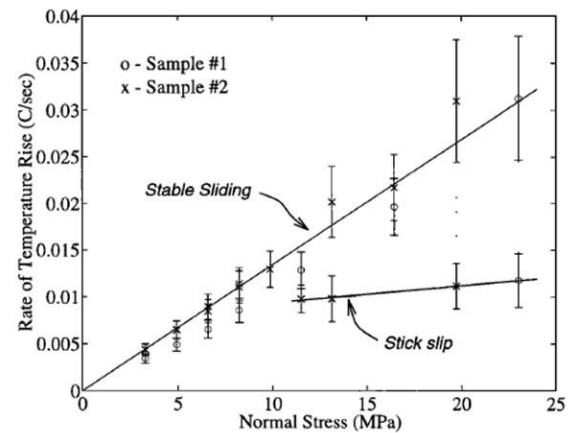
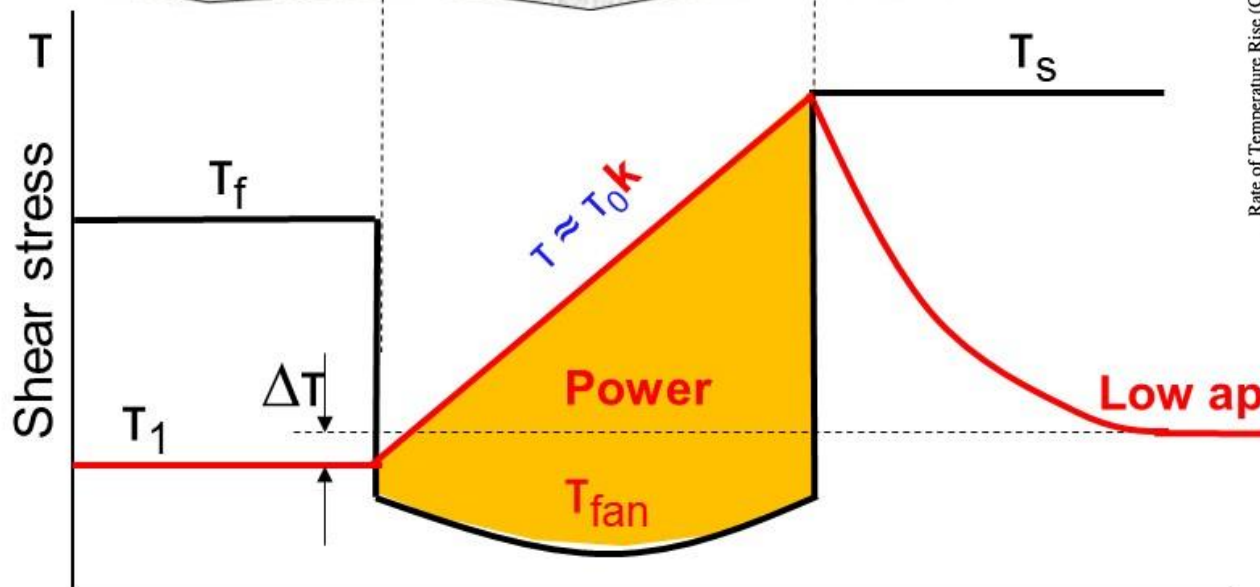


Условие само-дисбаланса в зоне веера и причина температурного парадокса

Скорость сдвига в голове трещин до **10 m/s**



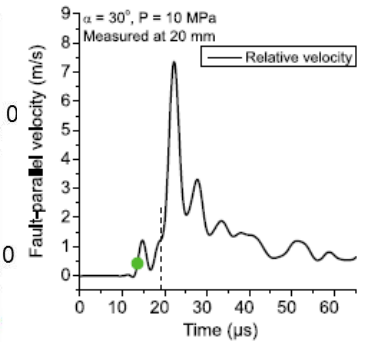
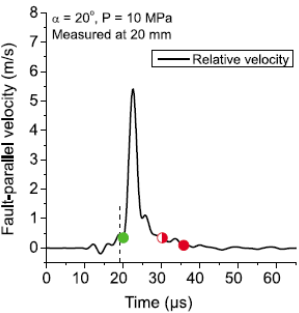
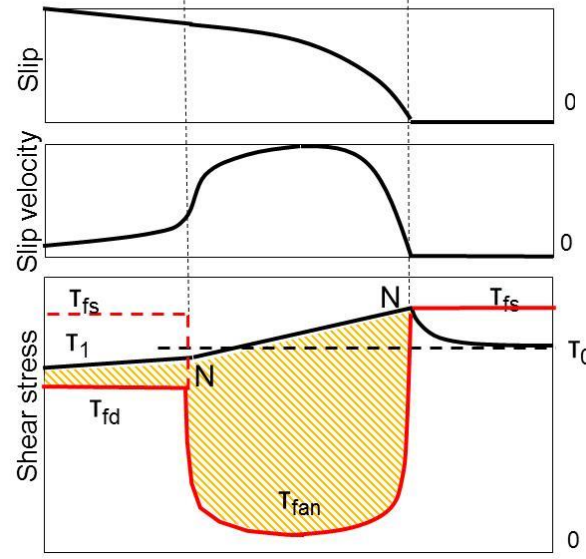
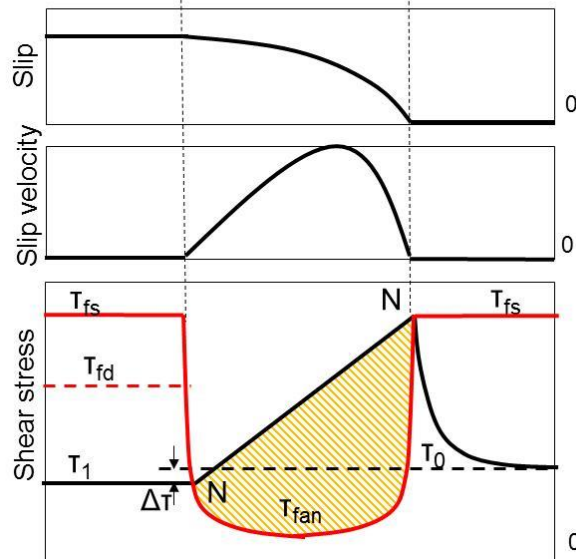
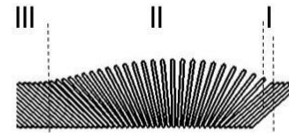
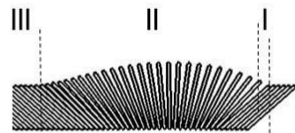
Сверхзвуковая скорость трещин до **9 km/s**



Pulse-like and crack-like rupture modes

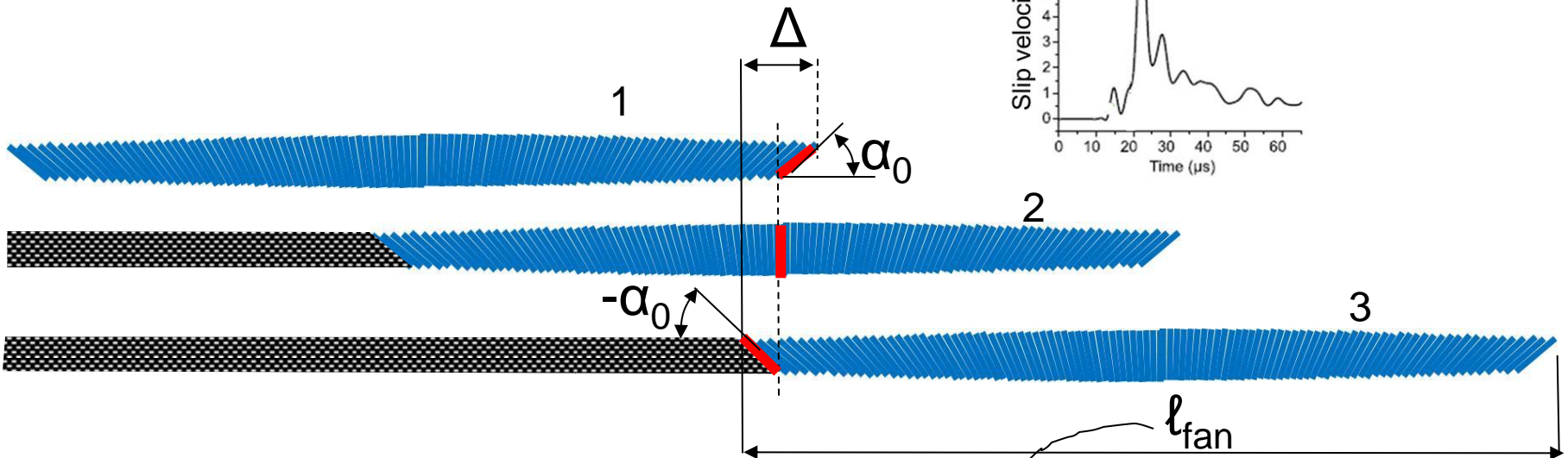
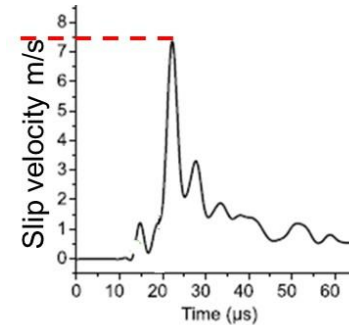
a) Pulse-like mode

b) Crack-like mode



Объяснение сверхзвуковых скоростей

$\Delta/t = Q$ – slip velocity



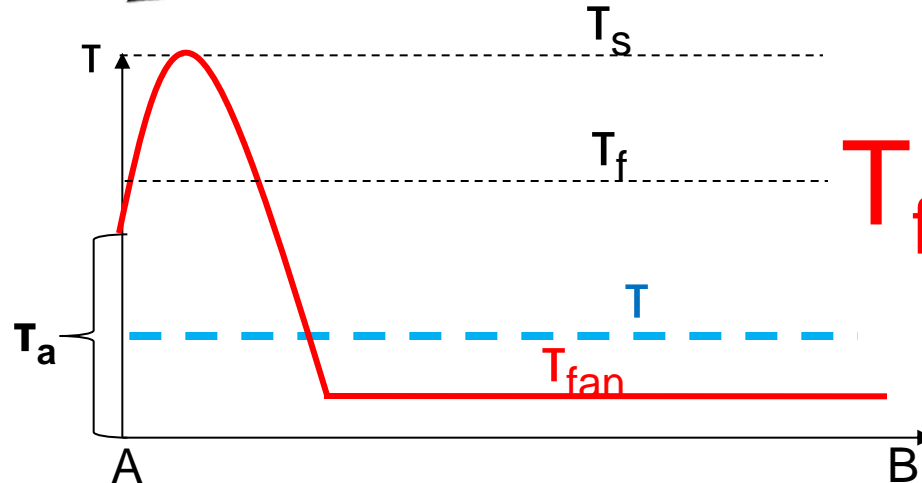
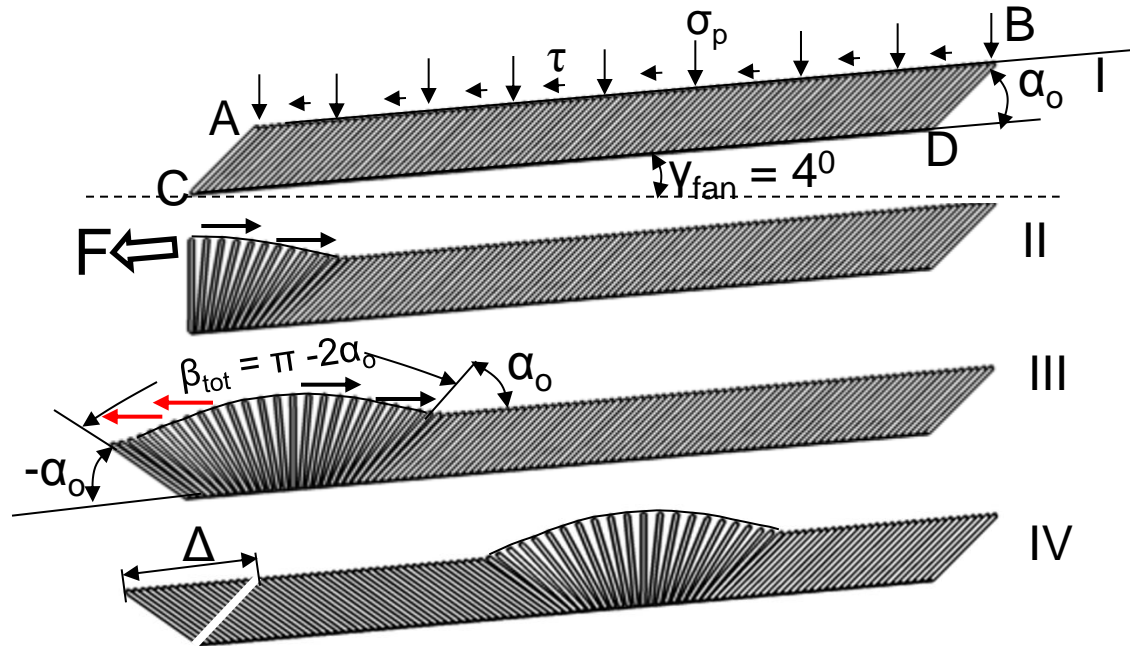
$$V/Q = \ell_{fan}/\Delta$$

$\ell_{fan}/t = V$ – rupture velocity

For supershear ruptures $\ell_{fan}/\Delta \approx 1000$

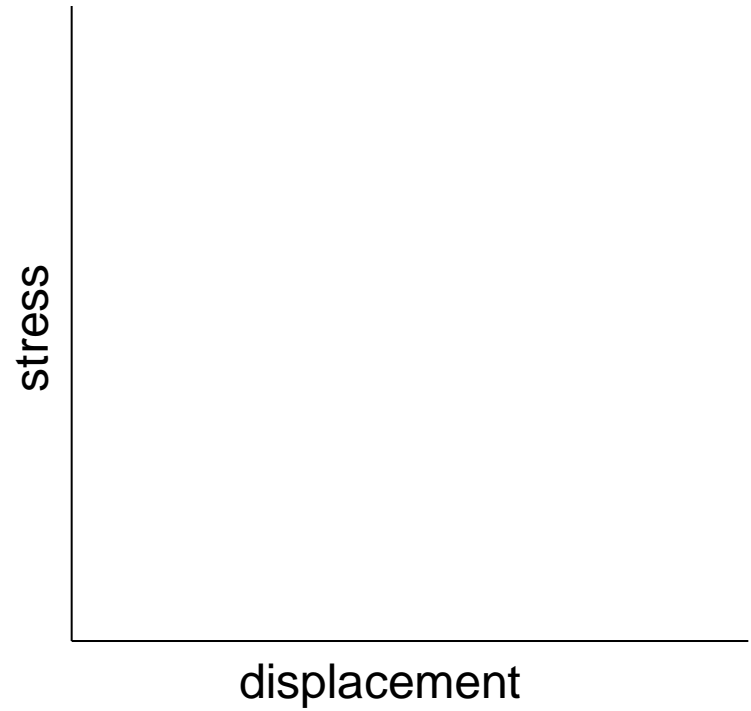
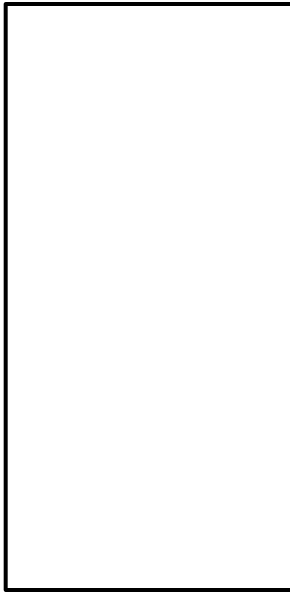
for $Q = 7 \text{ m/s}$ \longrightarrow $V = 7 \text{ km/s}$

Формирование начального веера

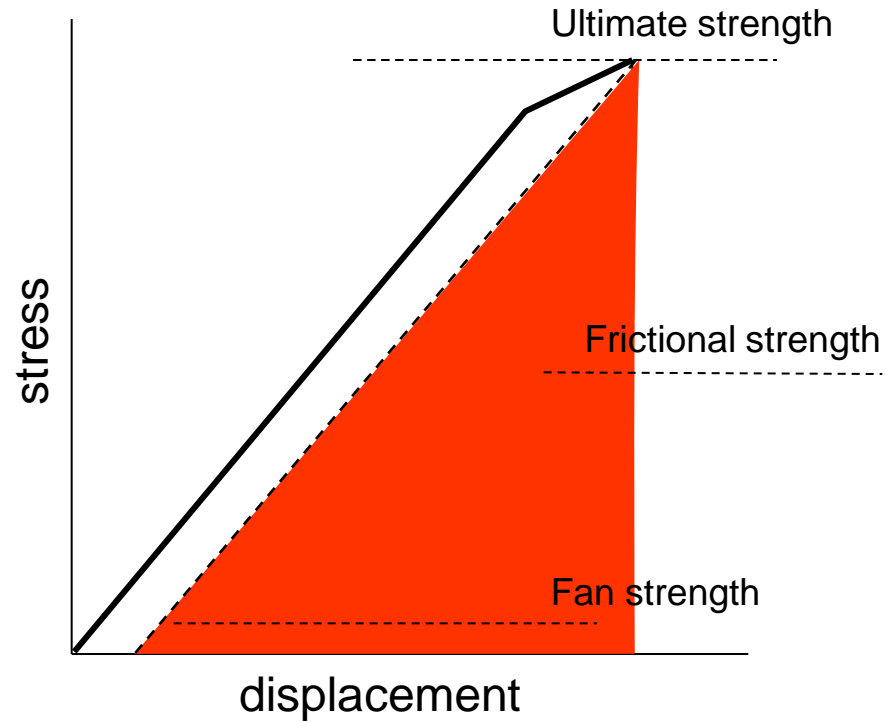
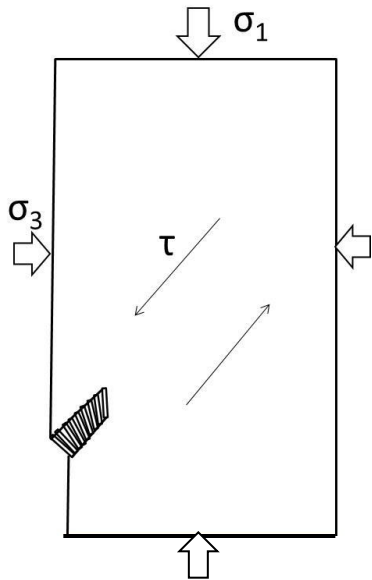


$$T_{fan} \approx 0.1 T_f$$

Class III rock behaviour

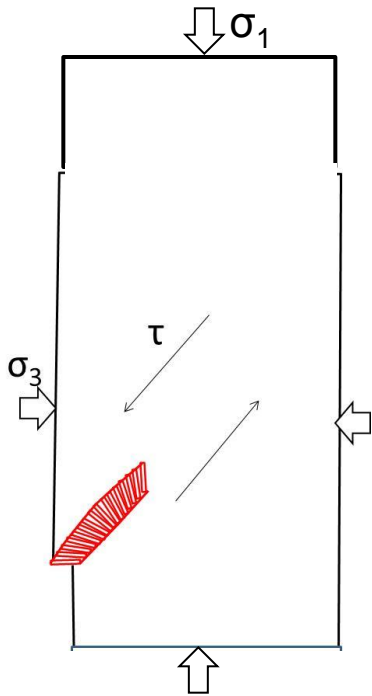


Class III rock behaviour

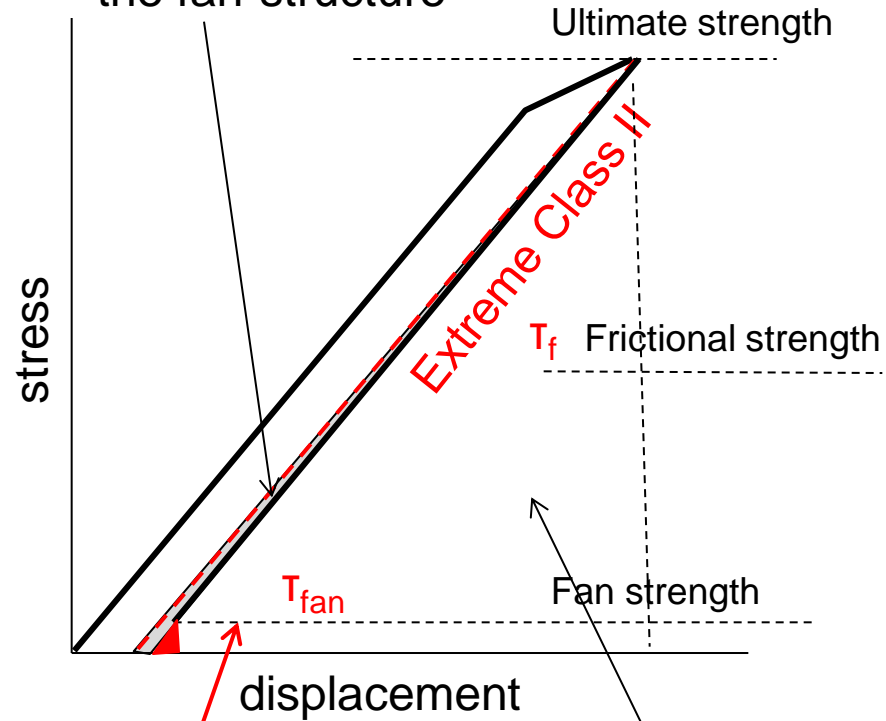


At the peak stress the first half of the fan has completed

Class III rock behaviour



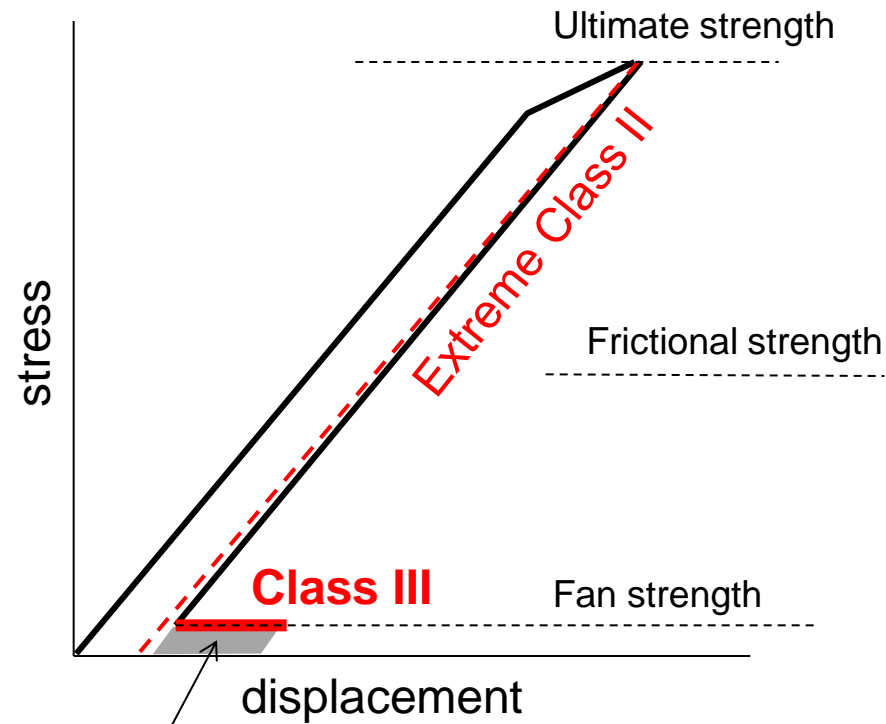
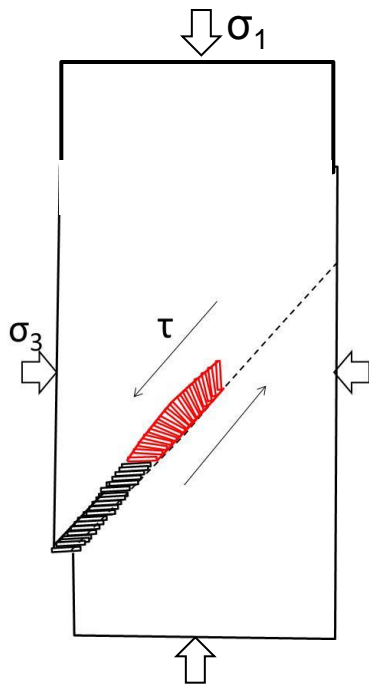
Post-peak curve associated with formation of the second half of the fan-structure



After completion of the fan-structure the rock strength is determined by the fan shear resistance $T_{fan} = 0.1 T_f$

Class III rock behaviour

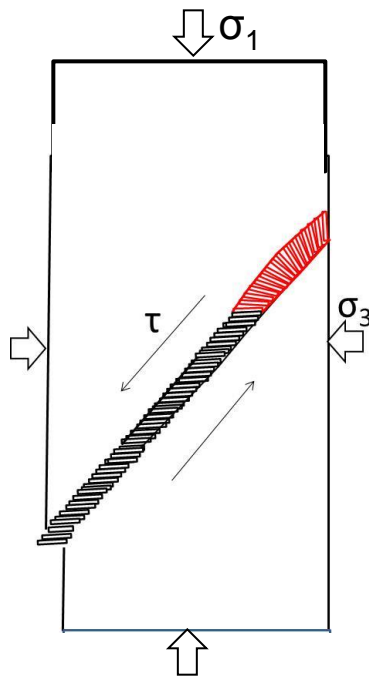
A post-peak stage characterised by constant and 'abnormally' low shear strength we classify as **Class III**.



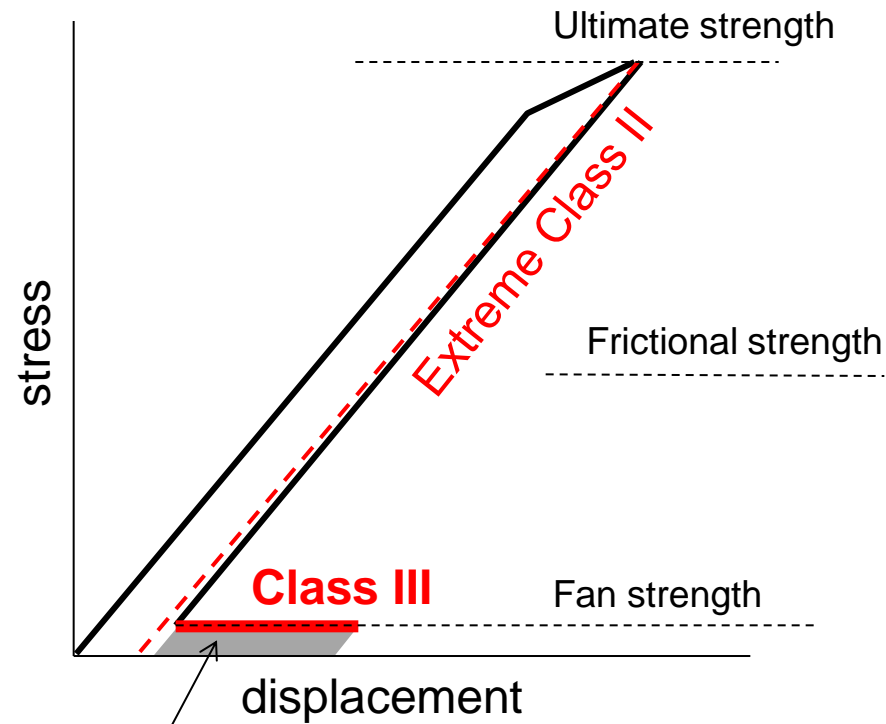
Class III behaviour is the rupture growth in intact hard rock caused by shear stress below the frictional strength.

Class III rock behaviour

A post-peak stage characterised by constant and 'abnormally' low shear strength we classify as **Class III**.



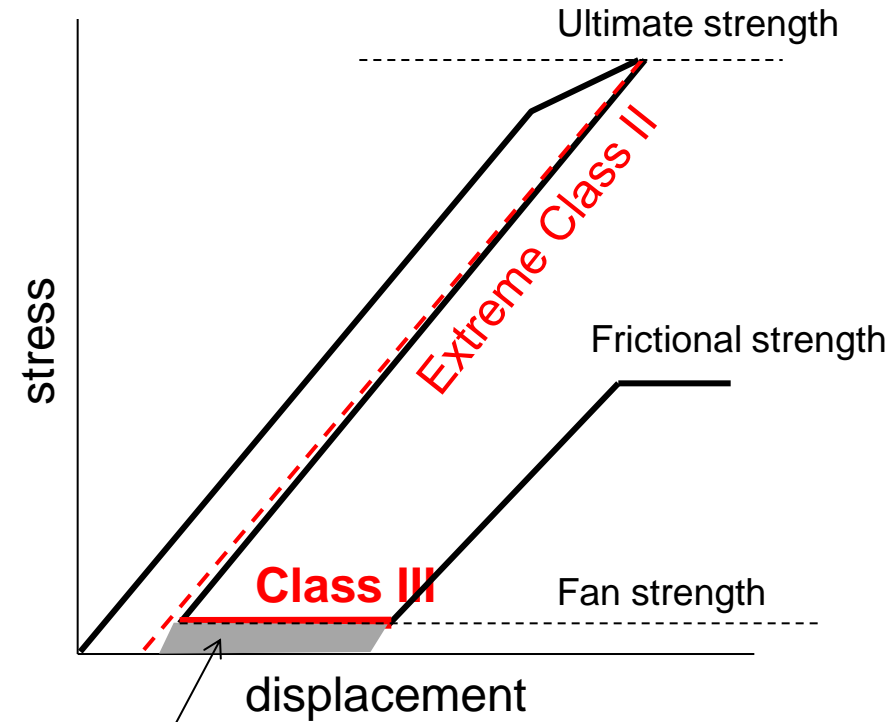
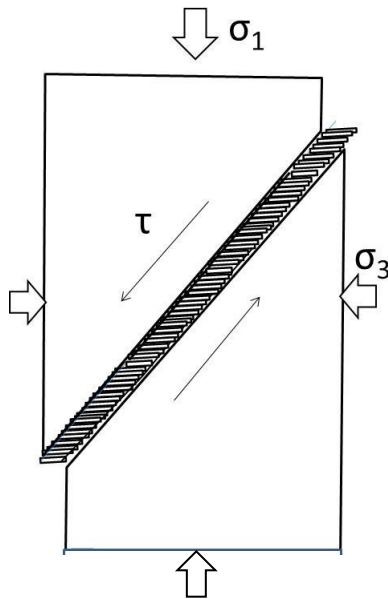
Class III behaviour is the rupture growth in intact hard rock caused by shear stress below the frictional strength.



Rupture energy W_r
for Class III

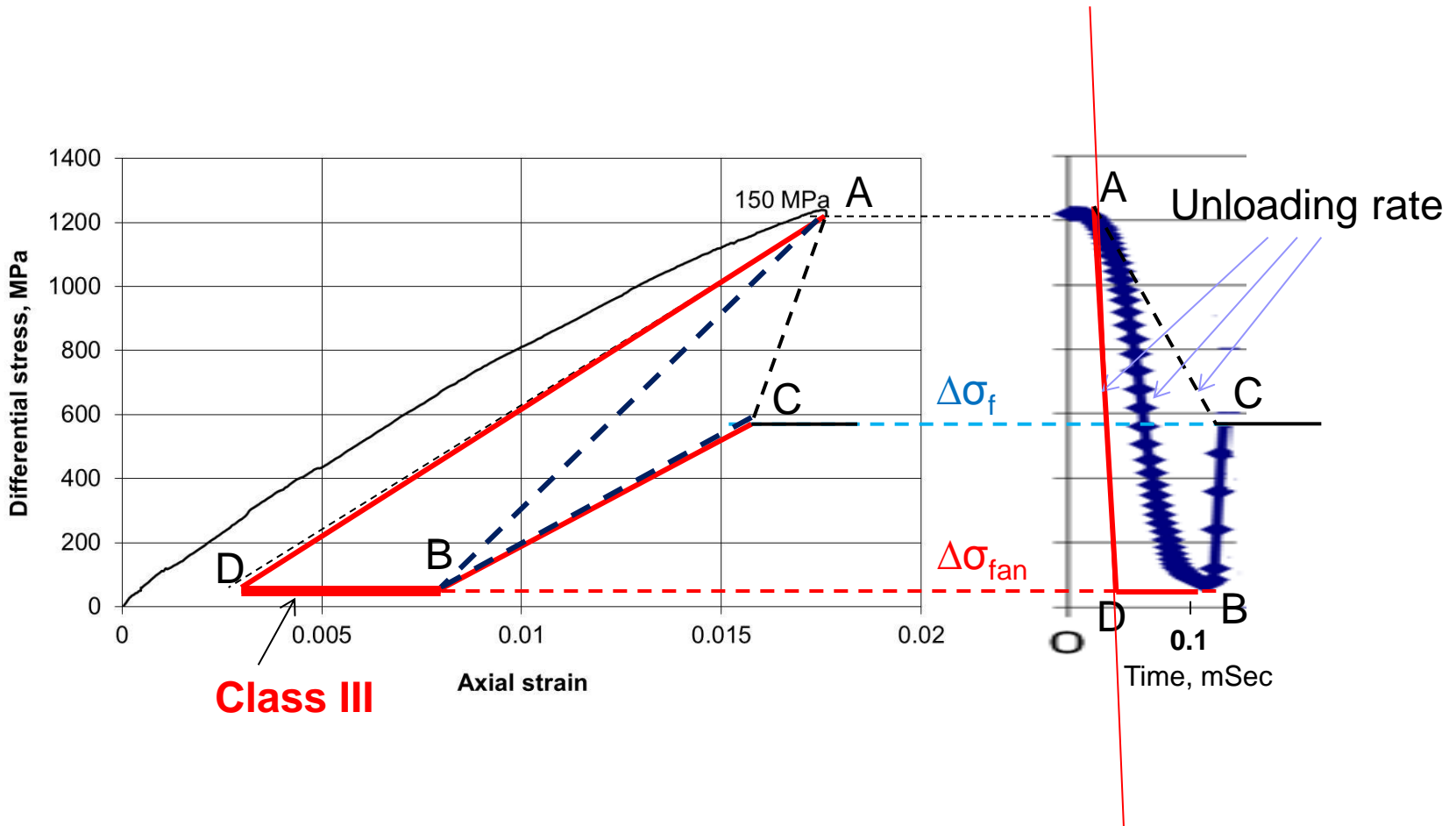
Class III rock behaviour


When the fan-structure has crossed the specimen its strength is determined by the frictional (residual) strength



Class III behaviour is the rupture growth in intact hard rock caused by shear stress below the frictional strength.

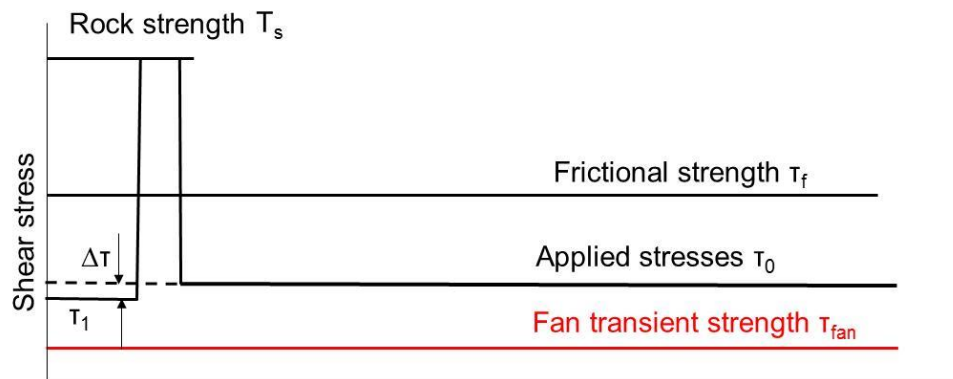
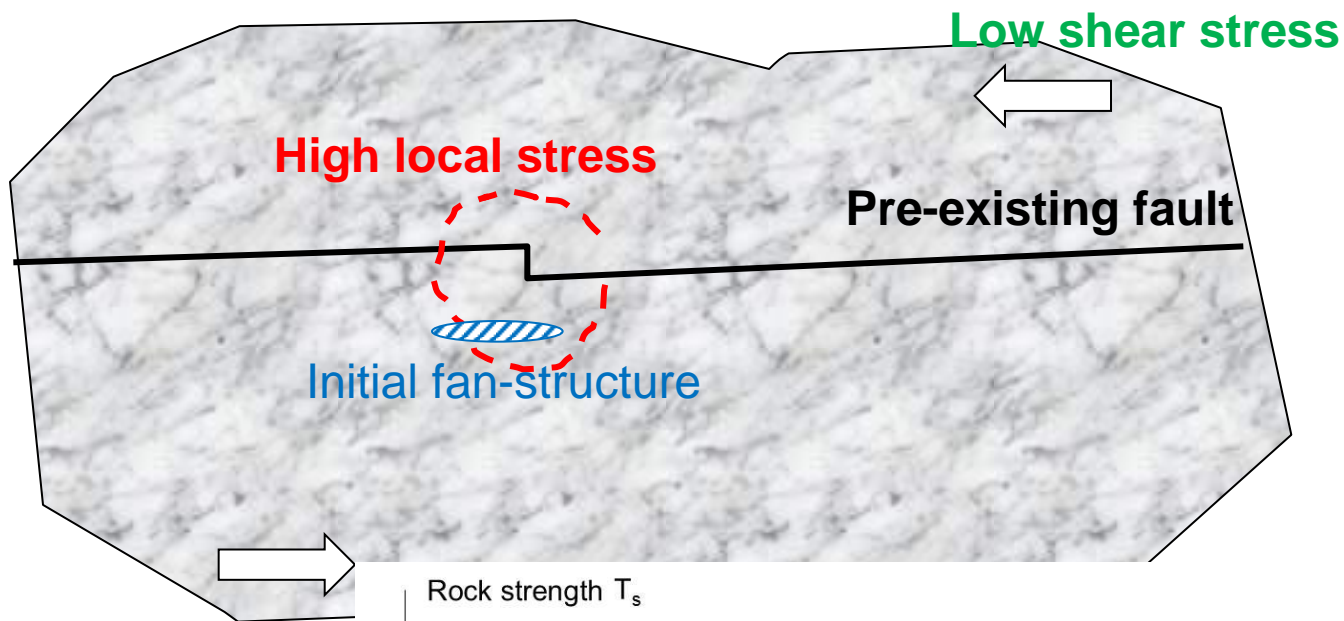
Key factor of new testing machines for study Class III rocks





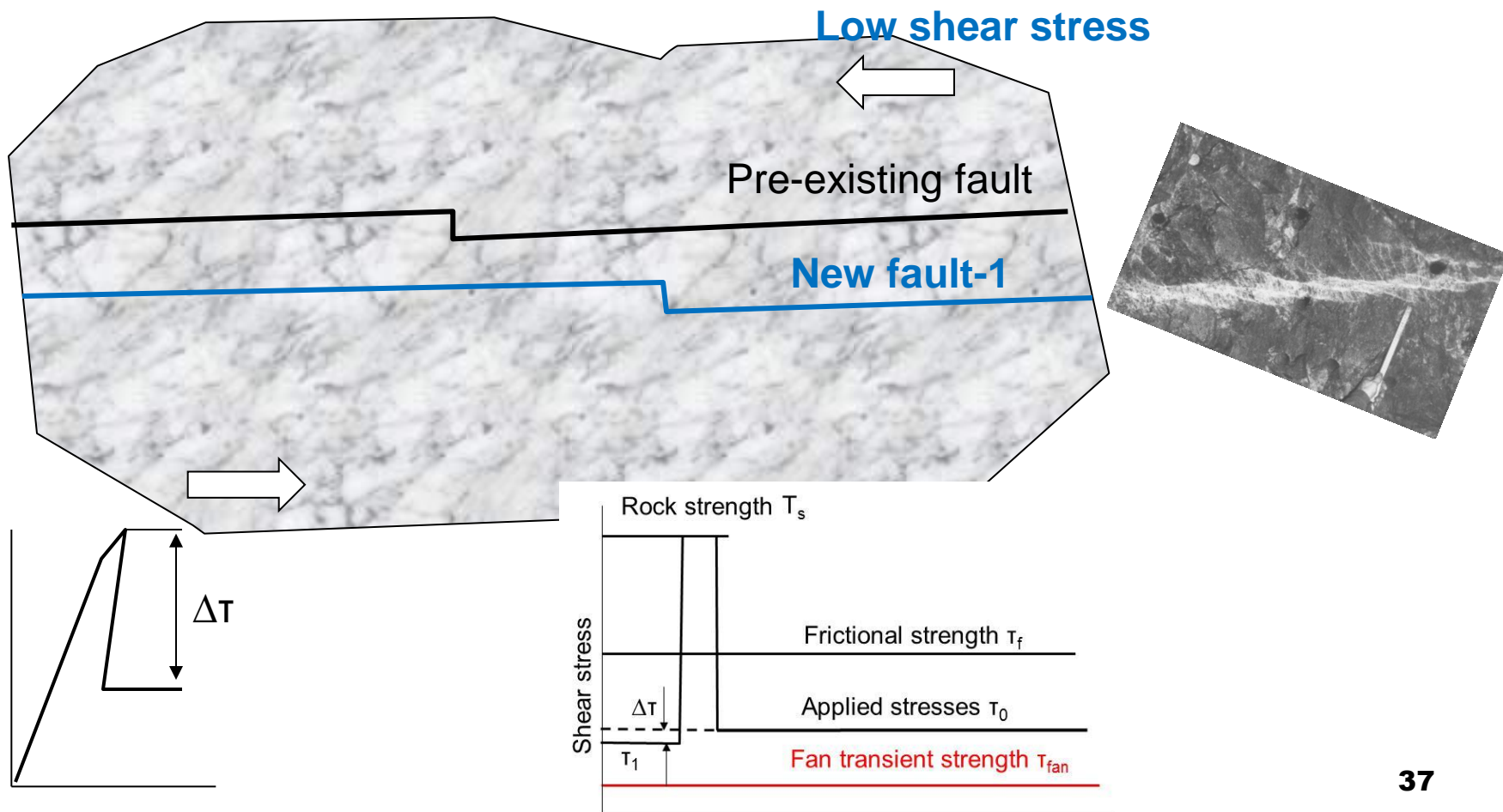
Развитие динамических трещин сдвига в цельных породах как основной механизм землетрясений

Развитие новых трещин сдвига вблизи существующих разломов (веер как триггер динамических явлений)



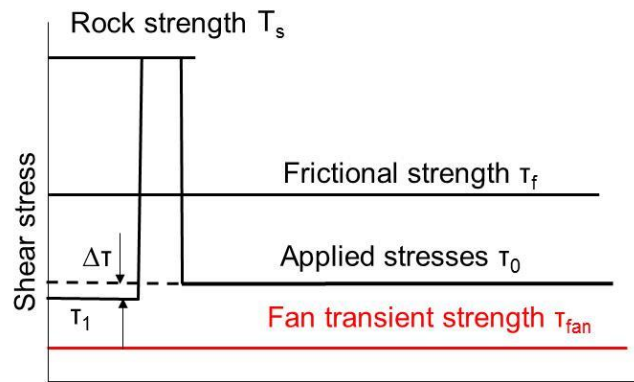
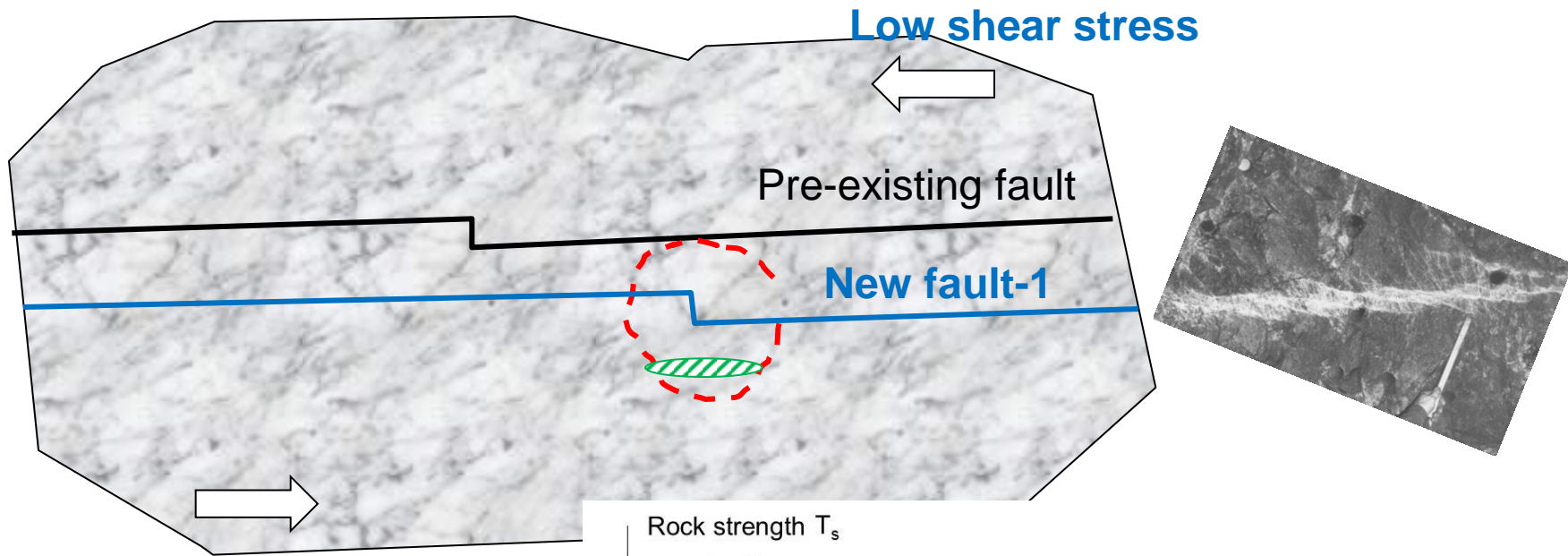
Три парадокса

- 1) Цельная порода разрушается при напряжении ниже остаточной прочности.
- 2) Разрушение цельной породы сопровождается малым стресс-дропом.
- 3) Образование новых разломов является предпочтительным в сравнении со сдвигом по существующему разлому.



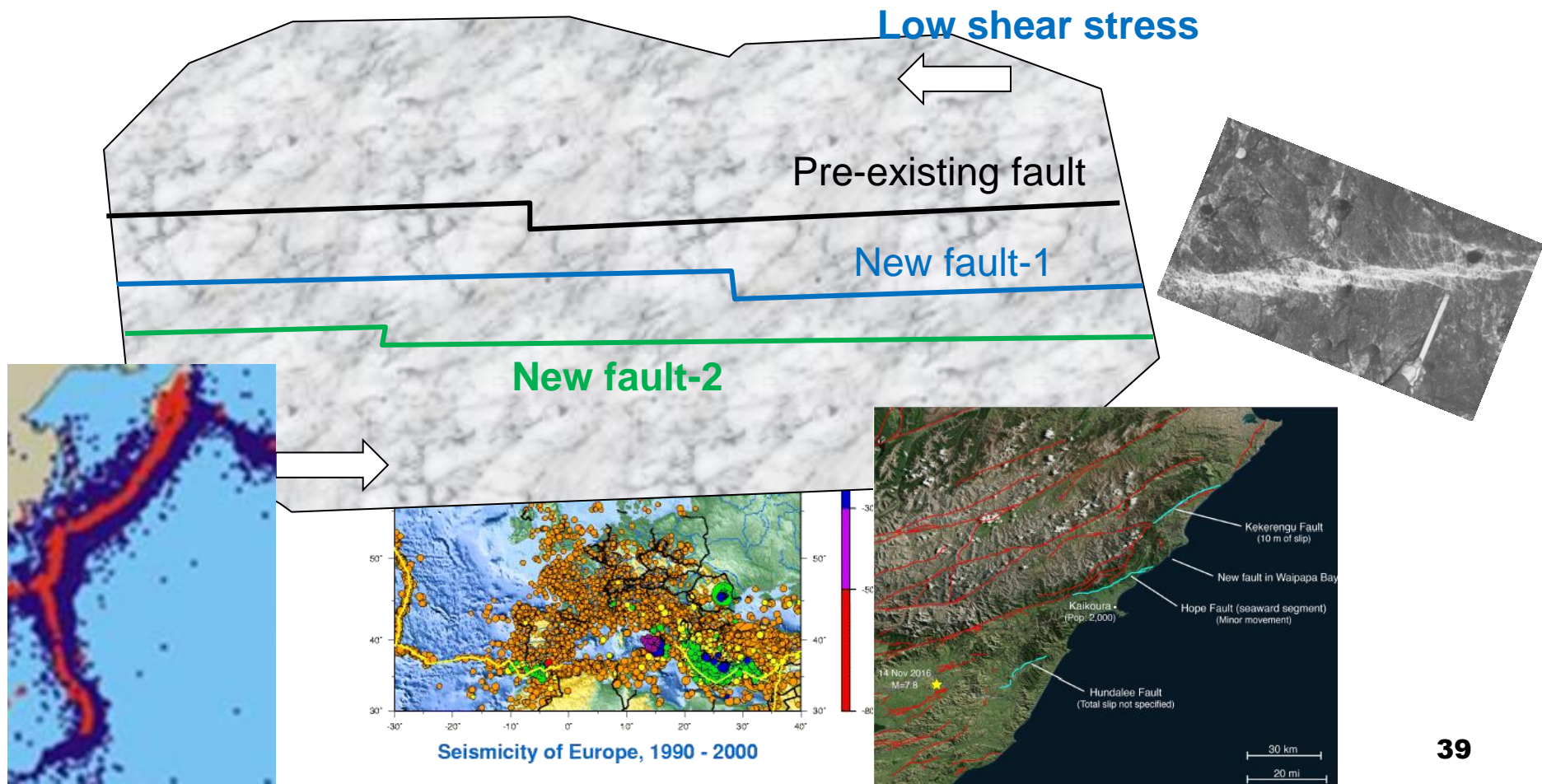
Aftershock effect

Each new fault represents a new local stress concentrator for initiation of the next fault in the intact rock mass.

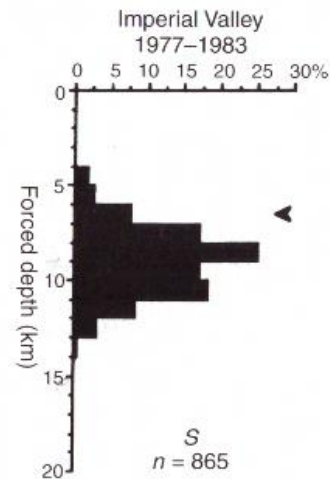


Expansion of earthquake zones

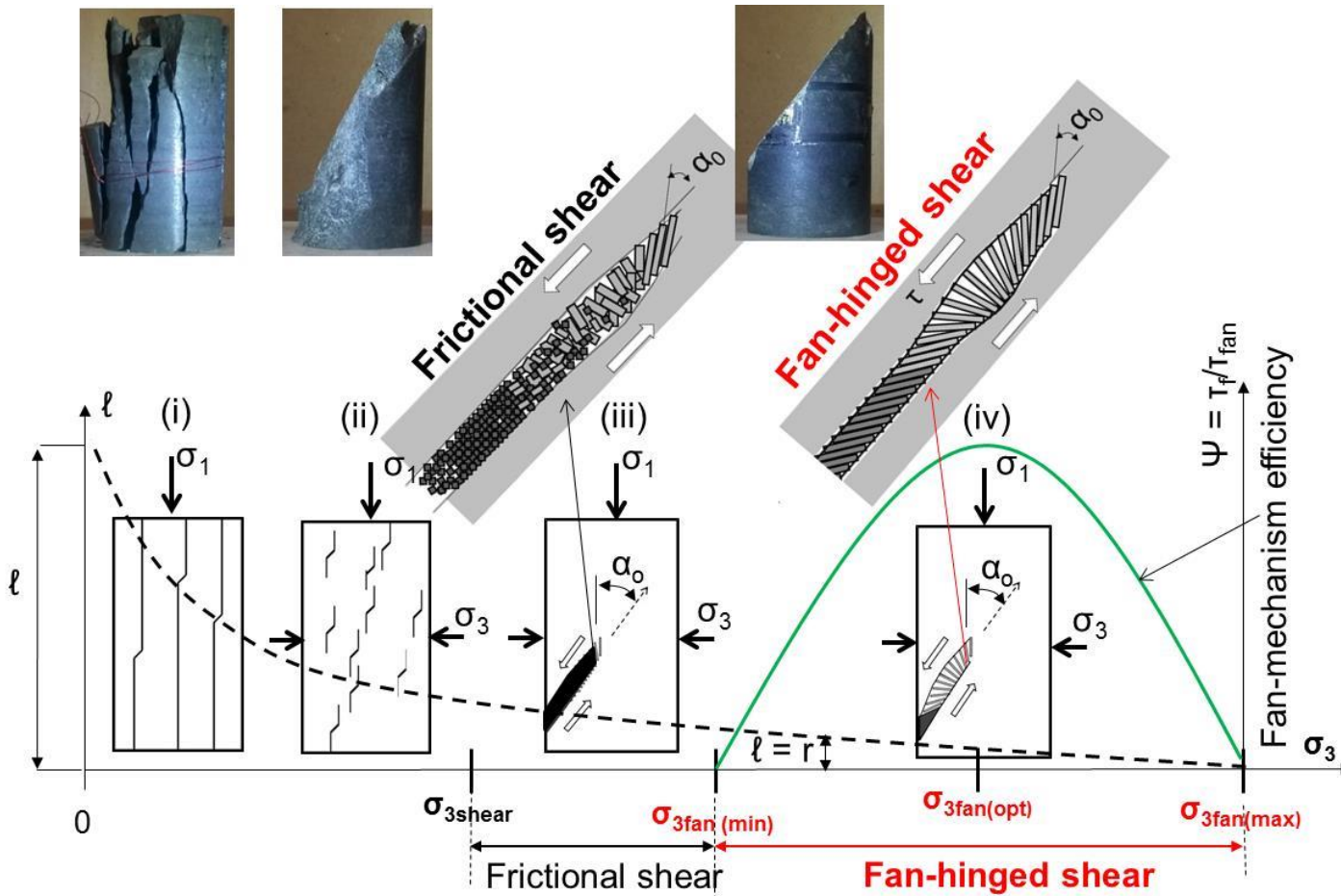
The fan-mechanism is responsible for the fact that the rock mass adjoining the main fault is riddled with faults.



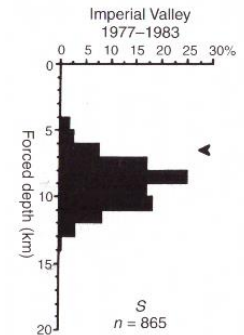
Depth distribution of earthquake frequency



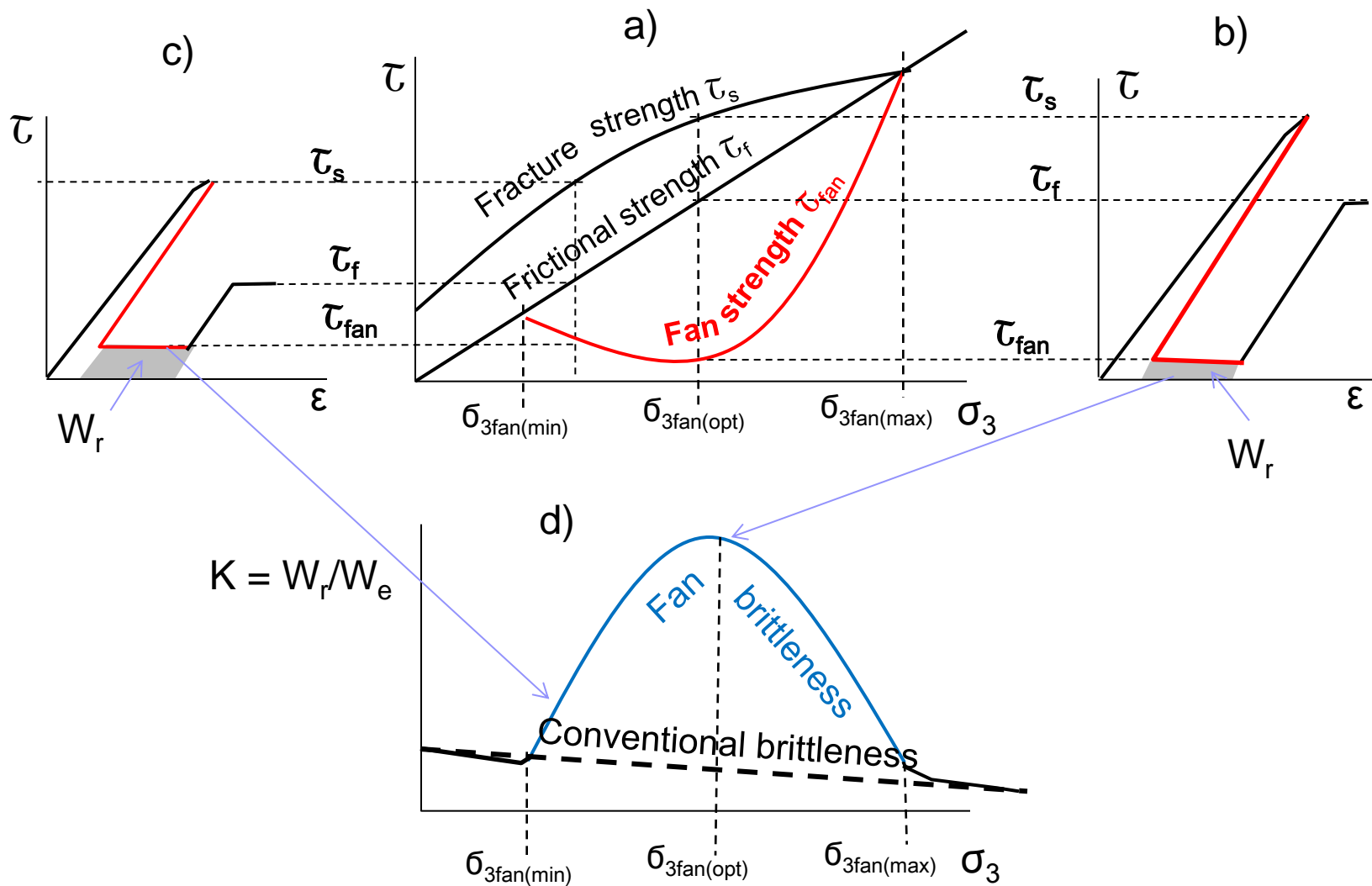
Переменная активность веерного механизма



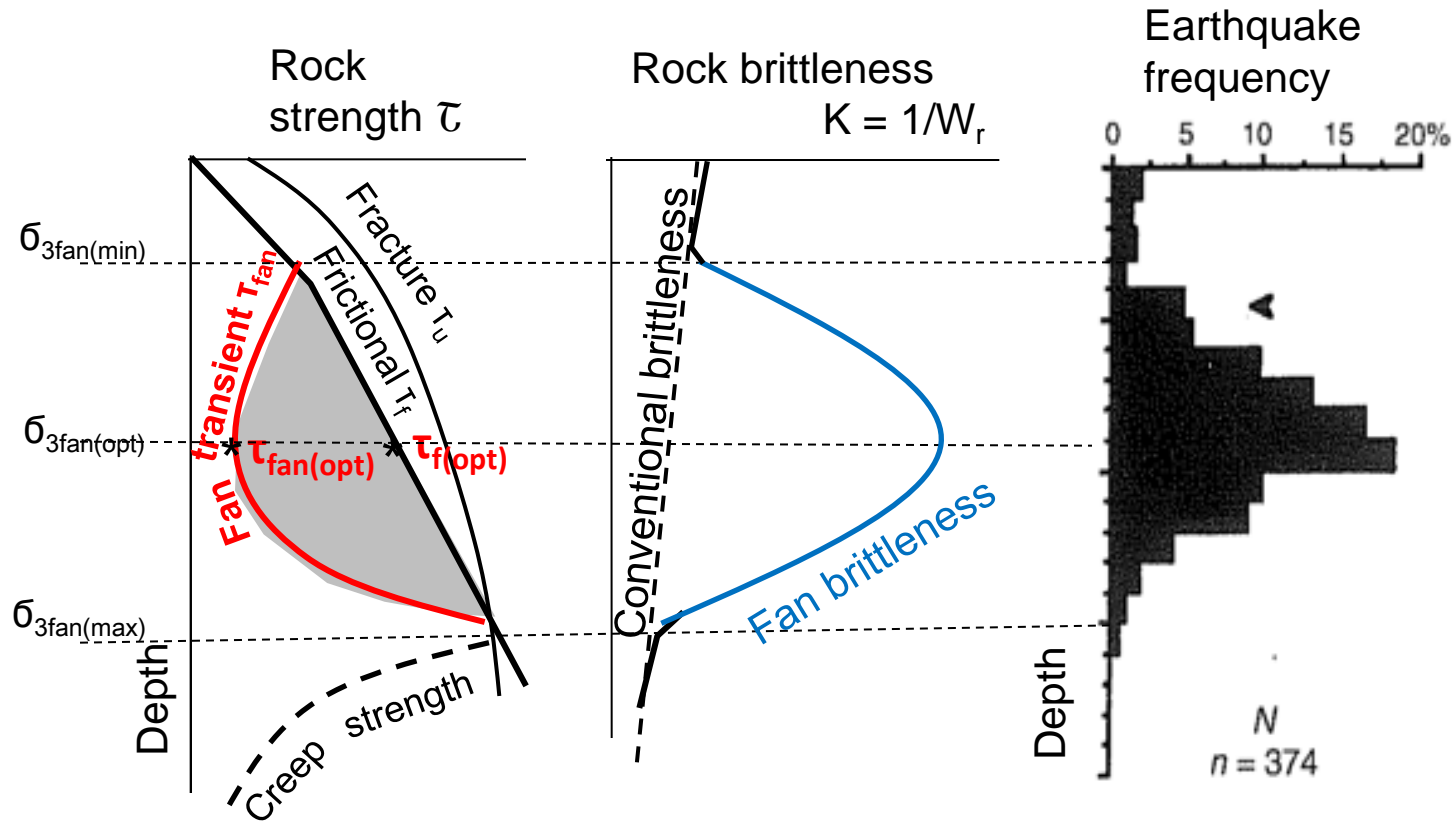
$$\Psi = T_f/T_{fan}$$



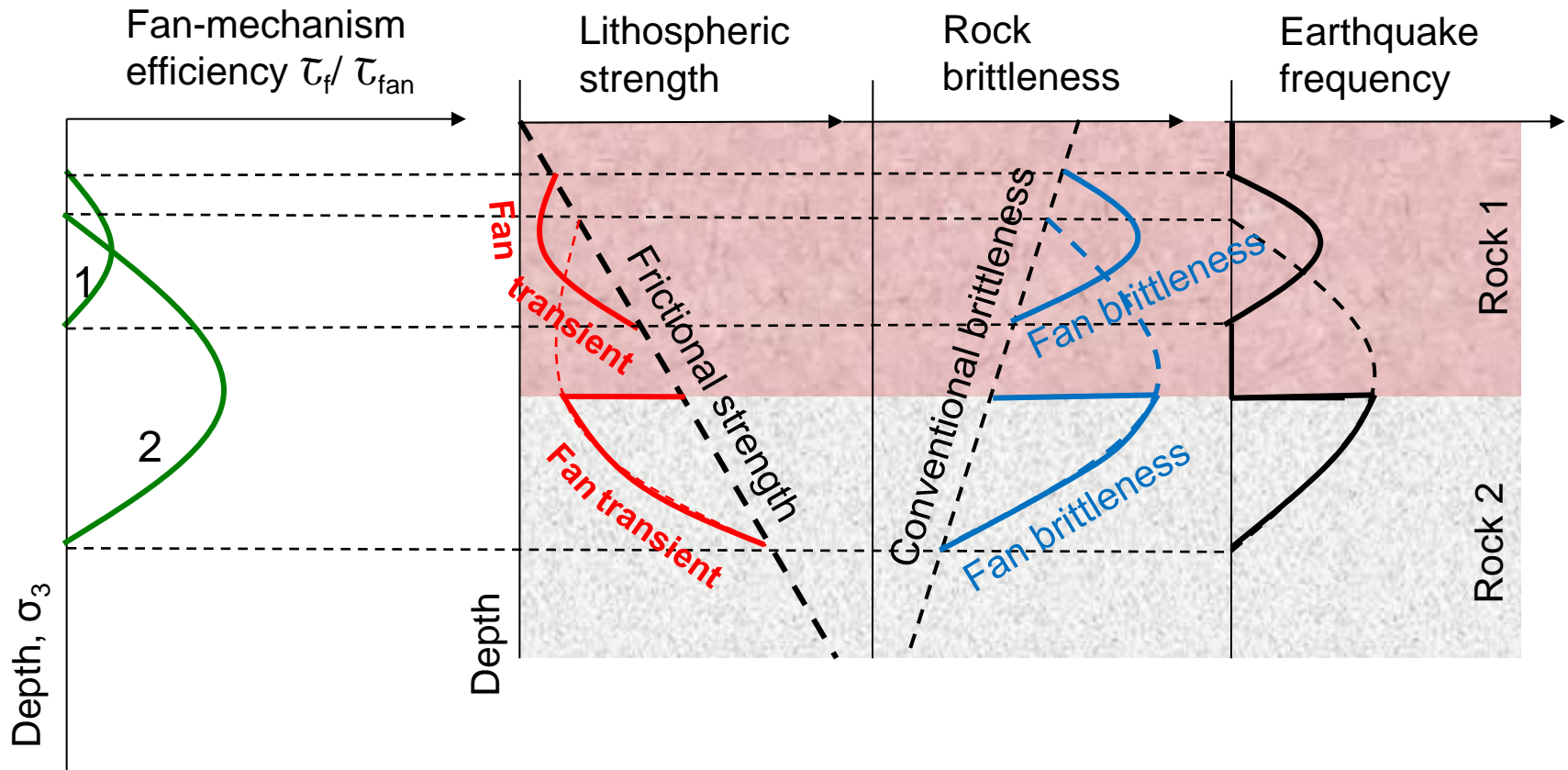
Полные паспорта прочности и хрупкости прочных пород




Типичное распределение характеристик прочности, хрупкости и частоты землетрясений с глубиной



Двуслойная кора



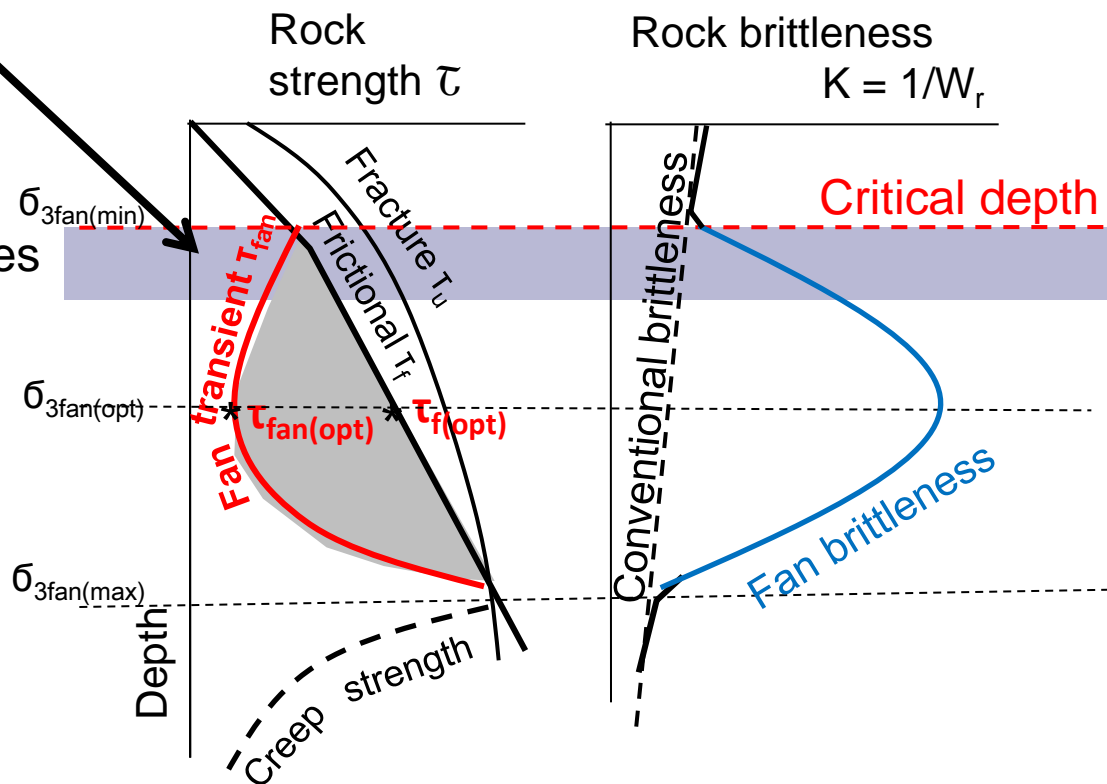


Роль веерного механизма в
создании горных ударов в глубоких
выработках (**shear rupture rockbursts**)

Выработки на глубинах активности веерного механизма подвергаются горным ударам типа shear rupture rock bursts

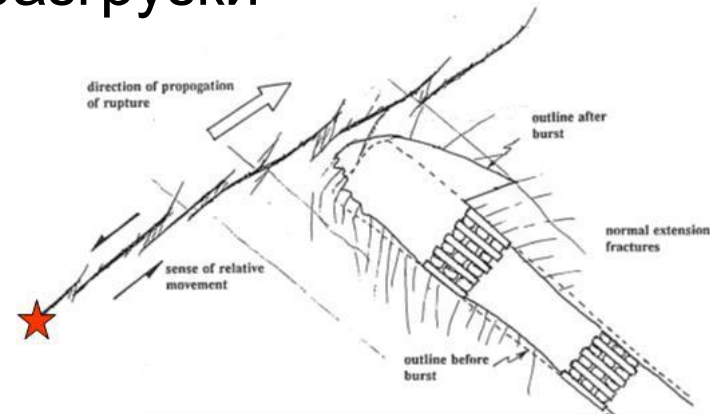
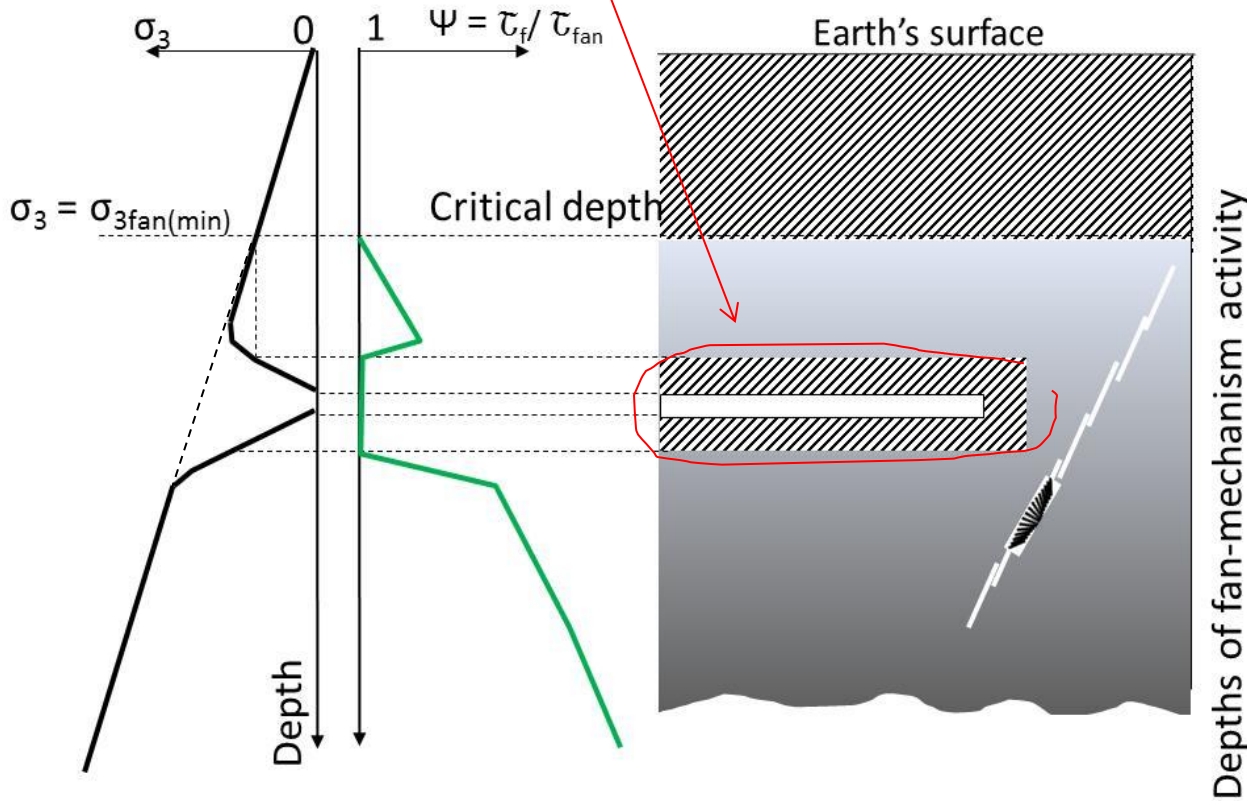


Ultra-deep mines



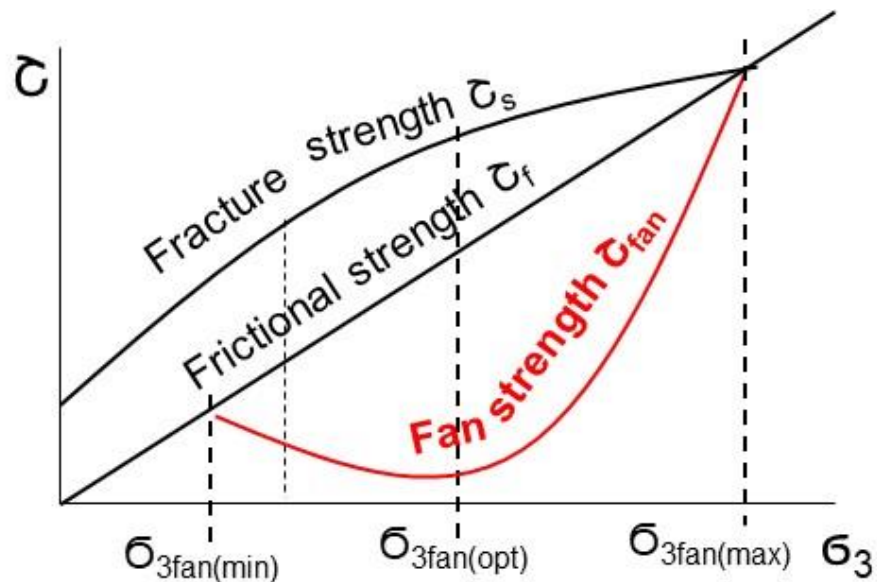
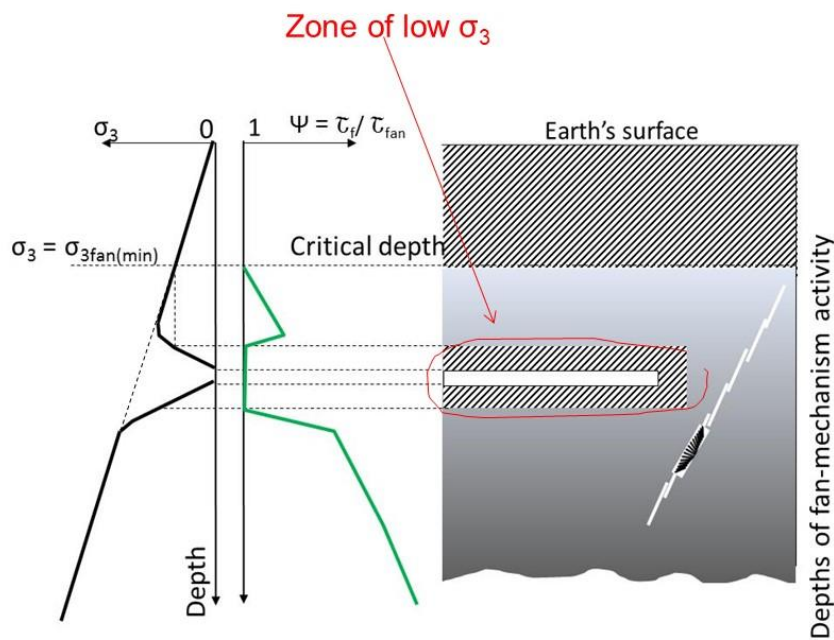
Динамические трещины зарождаются вдали от выработки в зоне высоких σ_3 за пределом зоны разгрузки

Zone of low σ_3

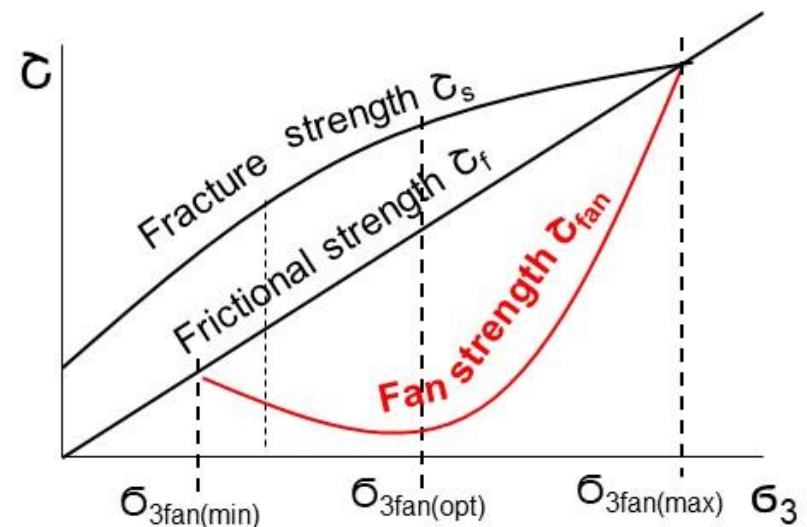


From Ortlepp, 1997

Экспериментальное получение полных паспортов прочности для прогноза динамических явлений в глубоких выработках



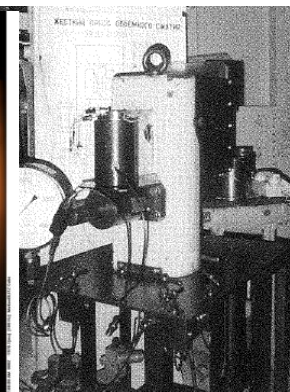
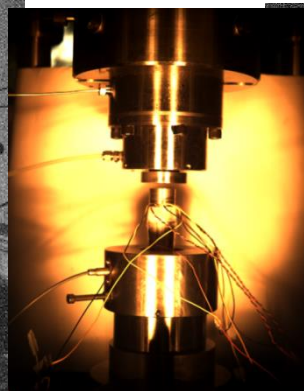
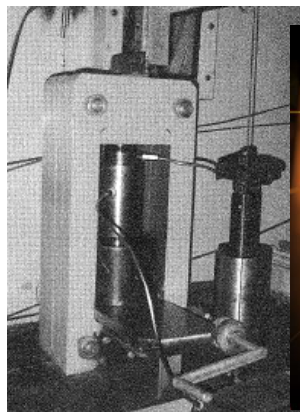
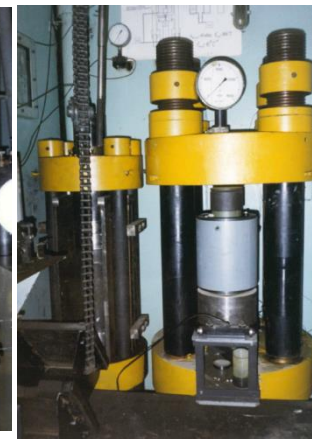
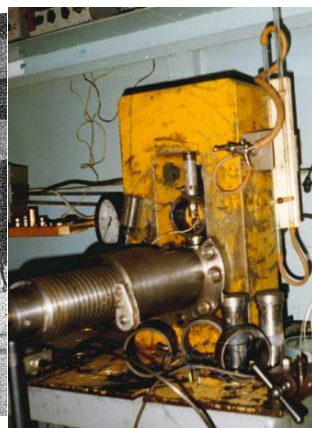
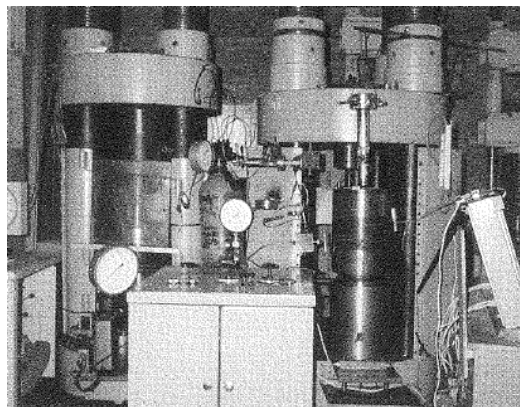
Для изучения запредельных свойств **класса 3** необходимы испытательные машины нового поколения





Спасибо за внимание

Созданные установки обеспечивают рекордную жесткость нагружения (50 МН/мм), боковое давление (до 2000 МПа), статическое и динамическое нагружение (10^{-7} - 10^{+3} /сек), сервоконтроль, фильтрацию, гидроразрыв и др.



Общий вид лабораторий в ЛГУ и ЗАУ

