

Геологический факультет МГУ  
Кафедра динамической геологии  
Лаборатория тектонофизики и геотектоники

# Тектонофизика

A hand is shown from the bottom, holding a glowing, semi-transparent Earth globe. The globe shows continents and oceans with a bright light source behind it, creating a lens flare effect. The background is a dark blue space filled with numerous small white stars.

Курс лекций вед. научн. сотр., канд. геол.-минер. наук  
**Н.С. Фроловой**

Лекция 6



2

# Лекция 6

## Прочность и разрушение

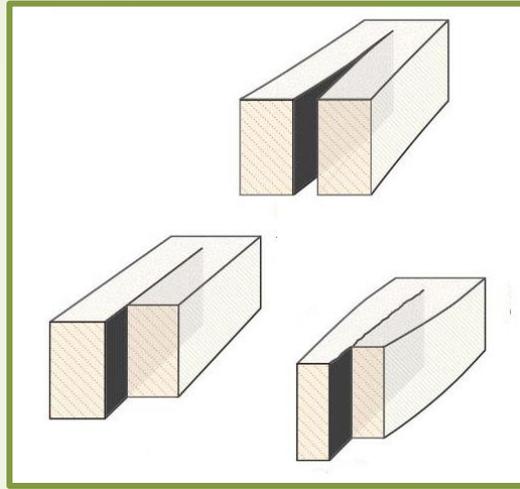


*Фото Д.С. Зыкова*

# Что такое трещина

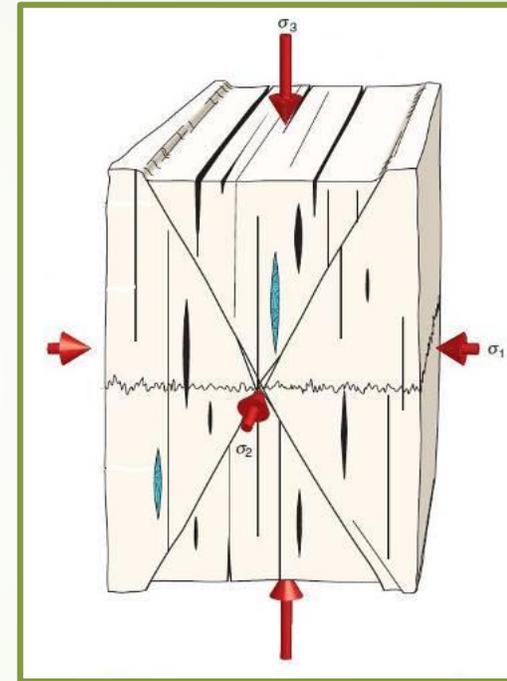
Трещина – это очень узкая зона, обусловленная отсутствием непрерывности перемещений и механических свойств материала

# Типы трещин и их ориентировка по отношению к главным осям напряжений



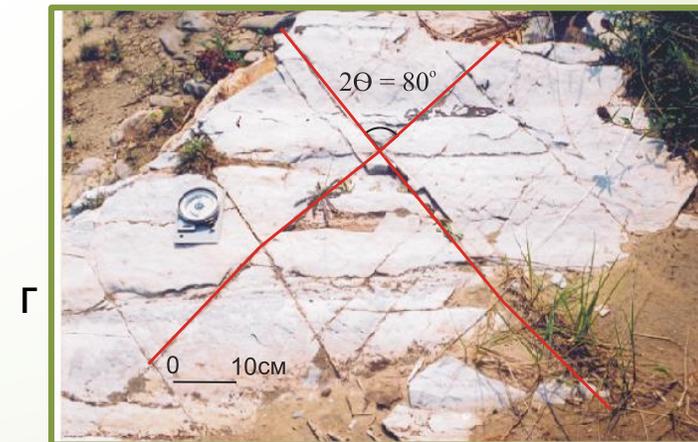
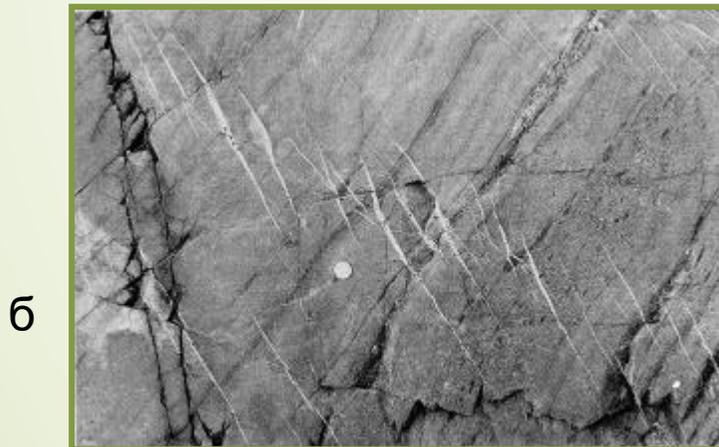
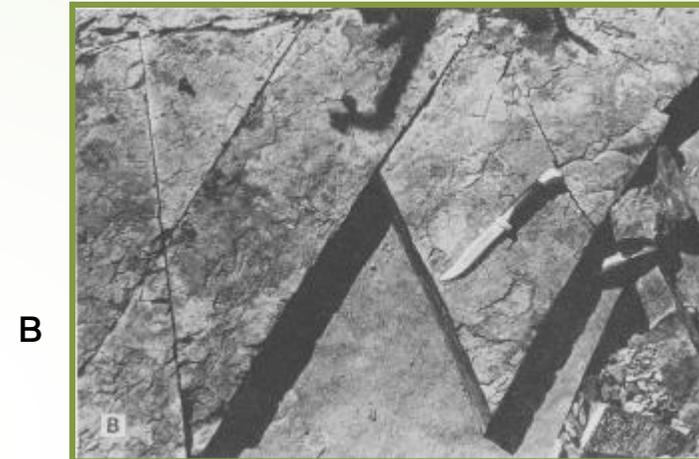
Модели трещин  
(раскрытие, закрытие и скольжение)  
(Fossen, 2011)

К трещинам, перпендикулярным оси сжатия, относятся не только стилолитовые, но также кливажные, макроклоажные и муллионные швы. Их можно назвать **дизъюнктивами сжатия** (Фролова, 2008)



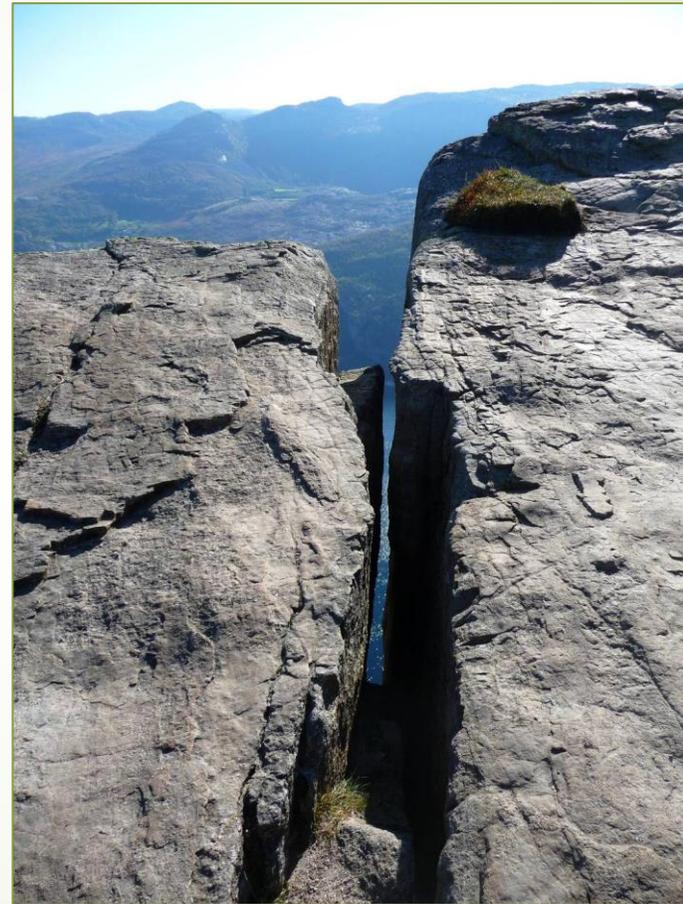
Принципиальная схема расположения трещин в объеме породы, находящемся в напряженном состоянии (Fossen, 2011)

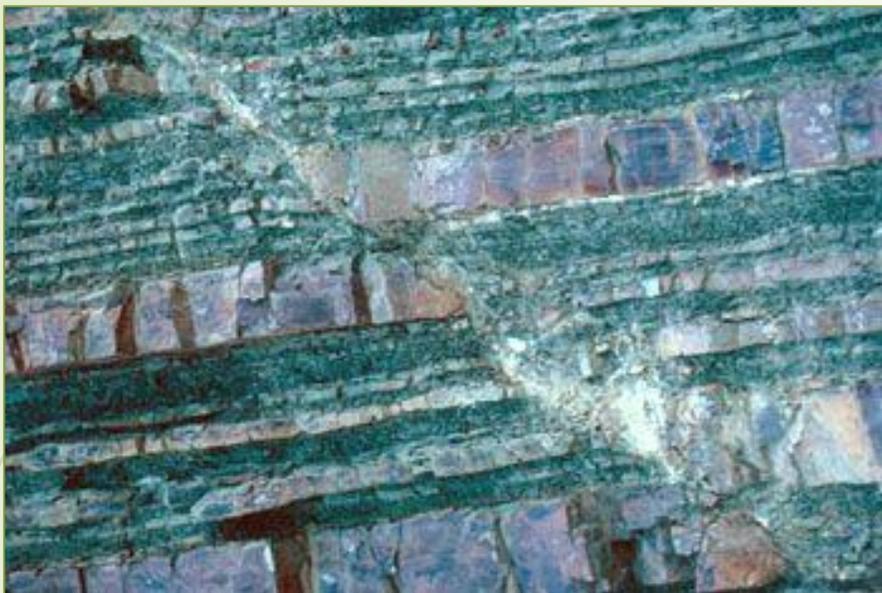
# Трещины отрыва и скалывания в природе



а, б – трещины отрыва, заполненные минеральным веществом (б – в зоне сдвига);  
в, г – трещины скалывания а, б, в по Дж. Дэвису; г – по А.В. Муровской

# Примеры более крупных трещин





К трещинам скальвания относятся как взбросы, так и сбросы



# Трещины отрыва и скалывания в массиве пород

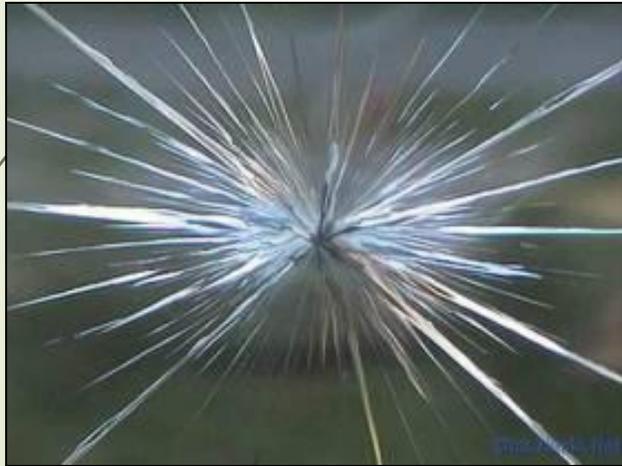


*(Бурзунова Ю.П. Геодинамика и тектонофизика, 2017)*

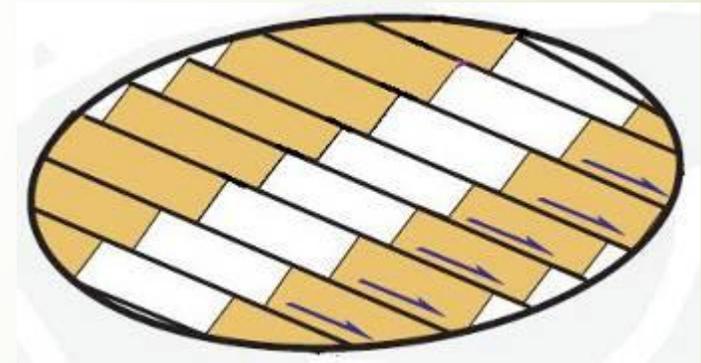
# Образование разрывов

Лабораторные эксперименты: разрушение образцов.

Резкое разделение на несколько кусков (хрупкое поведение)

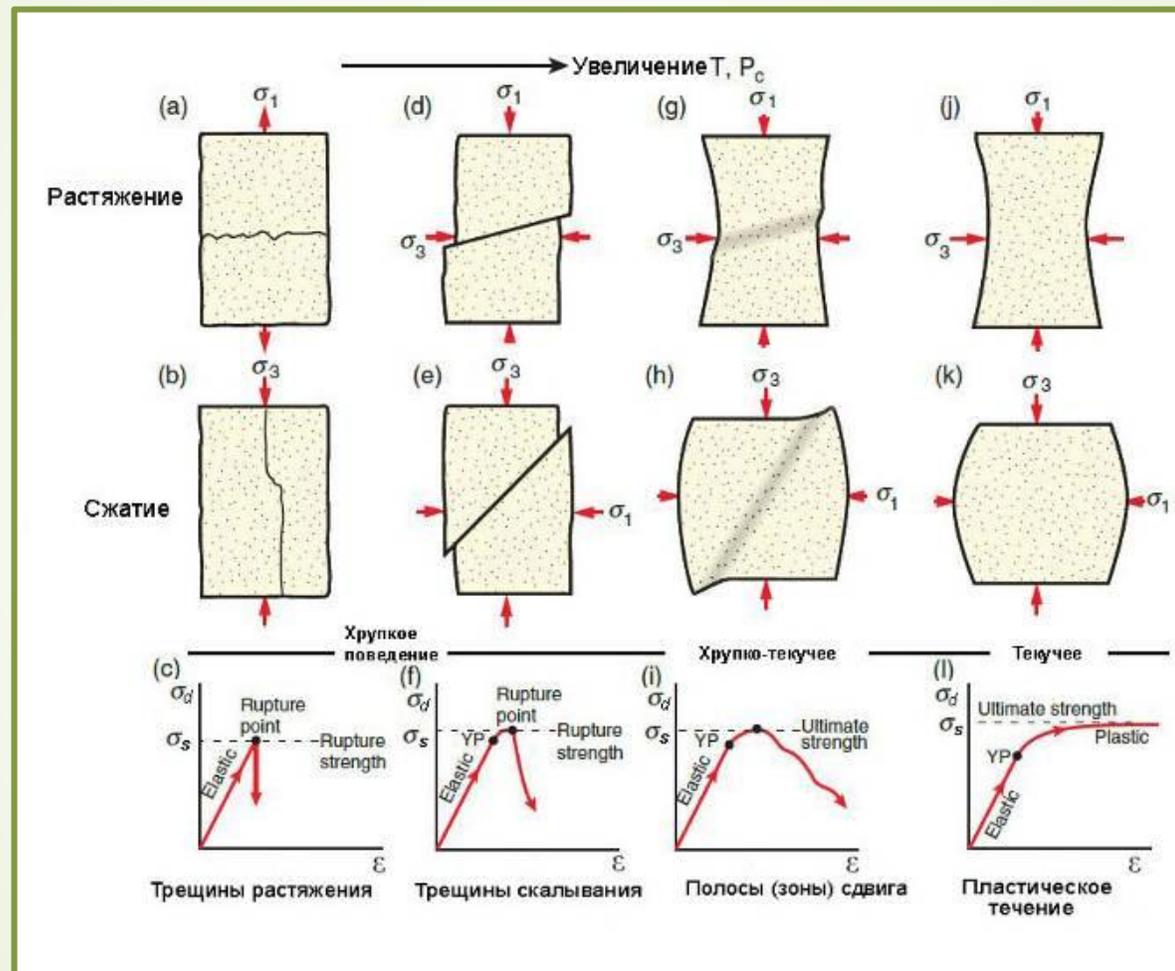


Сохранение связности на косых поверхностях разрыва. Медленное скольжение



Все зависит от условий нагружения и деформационной обстановки (всестороннее давление и температура)

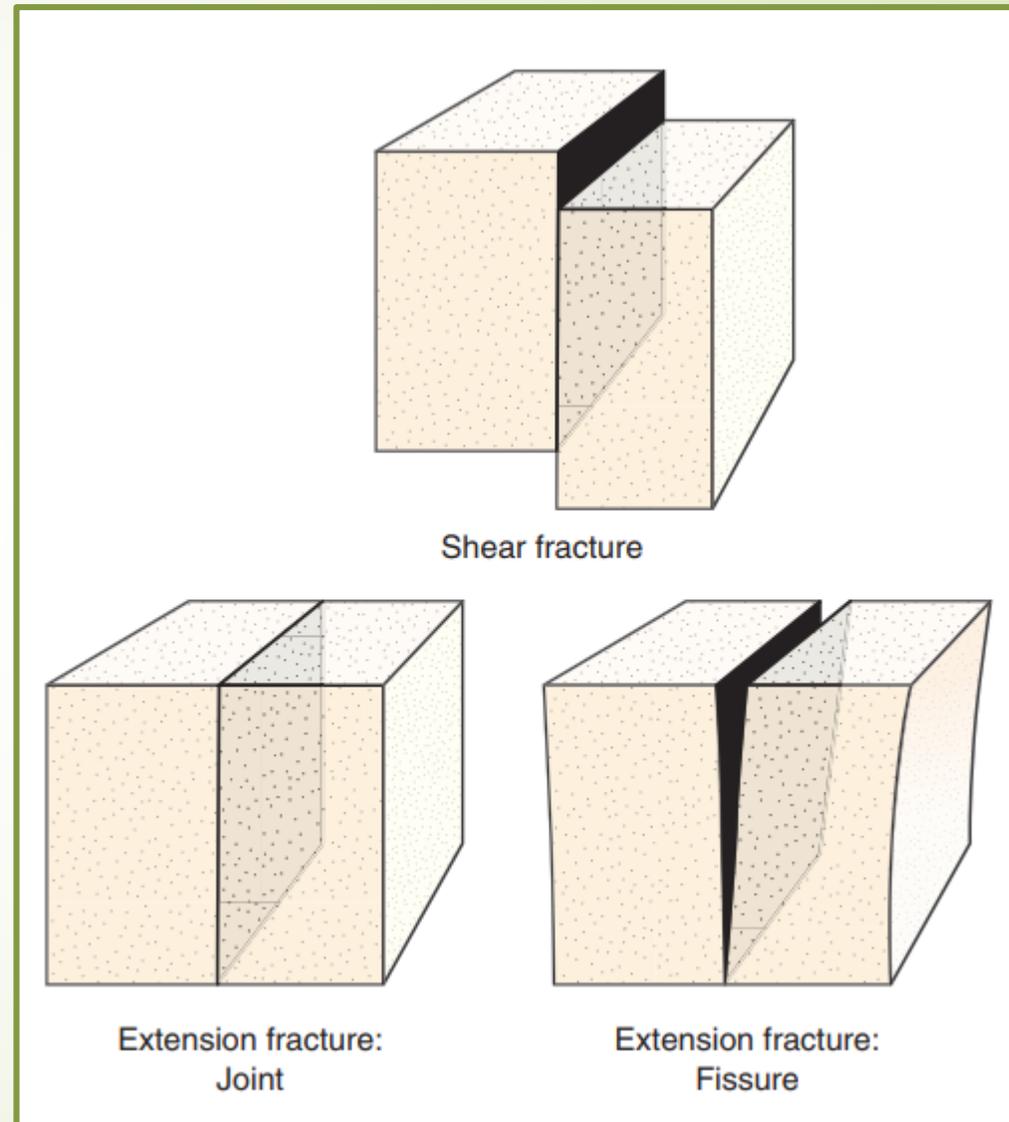
# Развитие деформационных структур в эксперименте



(Fossen, 2011)

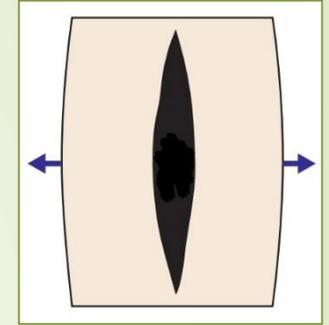
У твердых тел, кроме предельного напряжения  $\sigma_e$  – предела упругости - существует и другое предельное напряжение –  $\sigma_s$ , которое называется *пределом прочности*, при его достижении тело испытывает разрывную деформацию

Термины, употребляемые  
при рассмотрении  
разрывов (трещин)



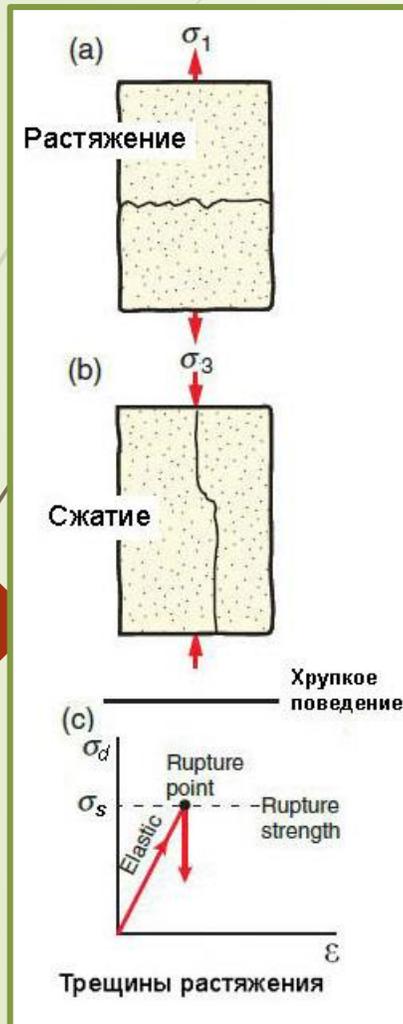
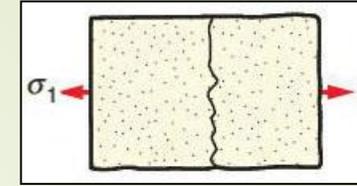
(Fossen, 2011)

# Трещины (разрывы) растяжения



Открытые трещины растяжения в базальте, сформированные вдоль оси рифта. Исландия (*Fossen, 2011*)

# Трещины растяжения или трещины отрыва



**Трещины растяжения** в идеале перпендикулярны оси максимального растяжения. В терминах деформации они развиваются перпендикулярны направлению удлинения в условиях растяжения и параллельны оси сжатия во время испытаний на сжатие. Трещины – наиболее часто встречающийся тип разрывов растяжения вблизи поверхности Земли; при их формировании деформация очень мала.

**Разрывы растяжения** более раскрыты, чем трещины, и могут быть очень протяженными.

(Fossen, 2011)

А



Б



В



А – Кольский п-в (Фото Д.С. Зыкова)

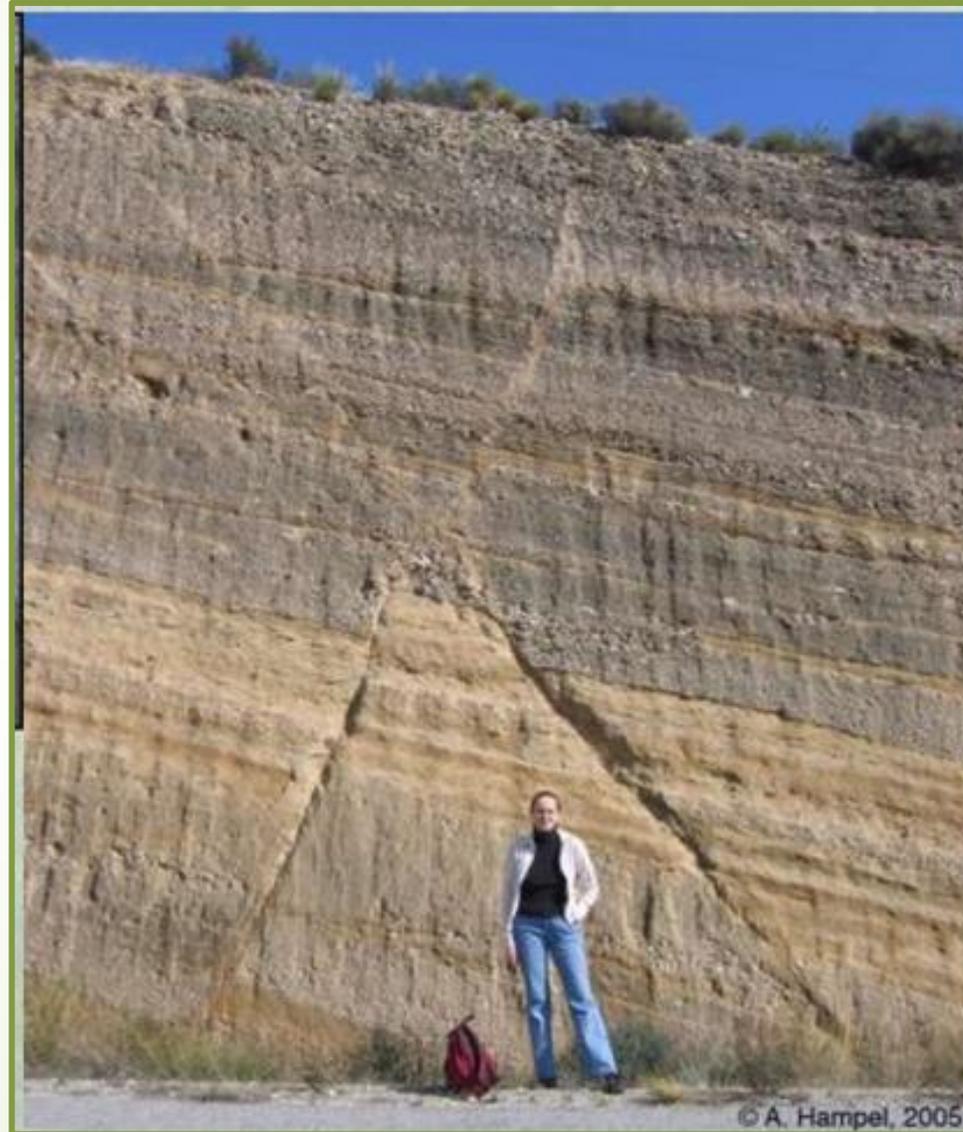
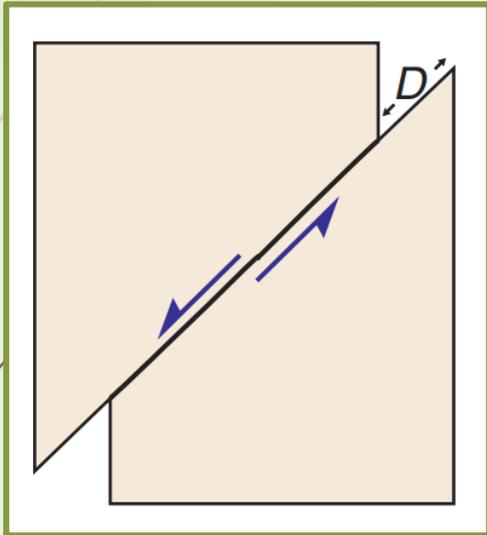
Б – Дымные горы, Юта (Интернет-ресурс)

В – Исландия (Gudmundsson, 2011)

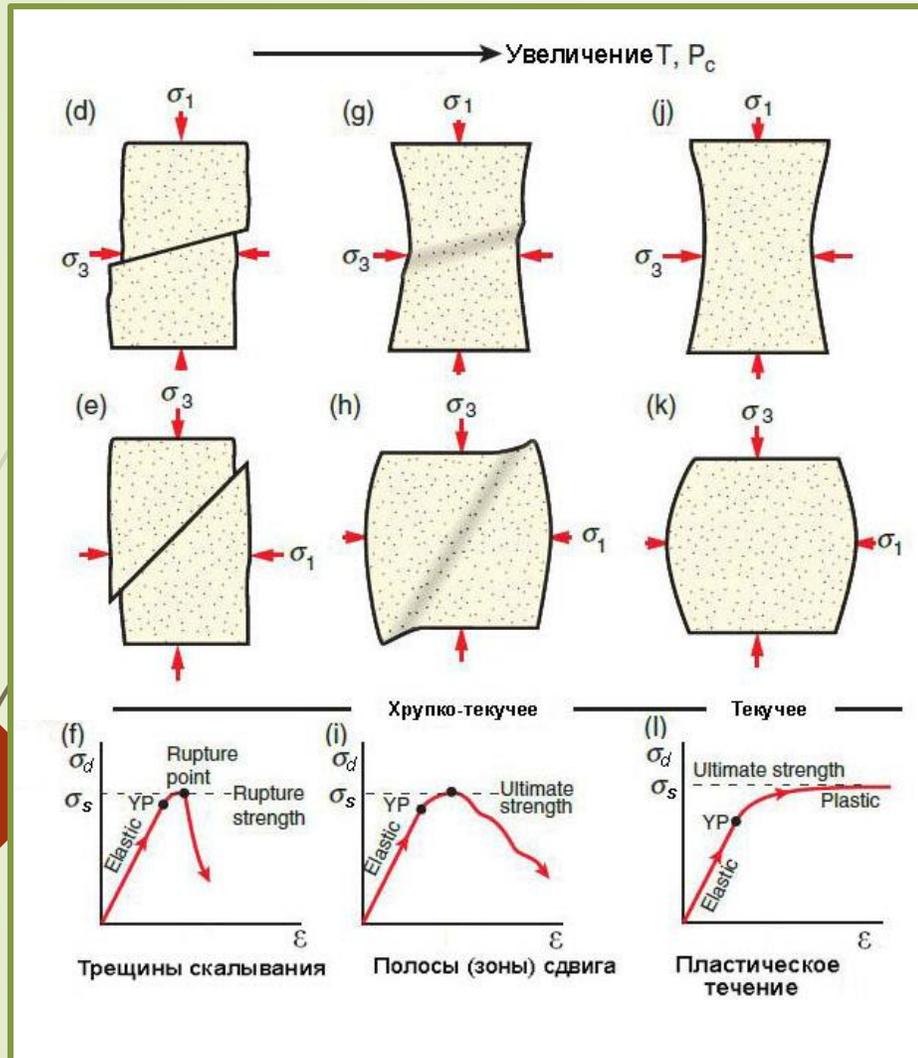
Разрывы растяжения типичны для деформаций без или с **очень малым всесторонним давлением** и формируются при **небольших девиаторных напряжениях**.

Эти разрывы также могут иметь место на глубине, если высокое флюидное давление уменьшает эффективное напряжение.

# Трещины (разрывы) скальвания



# Трещины скалывания



В трещинах скалывания осуществляется скольжение вдоль их поверхностей. Обычно они развиты под углом 20-30° к оси максимального сжатия. Это показано экспериментально в условиях всестороннего сжатия.

Эксперименты показали также, что эти трещины обычно формируются в виде сопряженных пар, а ось  $\sigma_3$  является биссектрисой острого угла между ними

В правой части рисунка показано развитие деформаций при увеличении температуры и всестороннего давления

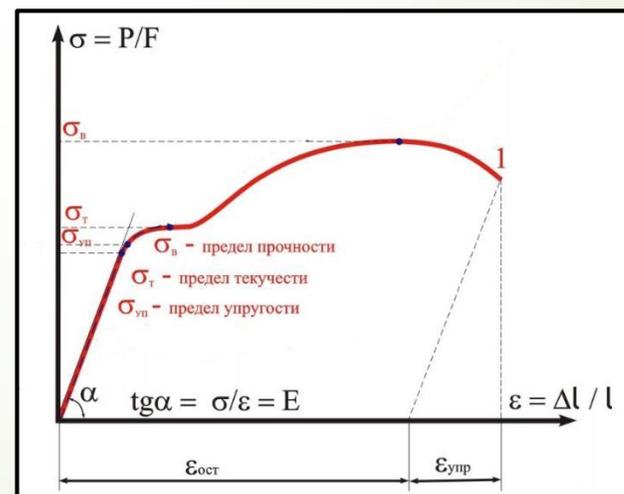
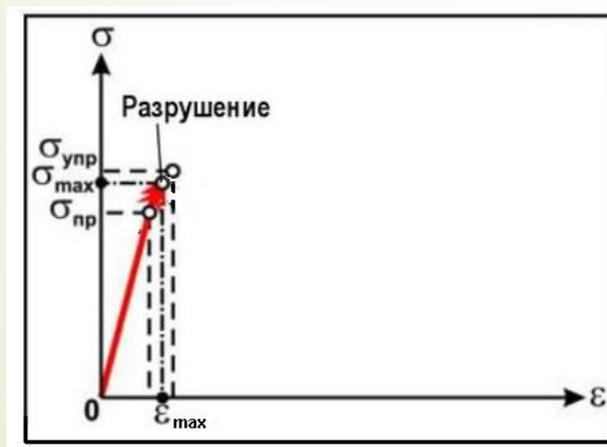
(Fossen, 2011)

# Предел прочности

**Предел прочности** — механическое напряжение, выше которого происходит разрушение материала

Понятия предел прочности и временное сопротивление разрыву не являются тождественными. Предел прочности относится к случаю, когда образец разрушается без образования шейки, что характерно для хрупких материалов. Временное сопротивление разрыву относится к пластичным материалам. Временное сопротивление разрыву часто обозначают  $\sigma_s$ .

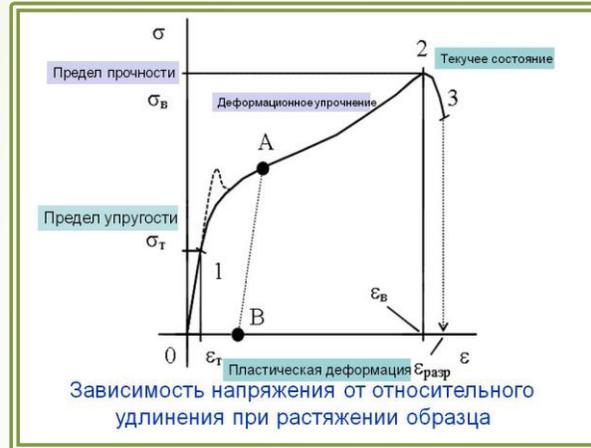
Основные виды пределов прочности: статический, динамический, на сжатие, на растяжение, на сдвиг.



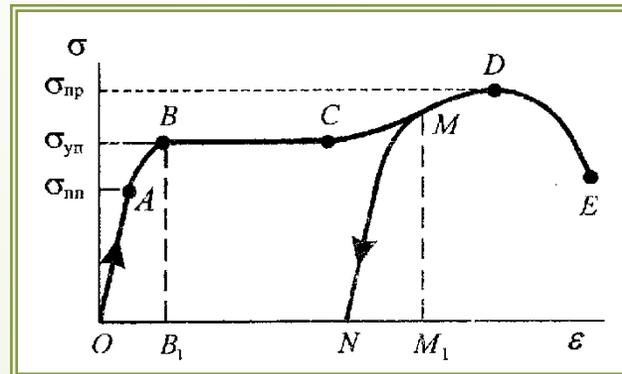
# Диаграммы напряжение-деформация для упруго-пластического поведения тел



Обобщенная идеализированная диаграмма для горных пород (из Fossen, 2011)



Зависимость напряжения от относительного удлинения при растяжении образца



Диаграммы для металла в условиях растяжения (имеет место структурная перестройка деформируемого материала)

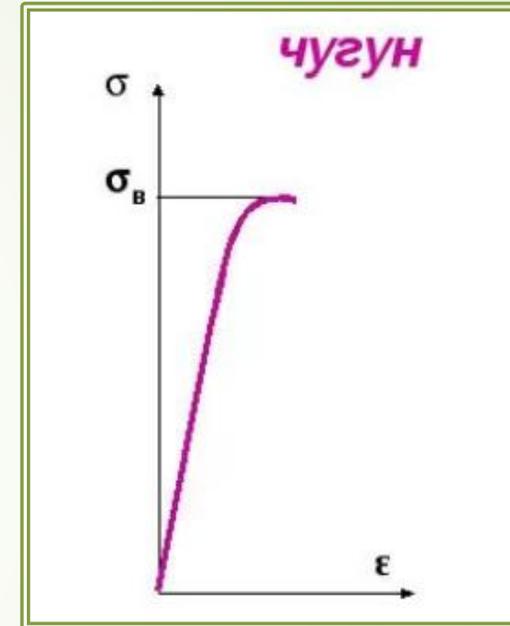
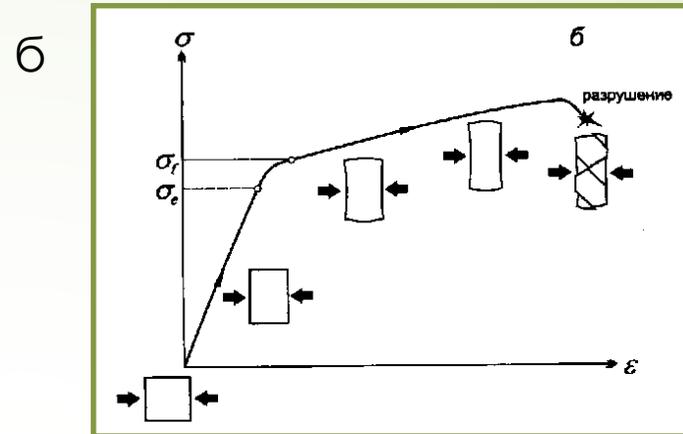
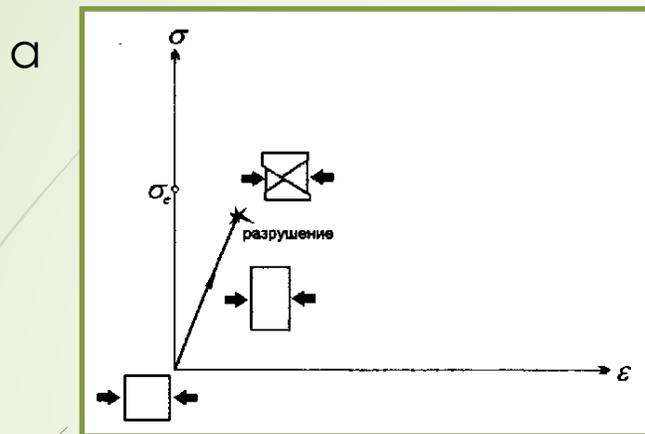


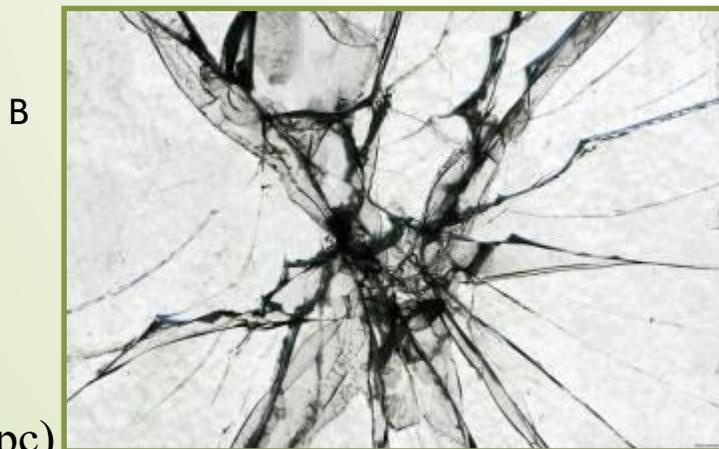
Диаграмма для хрупкого чугуна в условиях сжатия.

(Интернет-ресурс)

# Геологи часто говорят о хрупком и вязком разрушении



При хрупком разрушении (а, в) предел прочности лежит ниже предела упругости, и остаточных деформаций, предшествующих образованию трещин не возникает. При вязком разрушении (б, г) до формирования трещин тело испытывает значительные остаточные деформации.



Эксперименты  
Н.С. Фроловой  
на влажной глине

# О пределе прочности



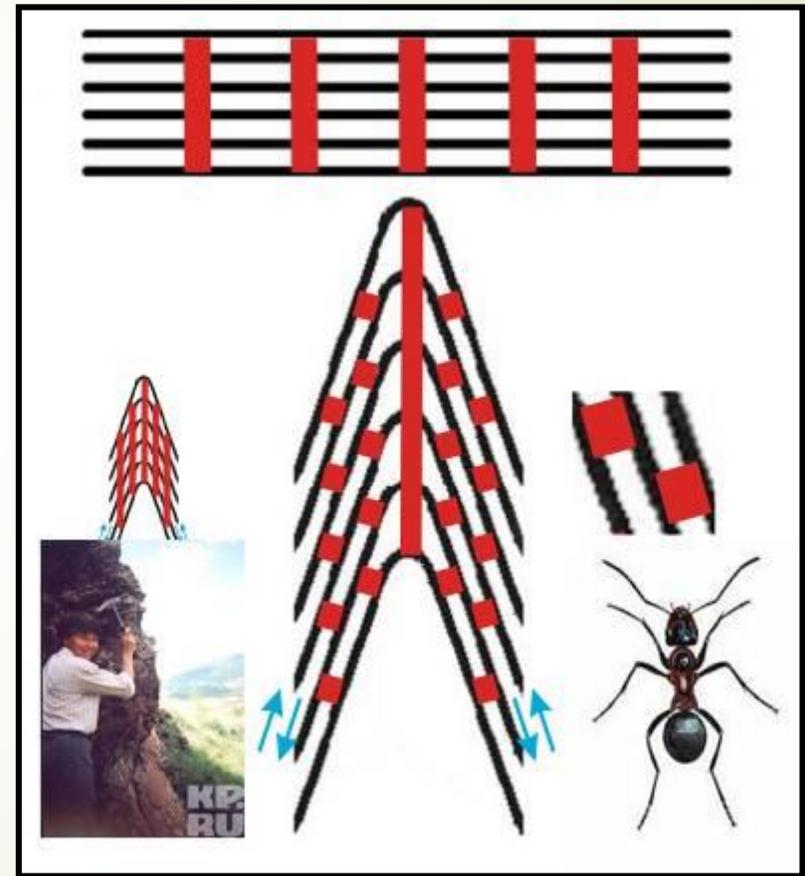
Опыты с песком в Лаборатории тектонофизики и геотектоники МГУ.  
При сдвиге или растяжении в песке формируются разрывы.

Сцепления между частицами песка почти нет, так что ни о каком превышении предела прочности речь не идет. Просто энергетически выгоднее перемещать более крупные тела вдоль разрывов, чем производить межзерновые перемещения.

# Относительность понятий о пластической и разрывной деформации в зависимости от соотношения размеров тел и нарушающих их сплошность разрывов (трещин)

1. Пластическая деформация (пачка листов бумаги с метками).
2. Разрывная деформация (два листа из этой пачки).

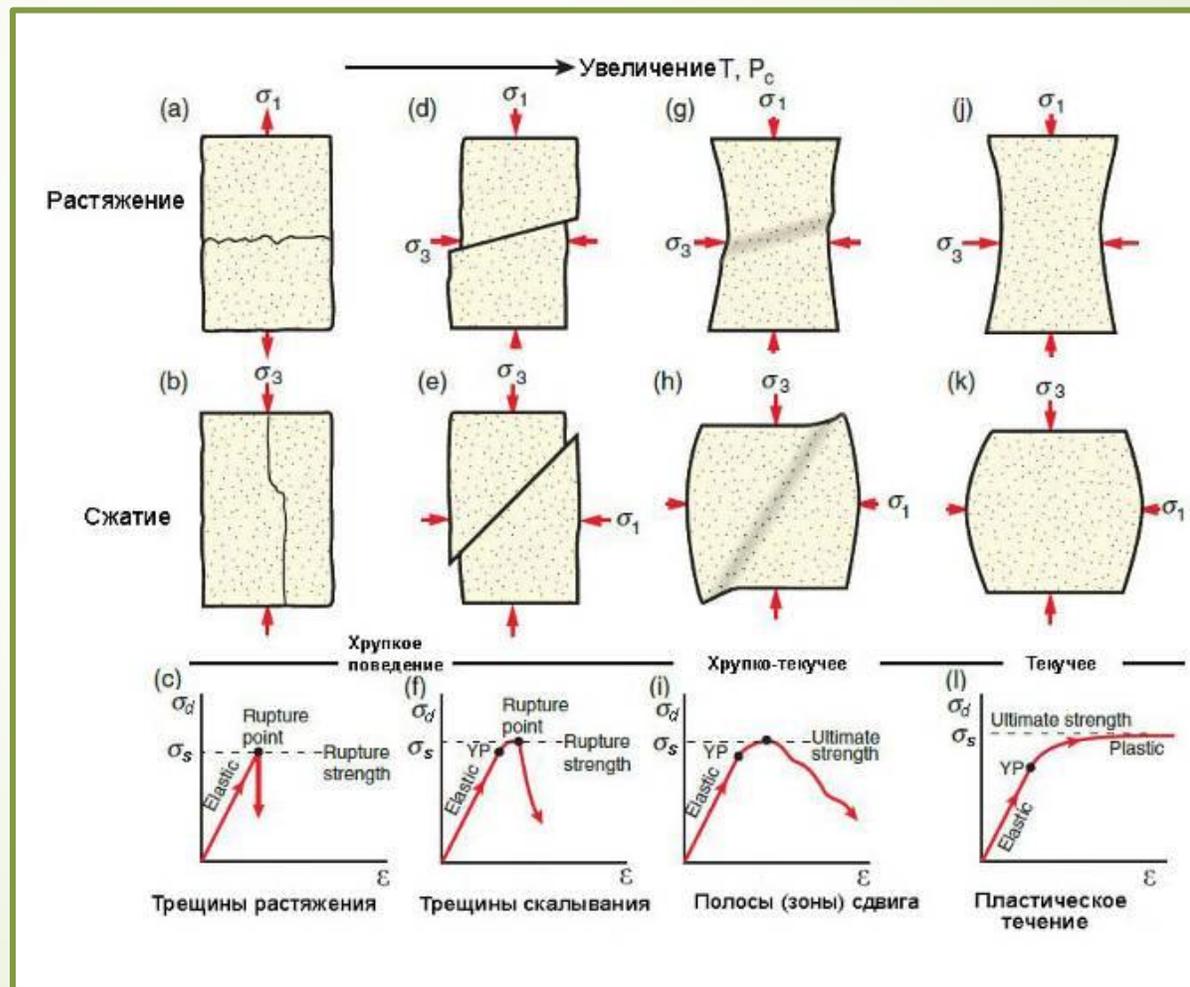
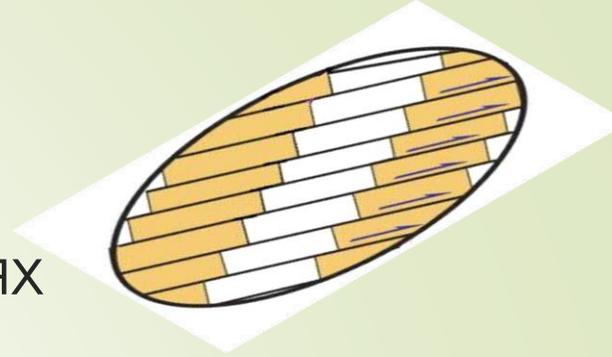
Здесь важен **масштаб** рассмотрения.  
Для человека пачка листов бумаги деформируется пластически, а для муравья между двумя метками – это разрыв.



# Пластическая или разрывная деформация?



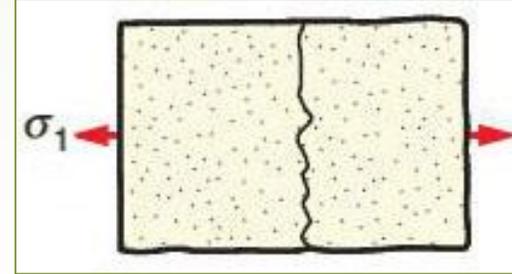
Граница между разрывной и пластической деформациями при испытаниях горных пород при различных температурах и давлениях отсутствует



# Образование трещин

**Трещины отрыва.**

**Хрупкое разрушение.**



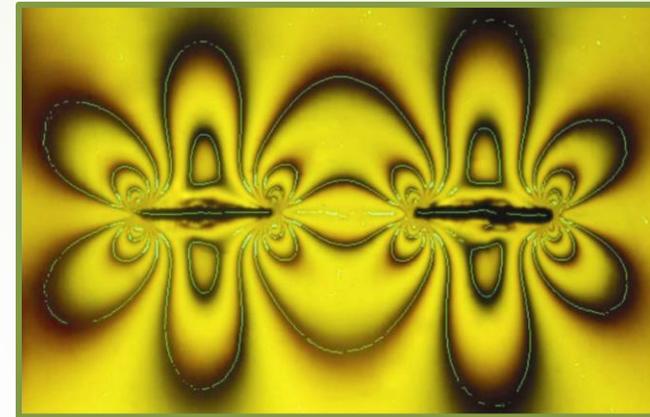
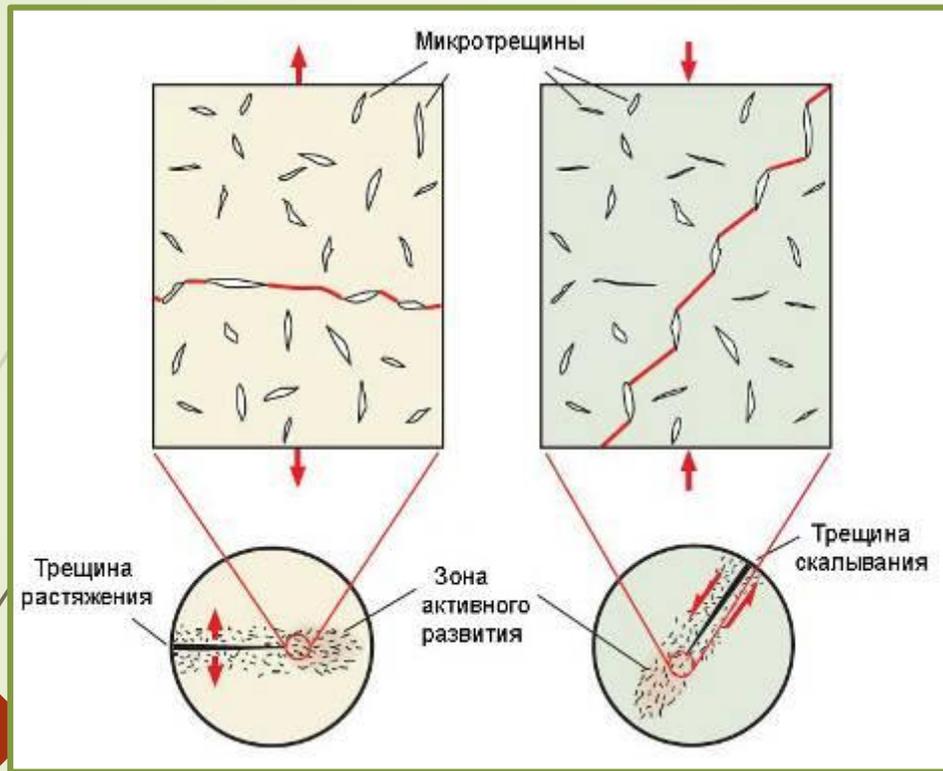
Образование трещин, субперпендикулярных оси простого растяжения происходит, когда нормальное растягивающее напряжение на поверхности, перпендикулярной оси растяжения, становится выше величины  $\sigma_s$  – предела прочности сцепления данного материала на растяжение

Вероятные значения  $\sigma_s$ . **Теория:**  $\sigma_s \approx E/10$  (расчеты, основанные на прочности атомного сцепления). **Практика:**  $\sigma_s$  в 100 и более раз меньше.

Горные породы не однородная сплошная среда. Присутствуют мелкие трещины и неоднородности, в том числе дефекты на границах зерен.

Теория хрупкого разрыва твердых тел, учитывающая присутствие микроскопических структурных дефектов, разработана Гриффитом

# Микродефекты и разрушение



(Интернет-ресурс)

Упрощенная иллюстрация роста и распространения трещин растяжения и трещин скальвания посредством роста и объединения микроскопических трещин отрыва (дефектов). Рост происходит в ходе развития зоны на переднем крае конца трещины.

(Fossen, 2011)

# Образование разрывов со смещением

В земной коре преобладают разрывы со смещением.

Существует разница между явлением заложения разрыва (первого появления плоской поверхности нарушения) и смещениями по разрыву, которые продолжаются в течение долгого времени. Смещения связаны с иным распределением напряжений.

Экспериментальные данные: разрывы со смещением располагаются под углом к оси сжатия

Обычно общее напряженное состояние

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

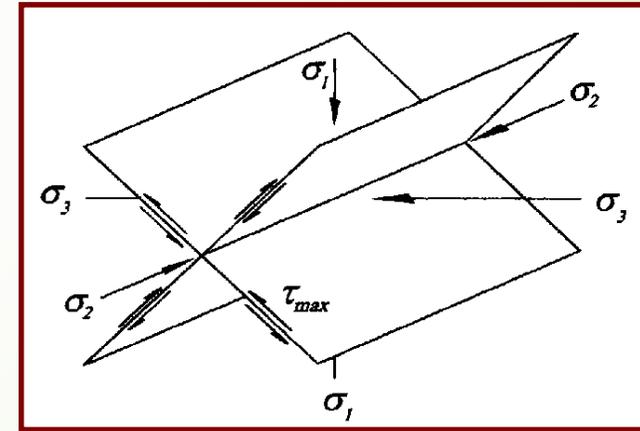
**Должен существовать критерий разрушения, применительно к этим условиям**

# Теоретические построения

Разрывы происходят по поверхностям, расположенным под углом к оси сжатия, и обусловлены присутствием касательных напряжений, превышающих некоторую критическую величину.

Простейшей моделью можно было бы считать разрыв по поверхности максимального касательного напряжения

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$



Этот критерий предсказывает образование двух сопряженных поверхностей скалывания, наклоненных под углом  $45^\circ$  к оси  $\sigma_3$  и пересекающихся по линии, совпадающей с направлением  $\sigma_2$

Однако такие поверхности разрыва не наблюдаются

# Теория Мора

Теория разрыва принимает в расчет как касательные, так и нормальные напряжения и утверждает, что разрушение происходит тогда, когда зависимость между касательными и нормальными напряжениями на некоторой поверхности

$$\tau = f(\sigma)$$

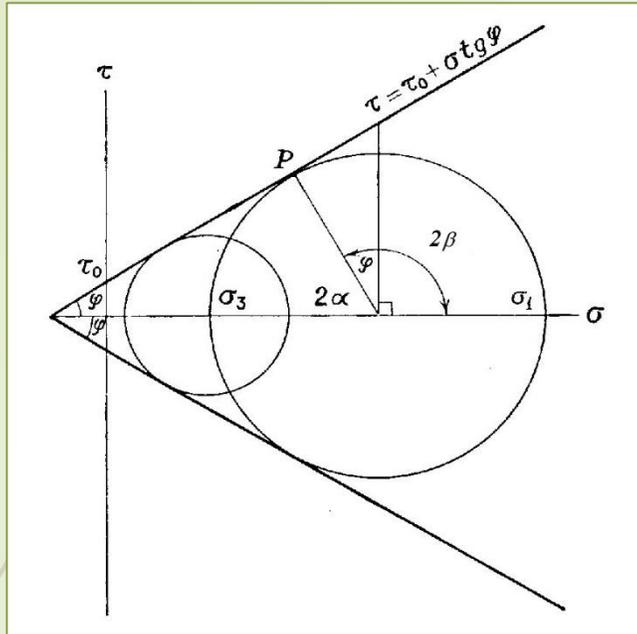
принимает некоторую критическую форму, характерную для данного материала.

График этой функции можно изобразить в виде огибающей кругов Мора (форма графика определяется экспериментально в опытах сжатия при разных значениях всестороннего давления).

Важный случай. Огибающая Мора аппроксимируется двумя прямыми линиями, имеющими аналитическое выражение

$$\tau = \tau_0 - \mu \sigma_n,$$

*где  $\tau$  - касательное напряжение, действующее параллельно будущей плоскости разрушения и приводящее к разрыву,  $\sigma_n$  - нормальное напряжение к этой же плоскости разрушения (оно отрицательно, поэтому в формуле минус),  $\tau_0$  - прочность сцепления частиц материала,  $\mu$  - коэффициент внутреннего трения.*



$\tau$  - касательное напряжение, действующее параллельно будущей плоскости разрушения и приводящее к разрыву,  $\sigma_n$  - нормальное напряжение к этой же плоскости разрушения (оно отрицательно, поэтому в формуле - минус),  $\tau_0$  - прочность сцепления частиц материала,  $\mu$  - коэффициент внутреннего трения.

$$\sigma_\varphi = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \tau_{max} \cdot \cos 2\varphi;$$

$$\tau_\varphi = \tau_{max} \cdot \sin 2\varphi;$$

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}.$$

## $\tau = \tau_0 - \mu \sigma_n$ критерий Навье-Кулона

*Критерий называют также критерием Кулона или Кулона-Мора*

P – точка, где происходит разрушение

Это уравнение можно записать:

$\tau = \tau_0 - \sigma \operatorname{tg} \varphi$ , где  $\varphi$  – угол внутреннего трения.

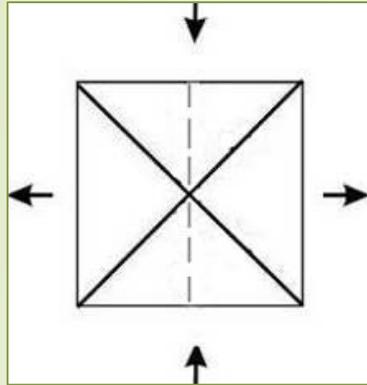
Угол скалывания  $\alpha = \pm (\pi/4 - \varphi/2)$

Большинство горных пород имеет  $\mu \approx 0,6$ ;

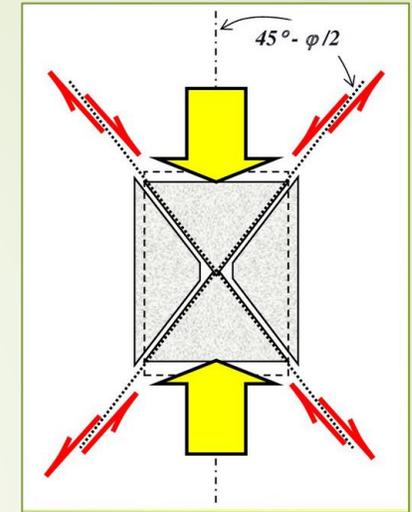
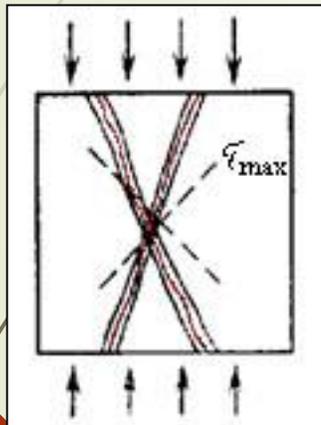
$\varphi \approx 30^\circ$ ;  $\alpha \approx 30^\circ$  (в общем случае  $\varphi$  и  $\alpha$  не равны)

Эта зависимость предопределяет возникновение разрыва на паре сопряженных поверхностей, причем направление  $\sigma_3$  является биссектрисой острого угла между ними. Иными словами, угол скалывания меньше  $45^\circ$ , что подтверждено многочисленными экспериментами.

Огибающие кругов Мора в общем случае не прямолинейны и их форма определяется экспериментально



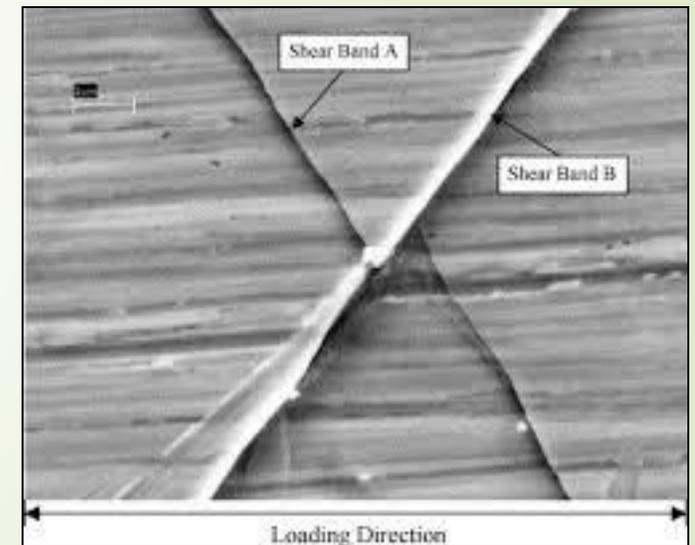
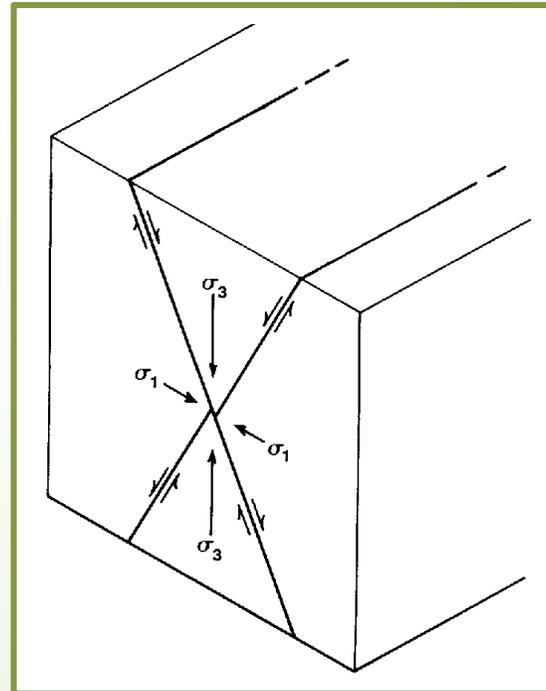
Максимальные значения касательных напряжений - на площадках, ориентированных под углом  $45^\circ$  к оси максимального сжатия; минимальное значение трения скольжения - на площадках, параллельных этой оси. Поверхности, по которым происходит скалывание, расположены между этими площадками



(Интернет-ресурс)

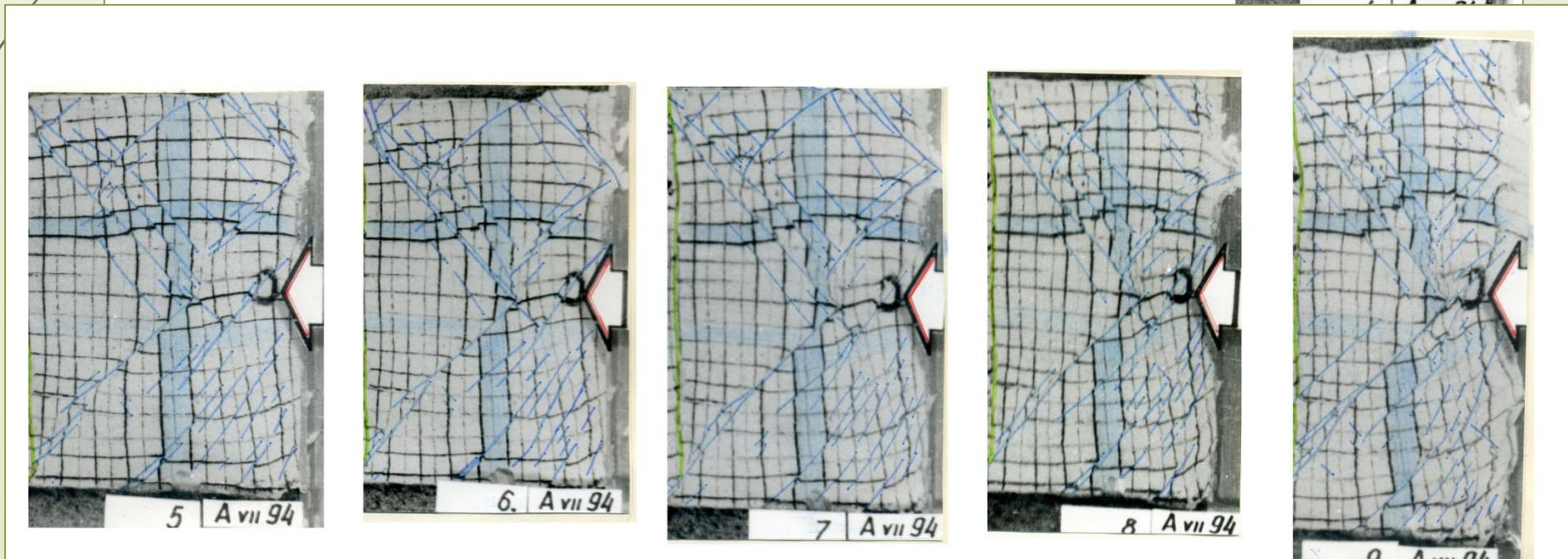
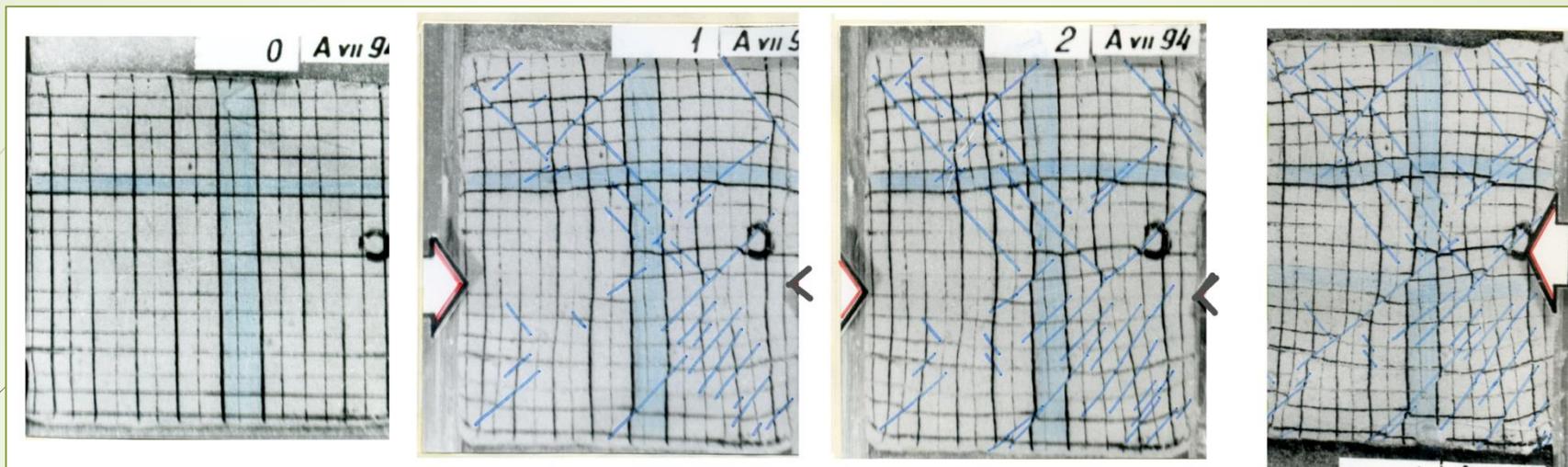
В экспериментах разрыв фактически происходит **только по одной** из этих двух поверхностей. В квазиизотропном материале образование разрыва возможно на любой из двух поверхностей, но как только он возникнет на одной поверхности, происходит перераспределение напряжений, при котором обычно резко падает величина осевого сжимающего напряжения, и другая поверхность разрыва не образуется. **Измеряя углы между осью сжатия и поверхностью разрыва ( $\alpha$ ), можно оценить величину внутреннего трения горной породы.**

Итак, в горных породах трещины скалывания образуются под углом  $\alpha$  к оси максимального сжатия  $\sigma_3$ . Угол  $\alpha$  получил название «**угла скалывания**», его осредненное значение для разных пород равно  $30^\circ$ . Сопряженные трещины скалывания возникают по обе стороны от оси  $\sigma_3$  и образуют между собой острый угол. Такие трещины являются важным диагностическим признаком ориентировки осей главных нормальных напряжений: ось максимального сжатия  $\sigma_3$  лежит в биссекторной плоскости острого двугранного угла, образованного двумя сопряженными трещинами скалывания, и ориентирована по нормали к линии их пересечения; ось максимального растяжения  $\sigma_1$  лежит в биссекторной плоскости тупого двугранного угла, образованного этими трещинами скалывания, и также по нормали к линии их пересечения; наконец, промежуточная ось  $\sigma_2$  ориентирована вдоль линии их пересечения. Для трещин скалывания, в отличие от трещин отрыва, характерна достаточно ровная поверхность (часто с бороздами или зеркалами скольжения) из-за взаимного смещения их крыльев.

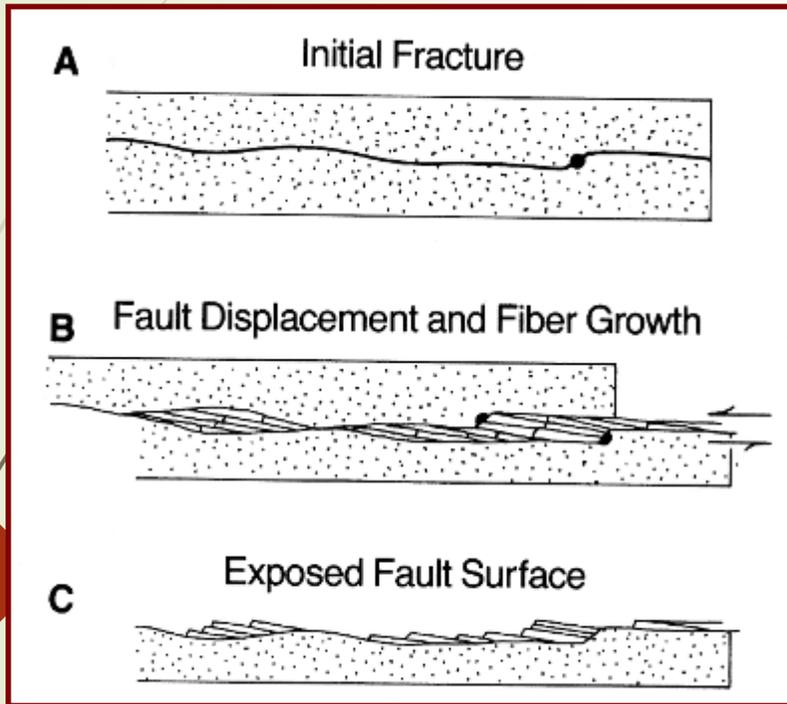


(Интернет-ресурс)

Моделирование процесса формирования и развития трещин в условиях сжатия – растяжения (Т.М. Гептнер, А.А. Наймарк, Лаборатория тектонофизики и геотектоники МГУ)



# Так могут выглядеть в природе трещины скальвания (разрывы со смещением)



Формирование зеркал скольжения  
По Дж. Дэвису

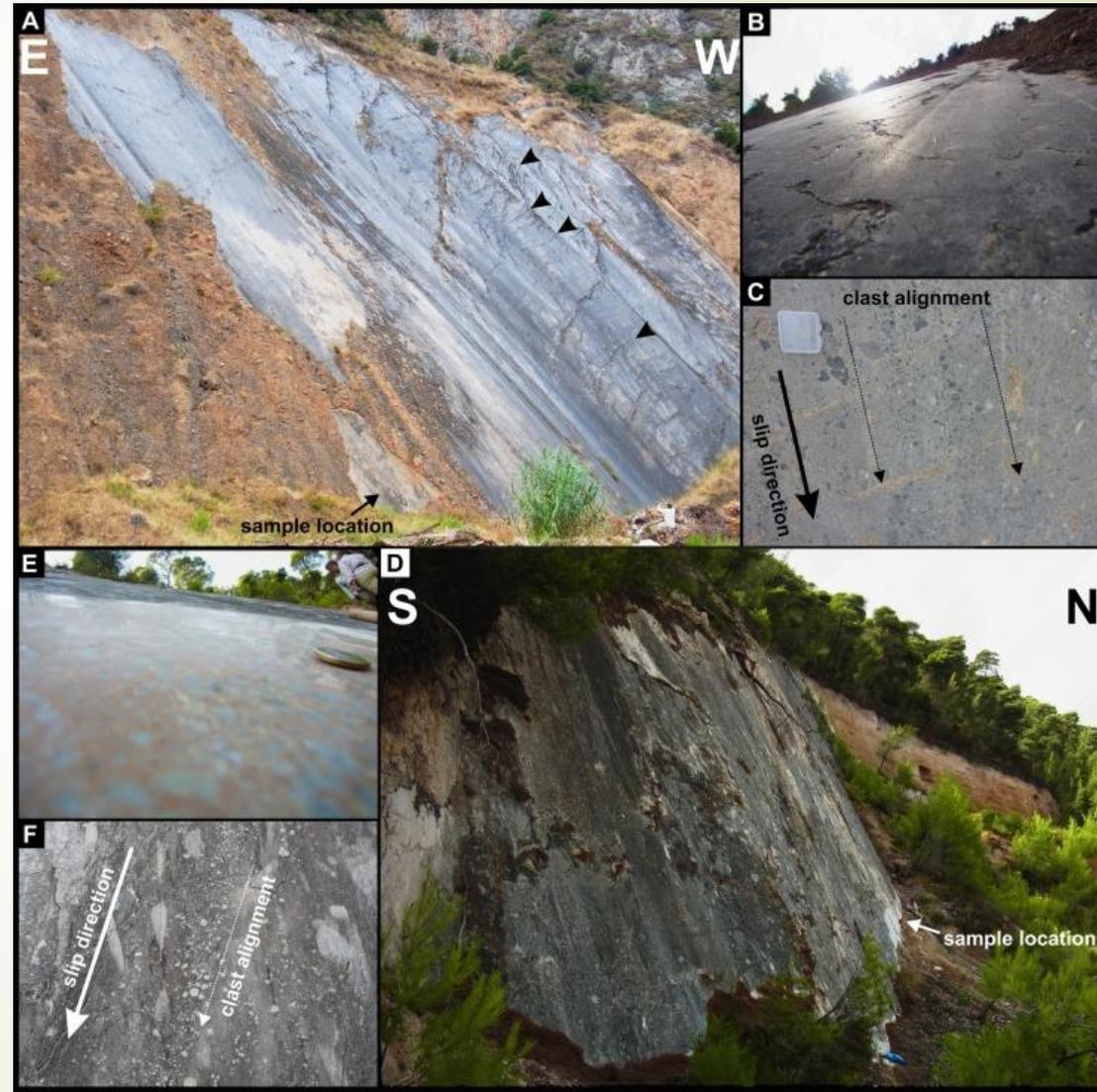


Крупное зеркало скольжения. Фото А.В. Муровской

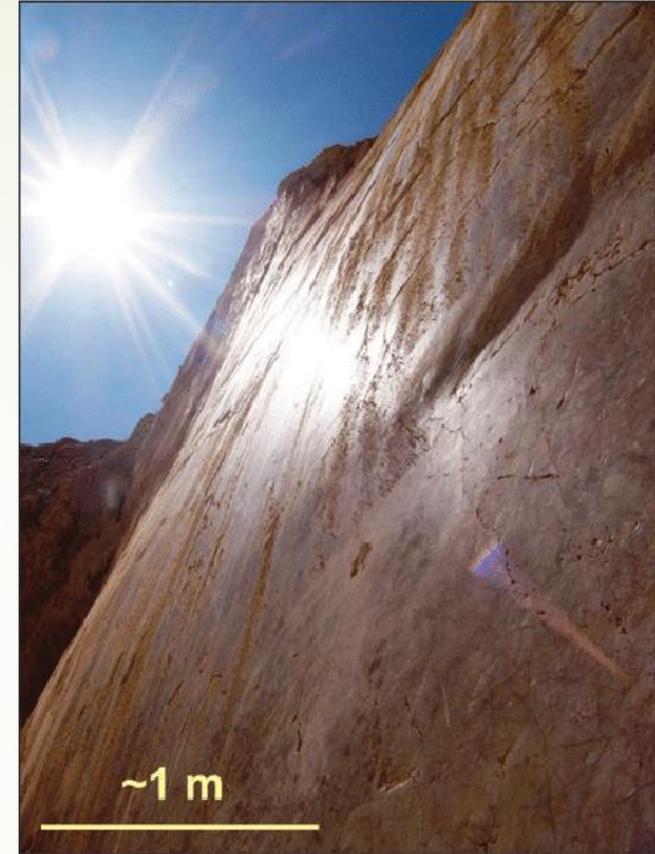
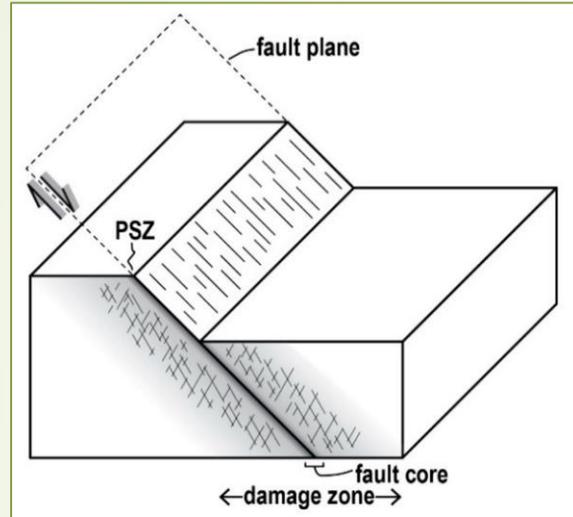
# Зеркала и борозды скольжения

## Зеркала скольжения (*slickenside*)

образуются по сколовым тектоническим нарушениям, и представляют следы относительного перемещения крыльев разрывов (трещин) в виде борозд скольжения, уступов, минерального выполнения и примазок тектонита.



# Крупное зеркало скольжения и схема его формирования



Еще зеркало

*(Интернет-ресурс)*



Борозды (зеркала) скольжения без минерализации.  
Северный Тянь-Шань (*Ребецкий и др., 2017*)



**Скульптуры** («тектоглифы») на поверхности зеркал скольжения представлены:

- уступами (ступени скольжения поверхности зеркал, *slickenfibre steps*), которые в большинстве случаев перпендикулярны направлению относительных смещений;
- штриховками, бороздами или линиями скольжения (*stria*);
- мелкими выемками, ложбинками и желобками («рифли») на поверхности скольжения (*slickenside flutes*).

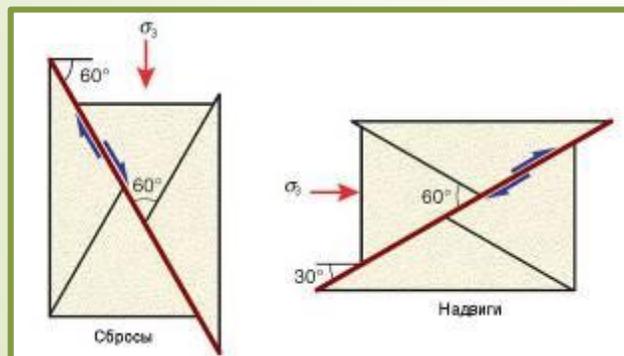
Наиболее сложный вопрос касается определения относительного направления перемещения крыльев зеркала скольжения. Самый простой способ определения основан на образовании уступов на зеркалах скольжения при скольжении с отрывом. Данный способ определения перемещений по зеркалам скольжения хорошо работает в умеренно дислоцированных осадочных толщах, где зеркала скольжения часто выполнены кальцитовой или кварцевой минерализацией. Он известен в структурной геологии как «правило Гофера». Крутые стороны уступов представляют собой небольшие отрывчики, смотрящие в сторону отсутствующего сместившегося блока (*Ребецкий и др., 2017*)

# Классификация тектонических режимов Андерсона

Андерсон выделил три случая общего напряженного состояния в приповерхностных условиях земной коры

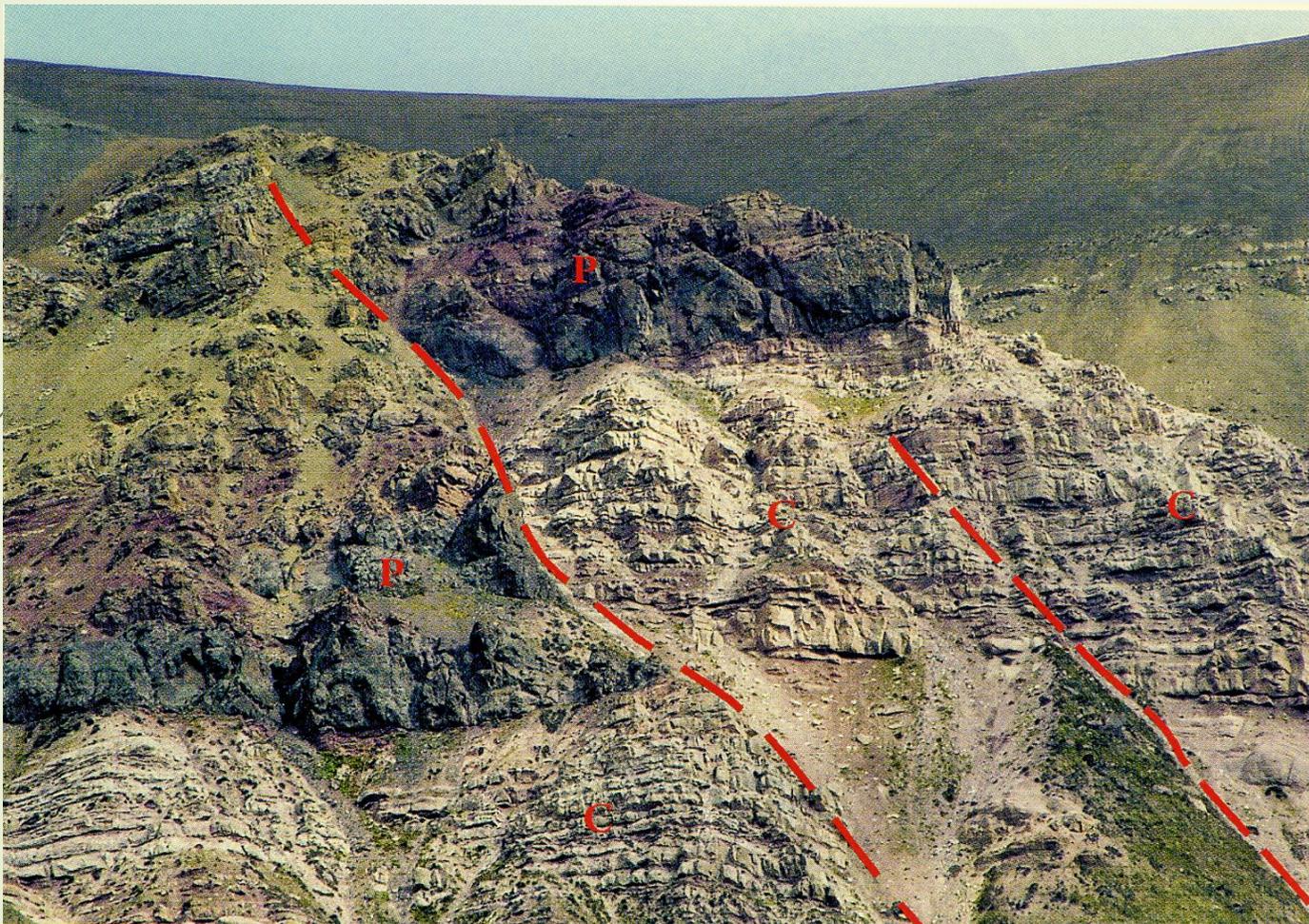


(Fossen, 2011)



Угол между главным сжимающим напряжением и поверхностью разрыва со смещением обычно находится близко к  $30^\circ$ . Этим обусловлены углы наклона сбросов и взбросов.

# Три случая общего напряженного состояния в приповерхностных условиях земной коры (по Андерсону). Примеры структур



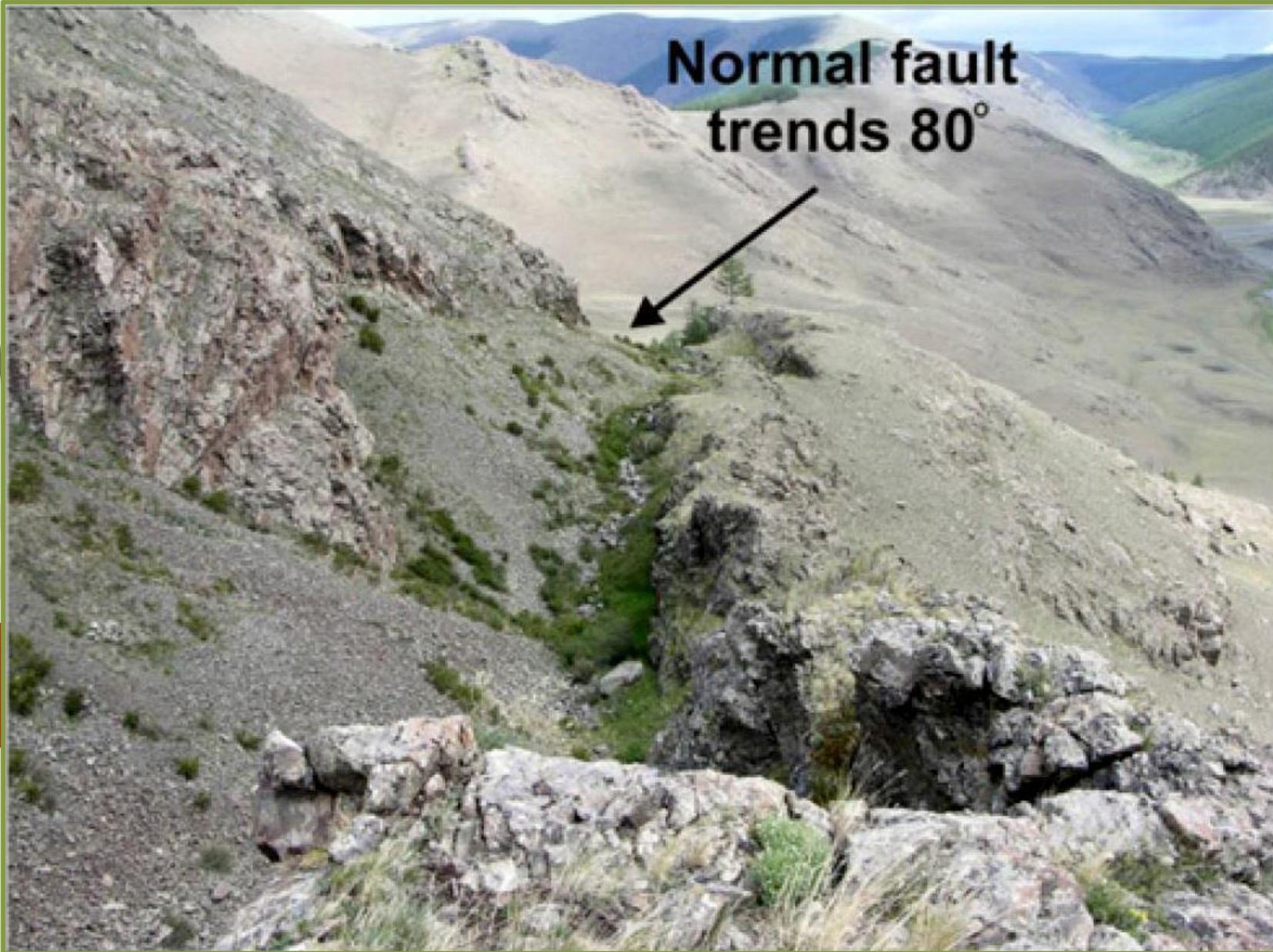
Взбросовый режим

*(Фото А.А. Зарицкова)*



Сдвиговый режим

*(Интернет-ресурс)*



Сбросовый режим

*(Parfeevets, Sankov, 2012)*

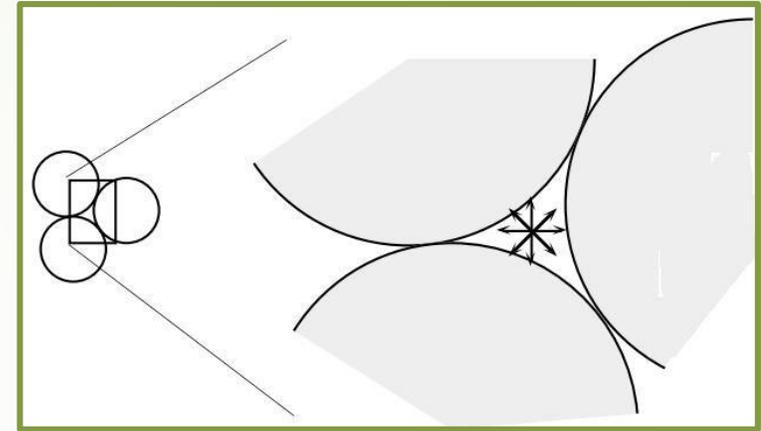
# Влияние высокого порового давления на образование разрывов со смещением

В пористых проницаемых горных породах, насыщенных недренируемой поровой жидкостью под высоким давлением, эффективное напряжение влияет на образование разрывов сильнее, чем полное напряжение. Для этих условий критерий Навье-Кулона можно выразить следующим образом:

$$\tau = \tau_0 - (\sigma - p) \operatorname{tg} \varphi,$$

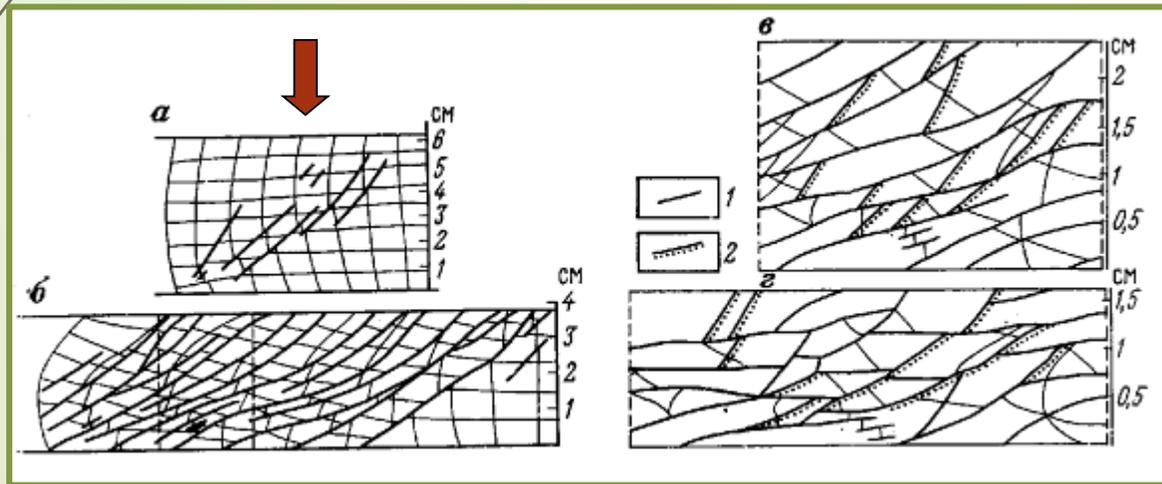
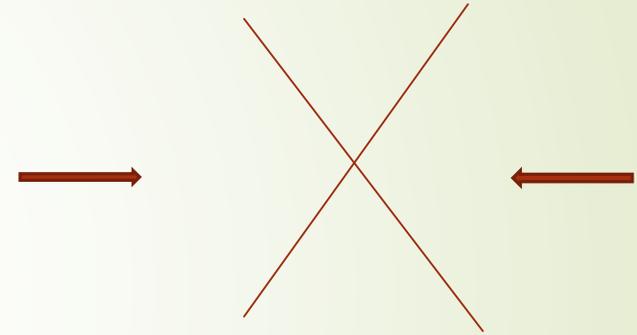
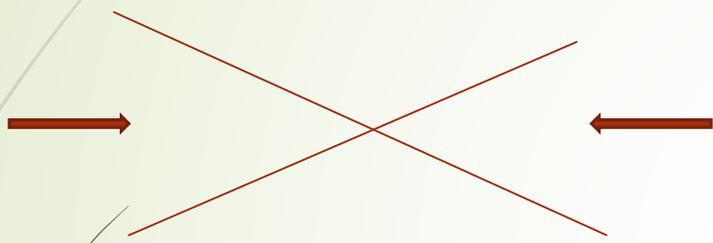
где  $p$  — поровое давление.

Высокое поровое давление уменьшает величину слагаемого, связанного с трением. Таким образом понижается суммарное сопротивление сдвигу и для разрушения залегающих на большой глубине пород требуется меньшее девиаторное напряжение, чем для сухих пород. Этот вывод подтвержден экспериментально.



# Поворот трещин в процессе деформации

Если после возникновения трещин скалывания в некотором теле продолжается деформация этого тела, то трещины могут повернуться и изменить свою ориентировку



*(Методы моделирования, 1988)*

Эксперимент Лаборатории тектонофизики и геотектоники МГУ. Последовательное развитие трещин при сжатии образца. Виден поворот трещин и образование трещин второй генерации

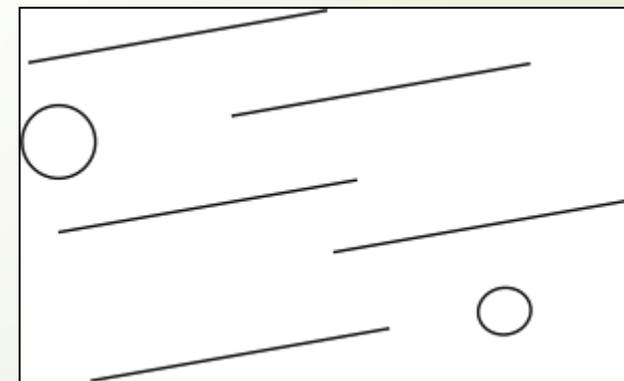
## Задача 33

Дано: трещины скалывания, пересекающиеся под острым углом.  
После образования трещин пластической деформации не было.  
Найти: ориентировку оси максимального сжатия  $\sigma_3$



## Задача 34

На рисунке показано расположение трещин отрыва и недеформированные включения.  
Как ориентированы главные оси напряжений?  
Как располагаются не показанные на рисунке трещины скалывания, если угол скалывания равен  $30^\circ$ ? Зачем привлечена дополнительная информация о включениях?

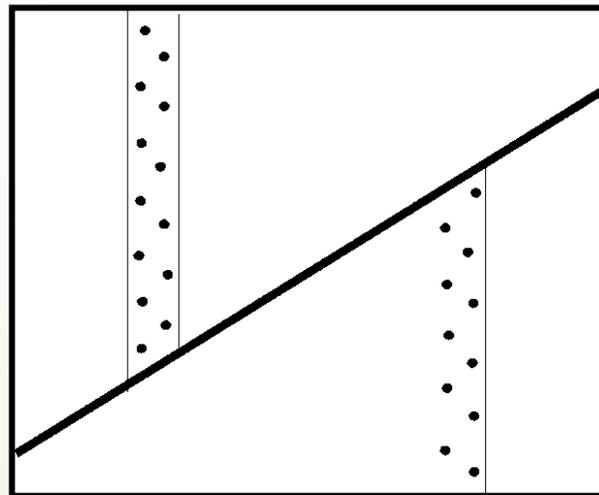


# Задача 35



На рисунке показаны разрывные нарушения, причем поверхности сместителей гладкие и ровные, со следами скольжения параллельно плоскости чертежа. Изобразить секторы, в пределах которых могли располагаться главные оси напряжений, считая, что угол скалывания в горных породах изменяется в пределах от  $15^{\circ}$  до  $40^{\circ}$ .

*Примечание: а) вспомнить, на каких трещинах – отрыва или скалывания – можно видеть следы скольжения; б) для определения ориентировки осей напряжений использовать информацию о направлении сдвига.*



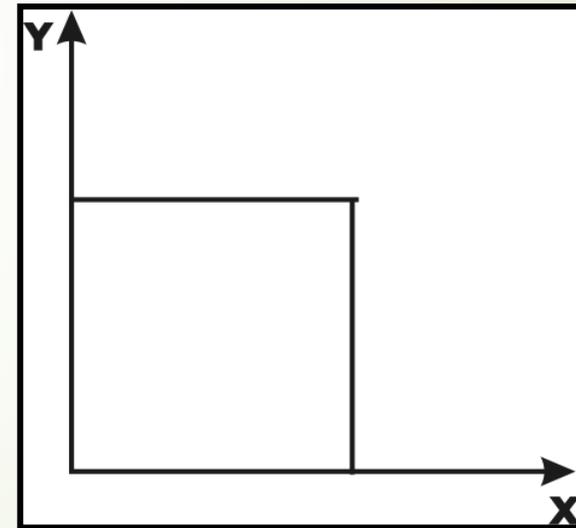
К деформациям (в том числе к образованию трещин) приводит только девиаторное напряжение



## Задача 36

Дано:  $\sigma_{xx} = -250$  МПа;  $\sigma_{yy} = -350$  МПа. Напряженное состояние плоское.  
Определить расположение трещин скалывания (угол скалывания  $30^\circ$ ).

*Примечание: а)  $\sigma_{xx}$  – напряжение, ориентированное параллельно оси  $x$ , приложенное к площадке, перпендикулярной оси  $x$ ;  $\sigma_{yy}$  – напряжение, ориентированное параллельно оси  $y$ , приложенное к площадке, перпендикулярной оси  $y$ ; б) вспомнить, какие напряжения вызывают деформацию и какова ориентировка трещин по отношению к осям этих напряжений*





*Фото Д.С. Зыкова*