

Структурная геология и геологическое картирование

Лекция № 11

«Модели формирования разрывов»

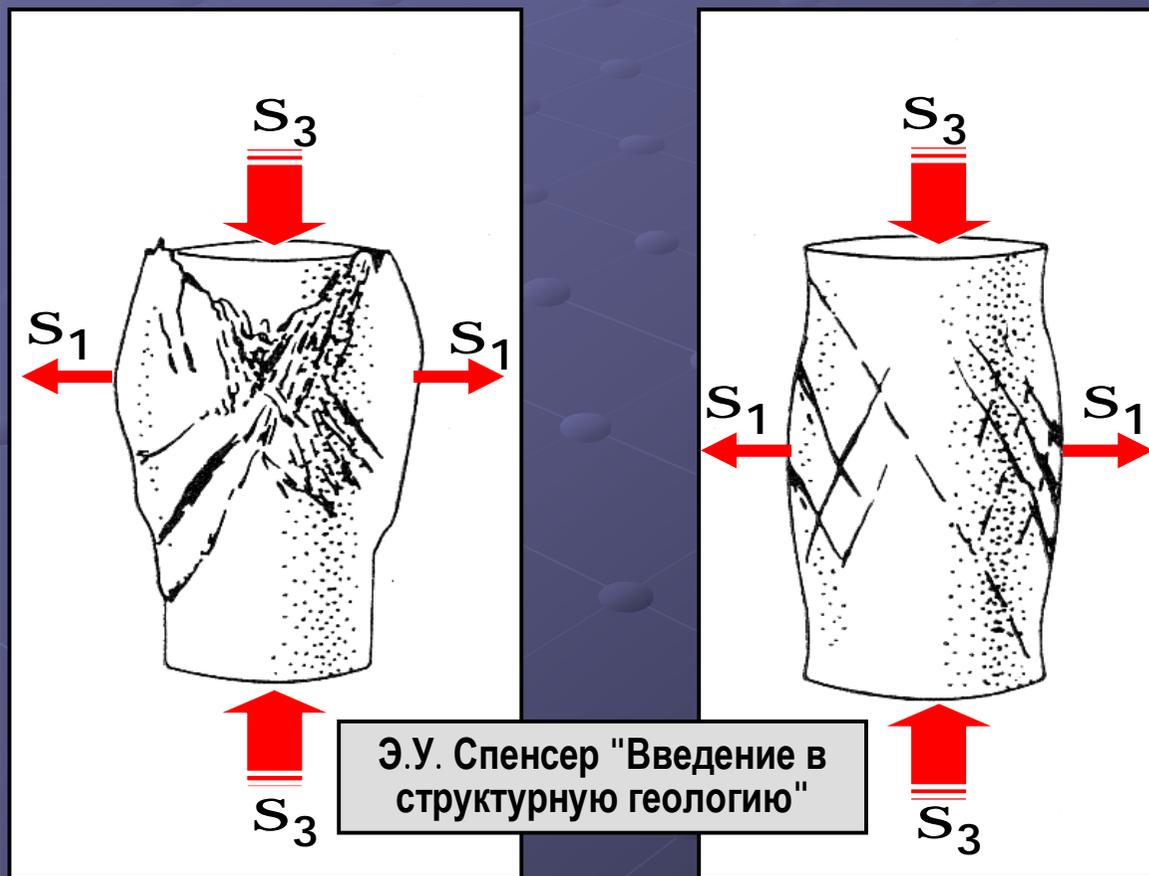
Предварительные замечания

Существует **три** основных модели формирования разрывных нарушений:

- **модель Кулона-Андерсона** – формирование систем разрывов в механической обстановке **чистого сдвига** (блоки перемещаются параллельно самим себе, без ротации, под действием нормальных напряжений!)
- **модель Риделя** – формирование систем разрывов в механической обстановке **простого сдвига** (блоки перемещаются, испытывая ротацию, под действием тангенциальных напряжений!)
- **модель Вильсона** – формирование трансформных и других разломов, согласующих движения в зонах разрастания и поглощения

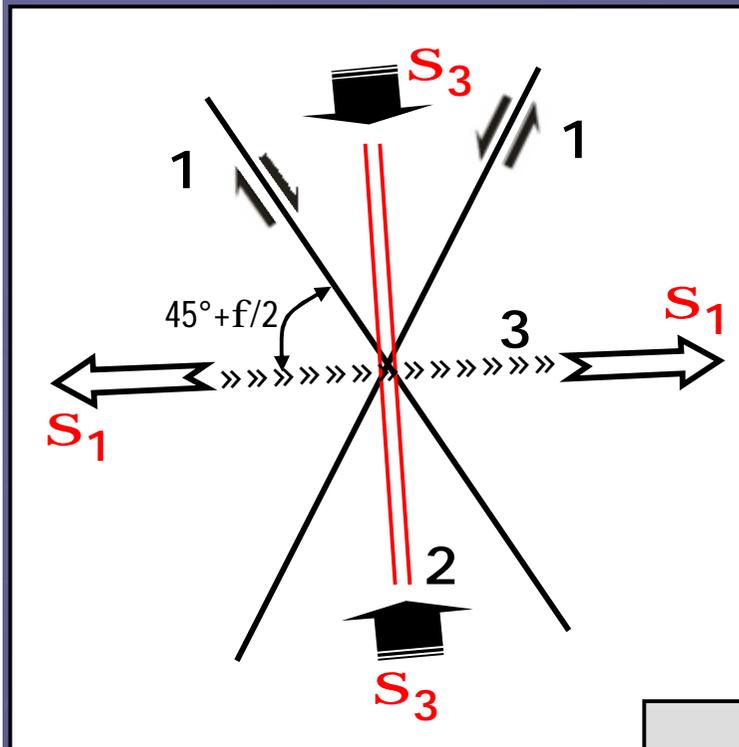
Разрывы в эксперименте

При раздавливании образцов и преодолении предела прочности в первую очередь образуются **трещины скалывания**, косые по отношению к приложенным силам, их формирование **наиболее выгодно энергетически**, поскольку модуль сдвига для твердых тел в **2-3 раза меньше** модуля Юнга!



Для формирования разрыва со смещением надо преодолеть не только силу сцепления между зернами, но и **силу трения** между возникшими блоками. Образец укорачивается по направлению сжатия (S_3) и удлиняется по направлению растяжения (S_1)

Модель Кулона – Андерсона

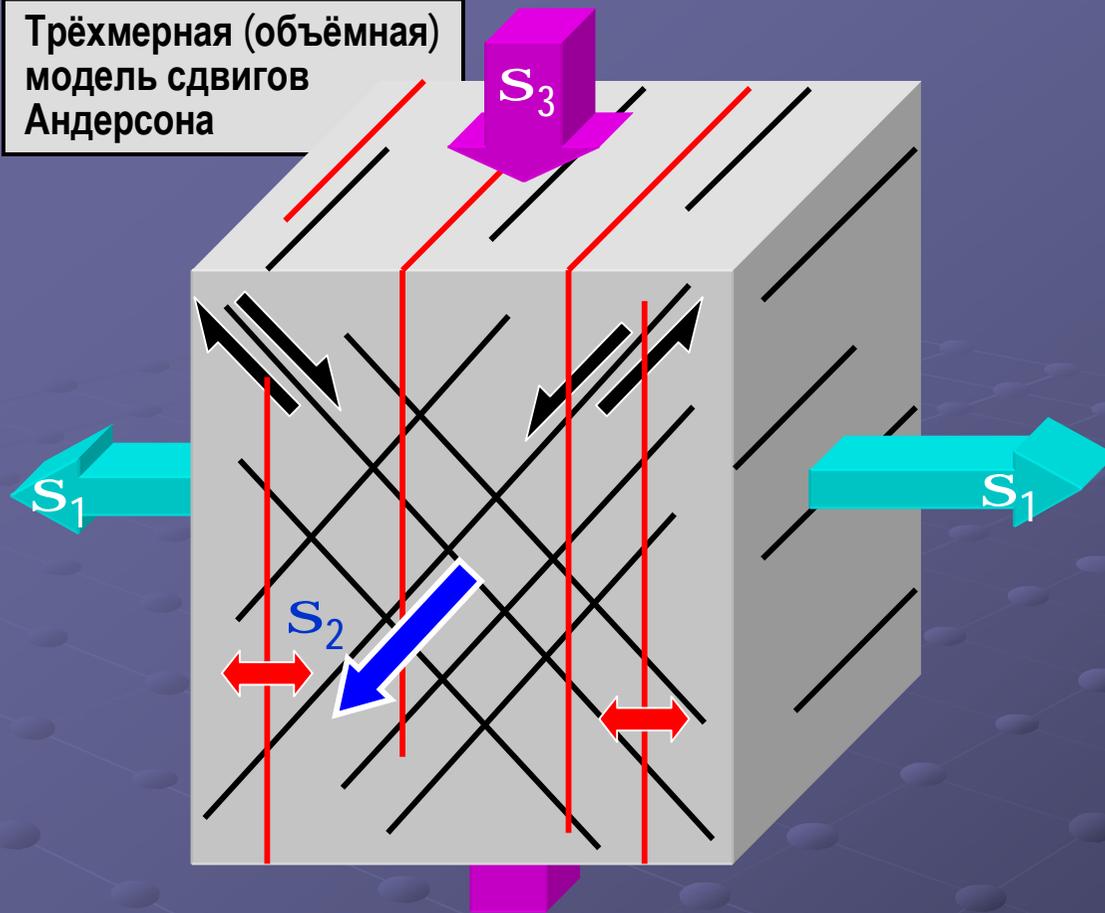


Двухмерная (плоская)
модель сдвигов Андерсона

Механизм чистого сдвига был первоначально предложен Андерсоном (Anderson, 1905) для объяснения ориентировки разломов в трехосном поле напряжений в однородной среде. Для разрывов сдвиговой кинематики этот механизм предполагает, что сопряженная система комплементарных **левых и правых сколов** будет формироваться **симметрично** относительно направления сокращения под углом $(90-f)^\circ$, где f – угол внутреннего трения

- 1 – сопряженные трещины скалывания образуют **острый угол**, биссектриса которого совпадает с направлением **минимального главного нормального напряжения** – S_3 (сжатия);
- 2 – трещины растяжения образуются ортогонально к **максимальному главному нормальному напряжению** – S_1 (растяжению);
- 3 – участки сжатия образуются ортогонально к **минимальному главному нормальному напряжению** – S_3 (сжатию)

Трёхмерная (объёмная)
модель сдвигов
Андерсона



Таким образом, в модели
Андерсона сдвиги и отрывы
всегда строго ориентированы
относительно главных
нормальных напряжений и не
меняют своей ориентировки
при развитии дислокаций

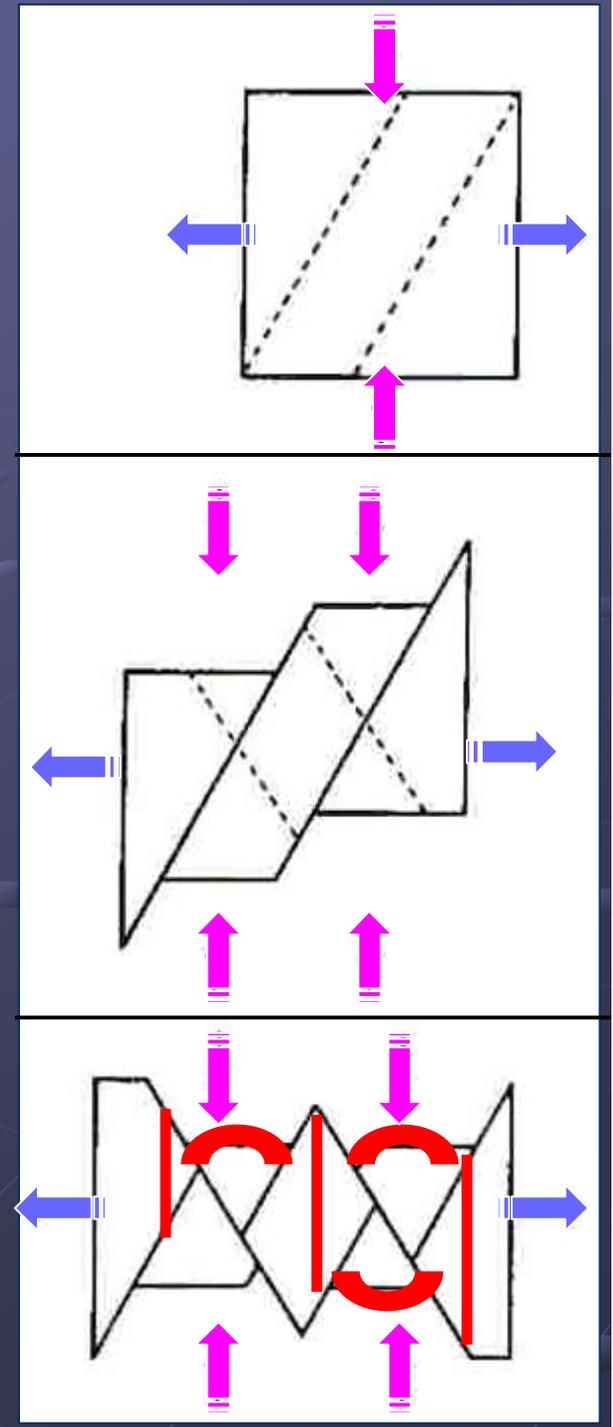
2 – **отрывы** (трещины
растяжения) образуются
ортогонально к направлению
растяжения – **максимальному
главному нормальному
напряжению (S_1)** и лежат в **главной
плоскости напряжений $S_2 - S_3$**

1 – сопряженные **левые и правые сдвиги** (трещины скальвания) образуют:
а) острый угол, биссектриса которого совпадает с направлением сжатия –
минимального главного нормального напряжения (S_3) и лежит в **главной плоскости
напряжений $S_2 - S_3$,**
б) тупой угол, биссектриса которого совпадает с направлением растяжения –
максимального главного нормального напряжения (S_1) и лежит в **главной плоскости
напряжений $S_2 - S_1$;**
в) линии пересечения сколов совпадают направлением **среднего главного
нормального напряжения (S_2)**

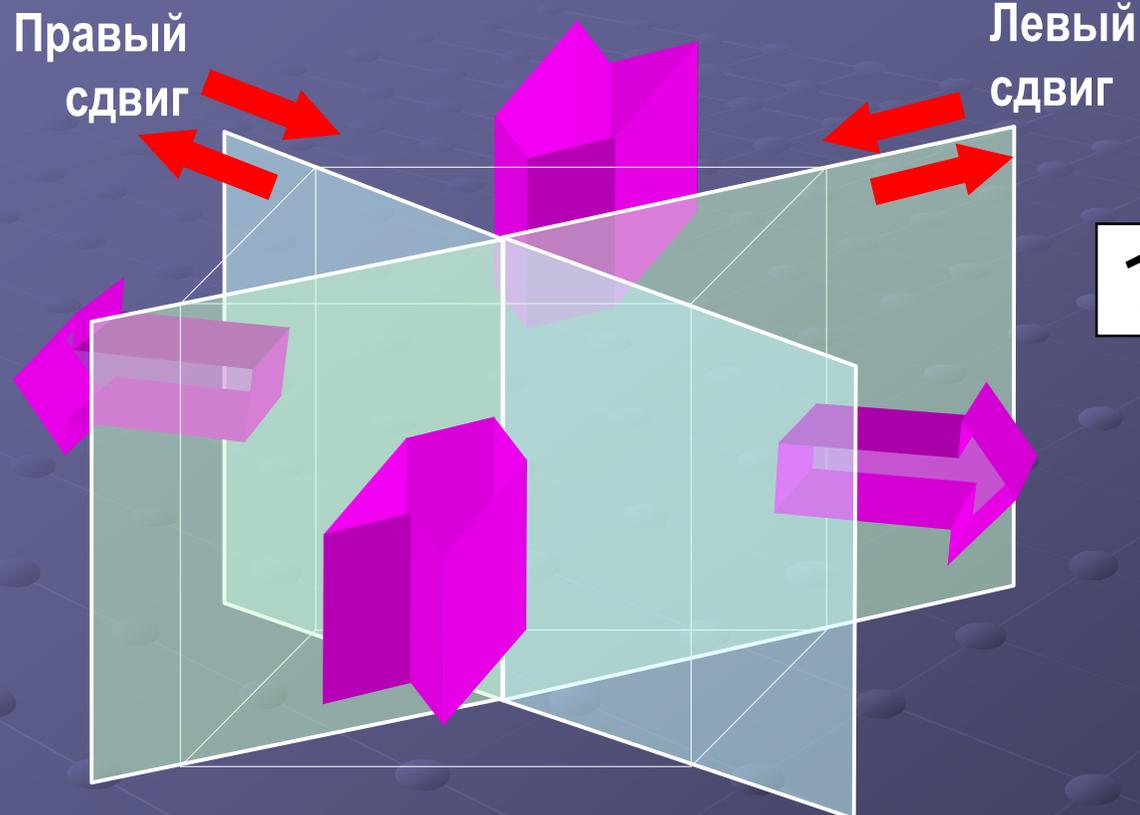
Блоки, ограниченные сколами, перемещаются параллельно самим себе. В целом происходит **удлинение** деформируемого объема в направлении **максимального напряжения (s_1)** и **укорочение** в направлении **минимального напряжения (s_3)**

Сопряженные разломы могут компенсировать неротационную компоненту деформации до тех пор, пока они действуют **одновременно**, иначе возникает проблема пространства, которая может быть решена только ротацией и изменением направления скольжения на каждом из сопряженных сдвигов.

Трещины растяжения | или сбросы будут формироваться перпендикулярно к оси удлинения, а складки и надвиги  – перпендикулярно к оси сокращения.

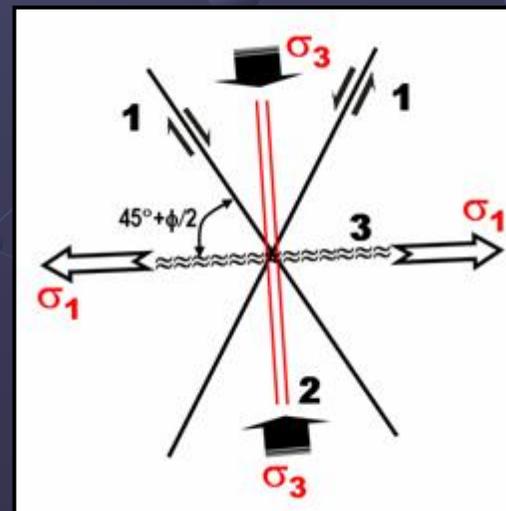


Реконструкция полей напряжения в механических условиях чистого сдвига

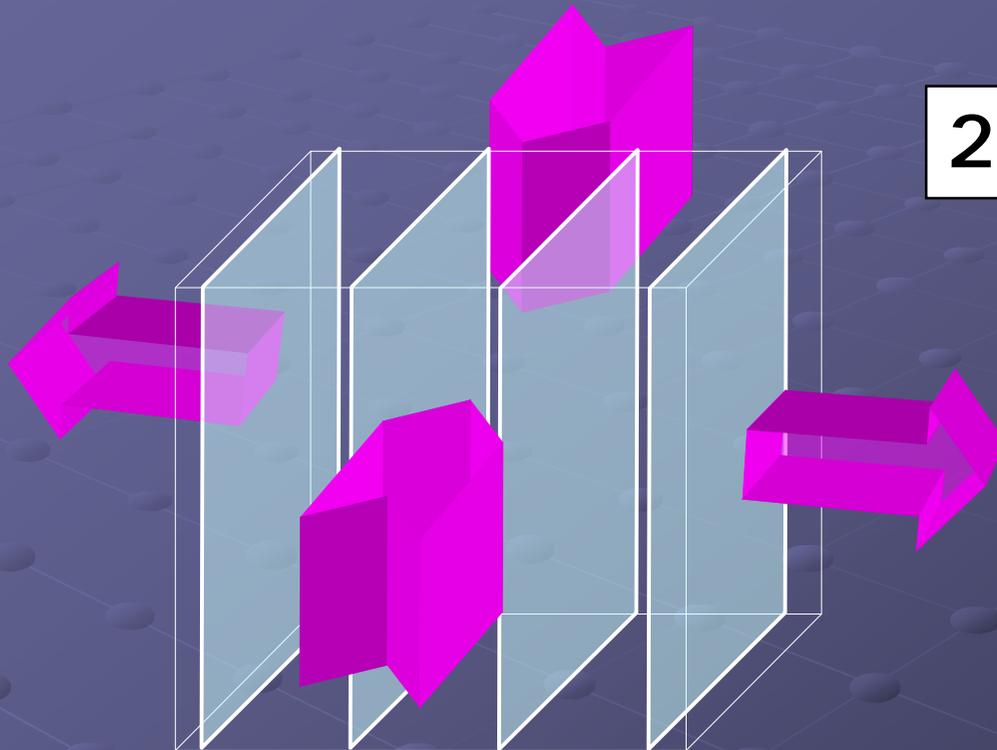


- 1 При разрушении породы формирование **сколов** (в данном случае – сдвигов) наиболее выгодно **энергетически!**

Реальное положение конкретных трещин в пространстве может отличаться от теоретического (иногда весьма существенно) в силу неоднородности деформируемой породы. Поэтому для них обычно определяют среднестатистическое значение

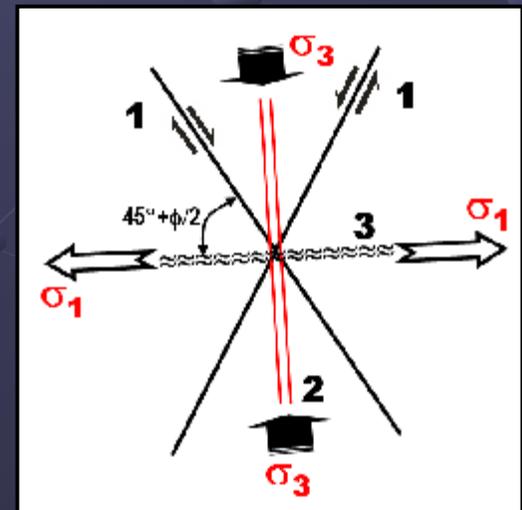


Реконструкция полей напряжения в механических условиях чистого сдвига

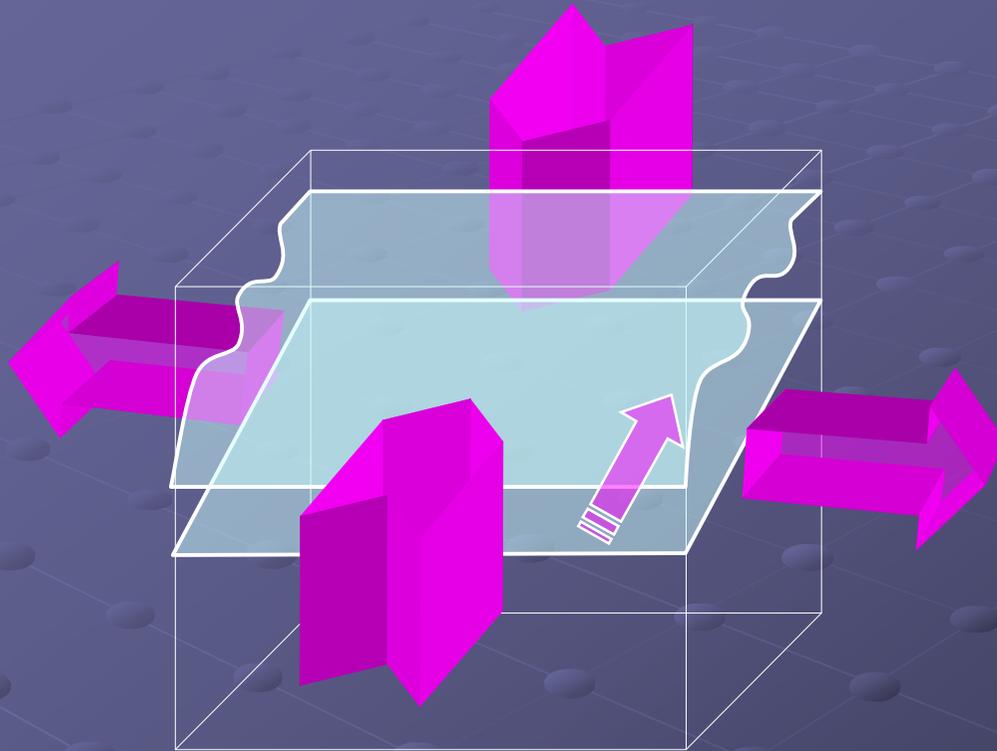


2 Кроме сколов в условиях чистого сдвига перпендикулярно растяжению формируются **трещины отрыва**, которые заполняются гидротермальными минералами (кварц, кальцит и пр.)

Реальное положение конкретных трещин в пространстве может отличаться от теоретического (иногда весьма существенно) в силу неоднородности деформируемой породы. Поэтому для них обычно определяют среднестатистическое значение

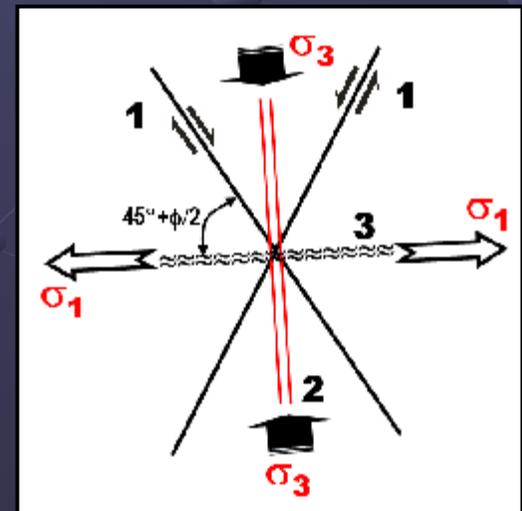


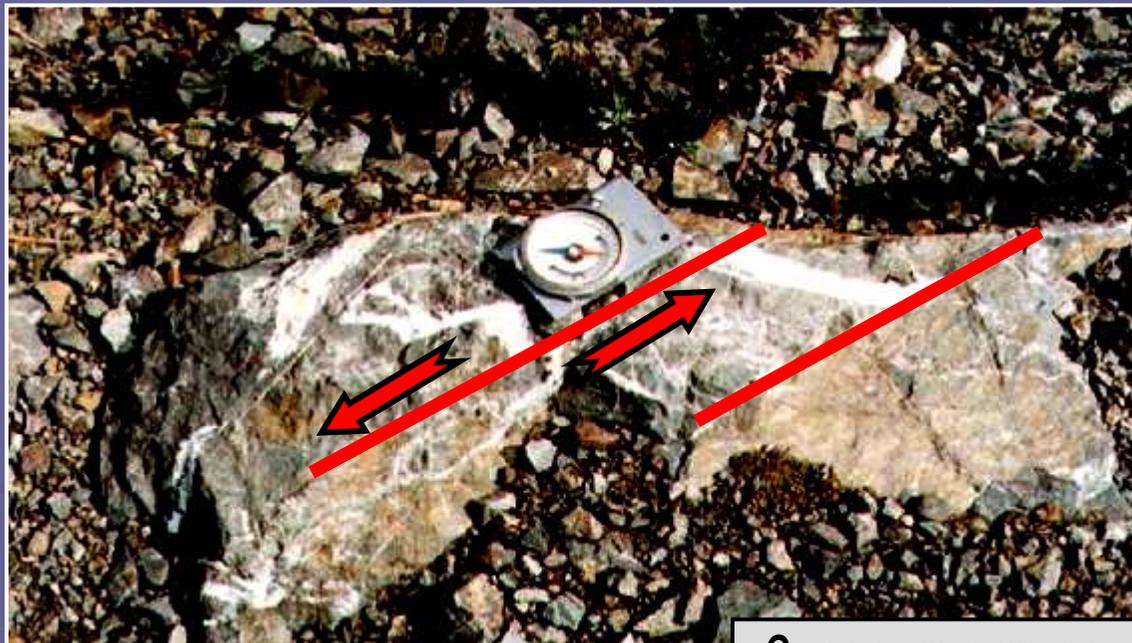
Реконструкция полей напряжения в механических условиях чистого сдвига



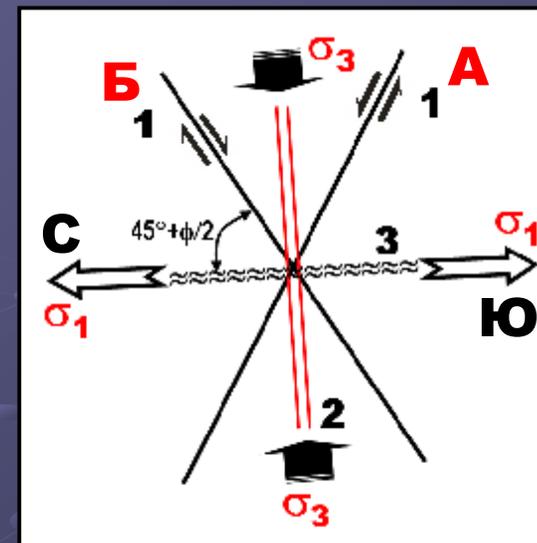
3

Кроме сколов и отрывов в условиях чистого сдвига перпендикулярно сжатию формируются **надвиги** и **складки**





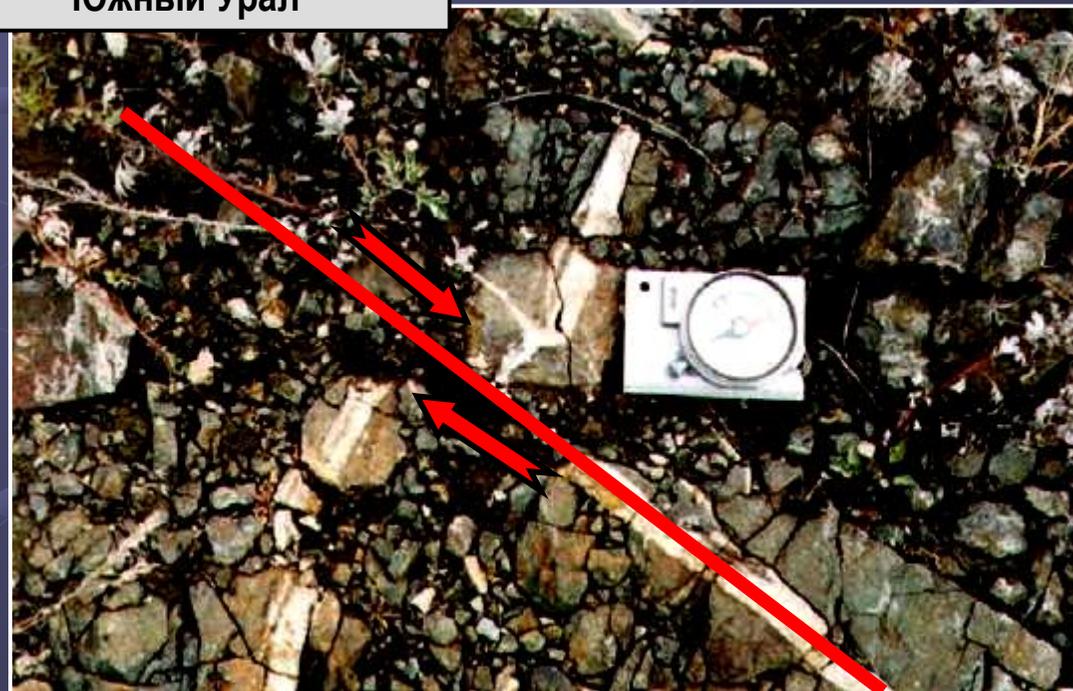
А. Левый сдвиг СЗ простирания



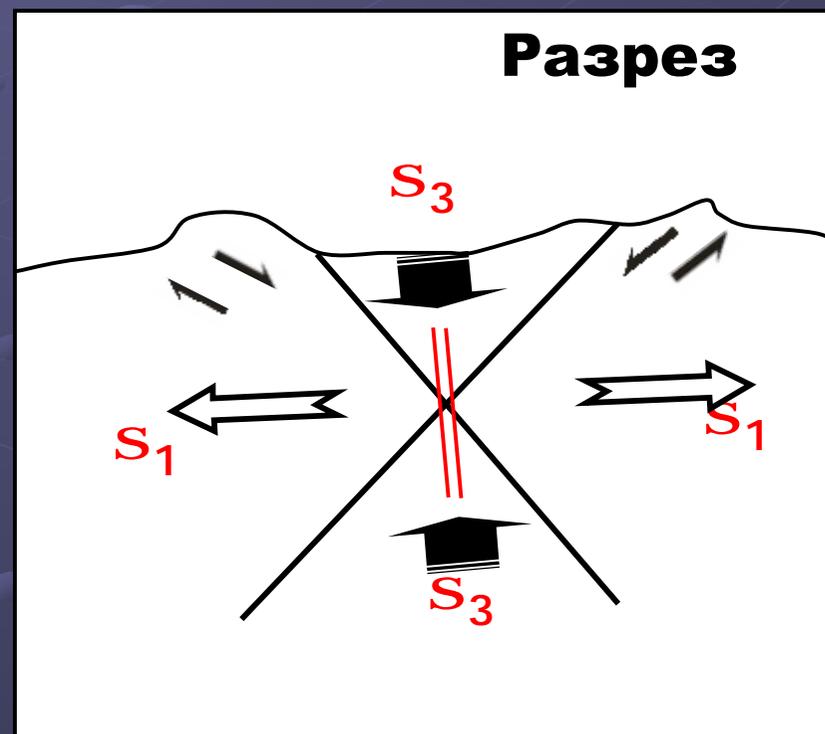
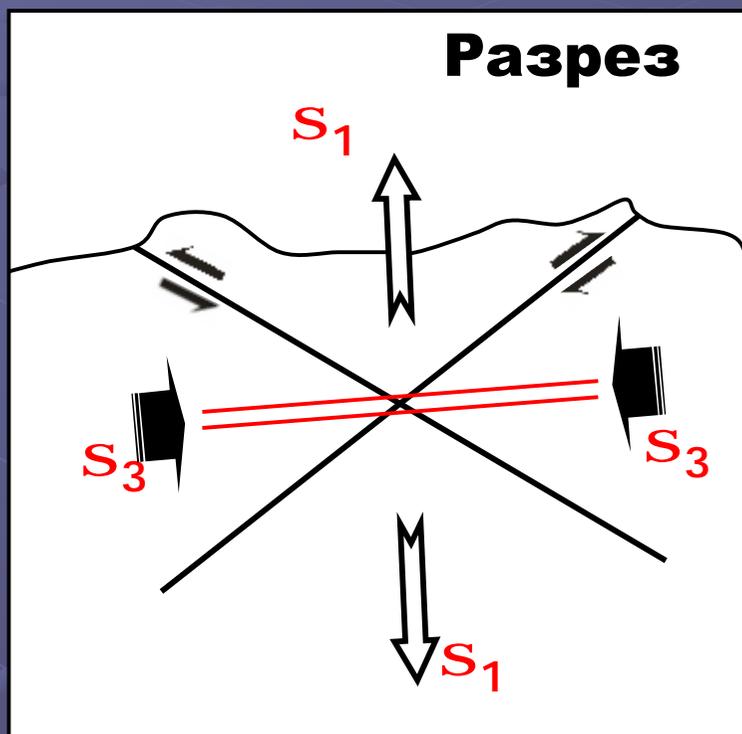
Смещение кварцевых жил по сдвигам Андерсона.
Южный Урал

Сдвиги Андерсона длительное время рассматривались как единственный возможный тип сдвиговых разрывов именно потому, что они просты для понимания и во многих случаях хорошо объясняют крупно- и средномасштабные перемещения в различных регионах.

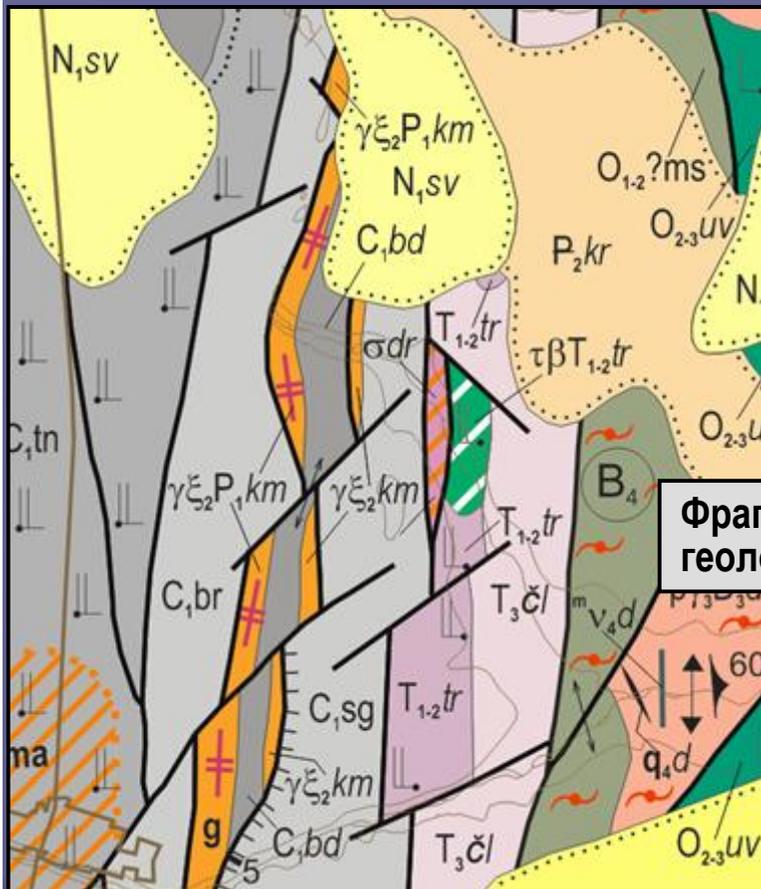
Б. Правый сдвиг СВ простирания



NB! "Сдвиги" (сколы) Андерсона отвечают морфологическому типу разрывов "сдвиги" только при **горизонтальной** ориентировке главных **и минимального, и максимального** напряжений! При вертикальной ориентировке S_1 эти сколы будут "взбросами", а при вертикальной ориентировке S_3 – "сбросами"



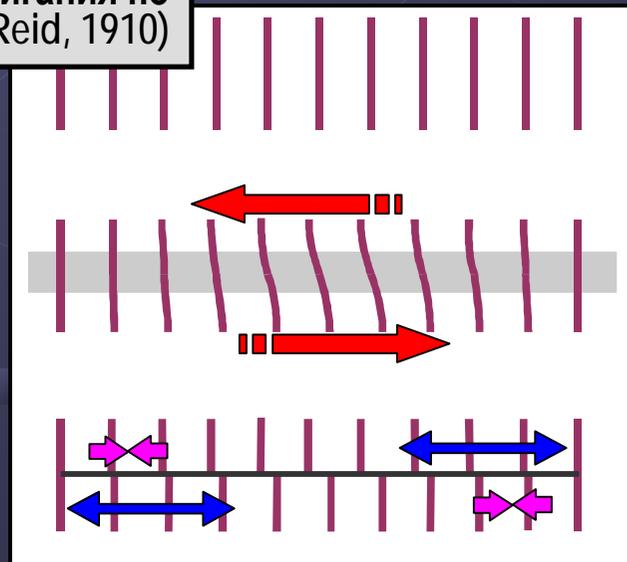
Механизмы сдвига при чистом сдвиге



Фрагмент Государственной геологической карты Южного Урала

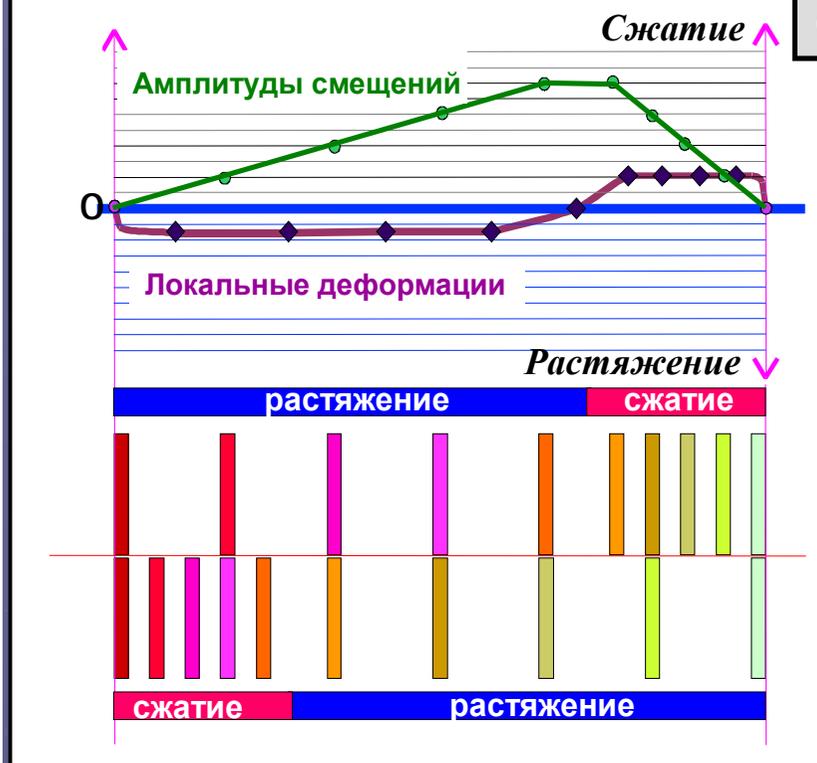
Разрывы на геологических картах имеют конечные размеры. Это не только и даже не столько результат рисовки карты – разрывы действительно **имеют конечную длину**, т.е. на концах этих разрывов никакого смещения нет, а в середине – есть!

Механизм сдвига по Андерсону – Риду (Reid, 1910)



Сдвиги Андерсона являются сколами. Согласно механизму, разработанному самим Андерсоном, они имеют конечную длину, а поэтому вдоль всей трассы андерсоновского сдвига в его крыльях формируются пары структур: **растяжения** и **сжатия**.

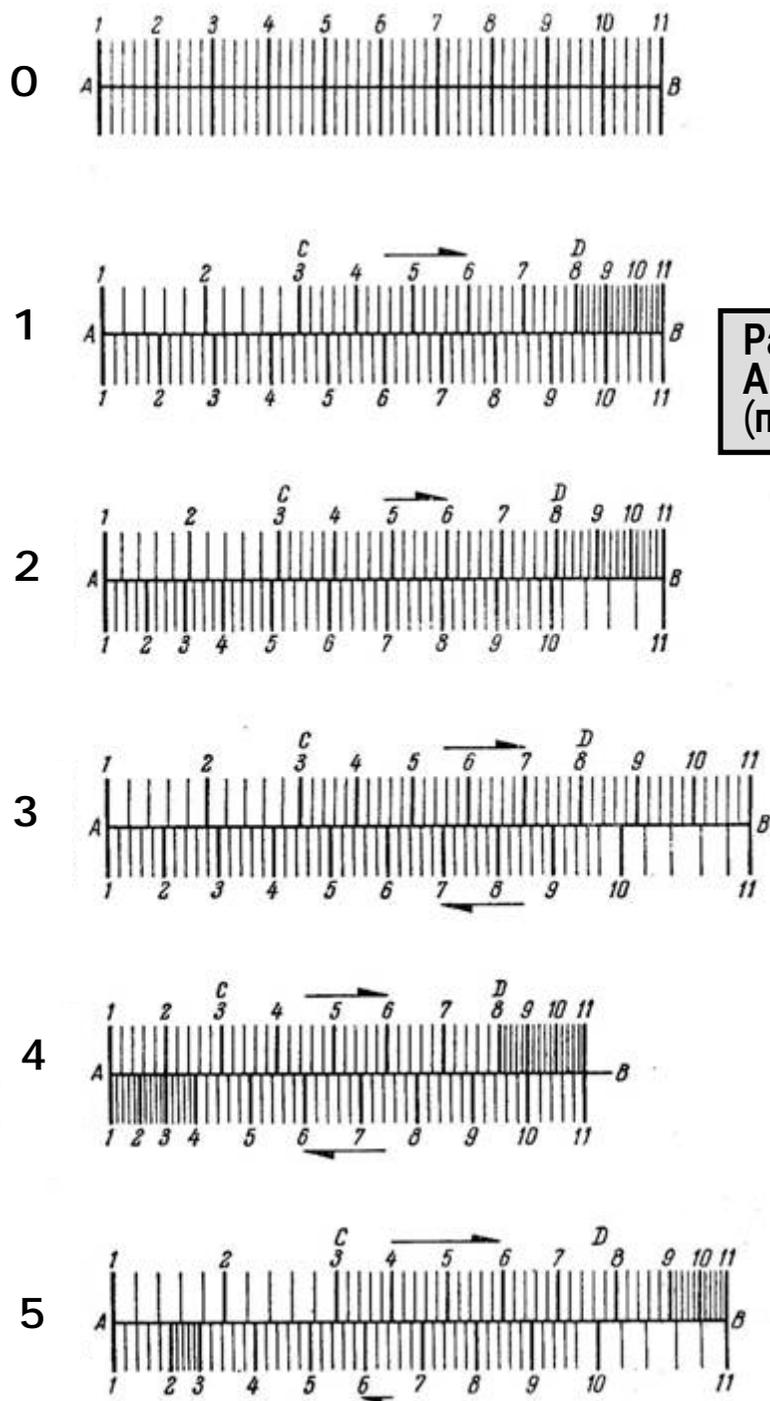
Распределение амплитуд смещений и условных величин деформаций вдоль зоны андерсоновского сдвига (по Арк.В. Тевелеву, 2005)



Амплитуда такого сдвига **максимальна** в его середине, и **равна нулю** на концах. Но локальные деформации в крыльях идеального андерсоновского сдвига распределены неравномерно – участок с деформациями сжатия примерно в 2 раза короче участка с деформациями растяжения. Максимальные смещения расположены именно там, где деформации растяжения в крыле сдвига сменяются деформациями сжатия.

В природе такая простая картина наблюдается редко, поскольку реальная **среда неоднородна**, а ее механическое поведение в значительной степени зависит от внутренней структуры (В.Г. Талицкий, 1991).

Таким образом, андерсоновский сдвиг является **активной структурой**, контролирующей развитие вторичных (**пассивных**) по отношению к нему структур сжатия и растяжения.



Следствием сдвигообразования может быть не только произвольное распределение структур сжатия и растяжения в крыльях разлома, но и изменение его длины.

Распределение деформаций в крыльях сдвига Андерсона в разных условиях деформирования (по Буртману, Лукьянову и др., 1963).

0 – исходное состояние;

1 – простой случай: деформируется только одно крыло, длина разлома постоянна;

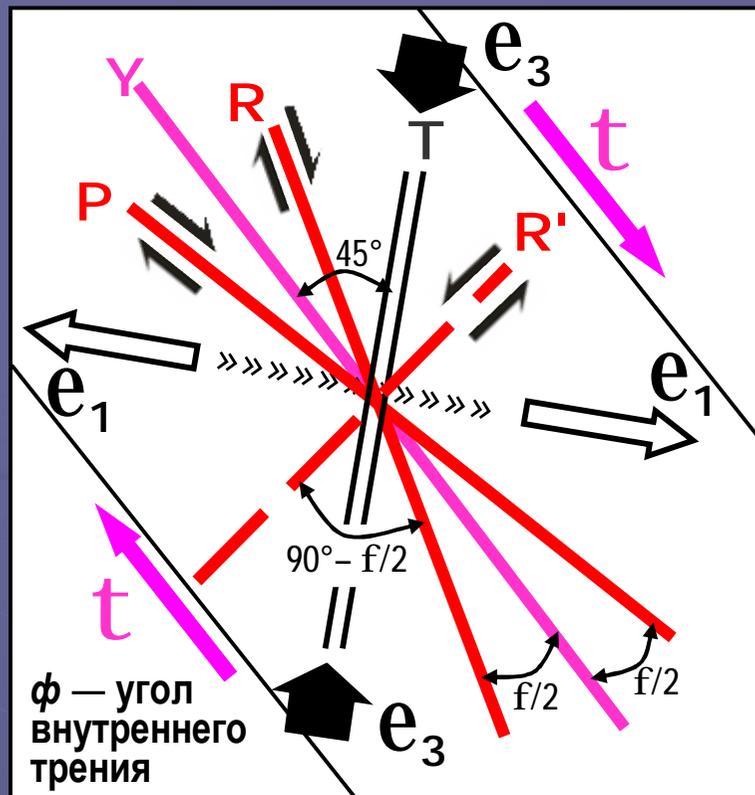
2 – простой случай (близок к идеальному): деформируются оба крыла (у конца разлома в одном крыле происходит сжатие, а в противоположном – растяжение), длина разлома постоянна;

3 – весь разлом находится в зоне растяжения, деформируются оба крыла, длина разлома увеличивается;

4 – весь разлом находится в зоне сжатия, деформируются оба крыла, длина разлома уменьшается;

5 – комбинированный случай.

Модель Риделя



Механизм простого сдвига был первоначально предложен В. Риделем (Riedel, 1929) для объяснения ориентировки разломов в однородной среде при **преобладании тангенциальных (касательных) напряжений**. В таких условиях возникают серии **синтетических** (совпадающих по направлению смещения с главным сдвигом) и **антитетических** (с противоположным смещением) **сдвигов** (трещин скалывания).

Y – разломы, параллельные направлению **максимальных тангенциальных напряжений** (Y-сколы, или **генеральные сдвиги**). В данном случае – **правые!**

R – R-сколы, или сколы Риделя (синтетические сдвиги под $\pm\phi/2$ к направлению генерального сдвига). В данном случае – тоже **правые!**

P – P-сколы, или вторичные сколы Риделя (синтетические сдвиги под $\pm\phi/2$ к направлению генерального сдвига). В данном случае – тоже **правые!**

R' – сопряженные риделевские сколы (антитетические сдвиги).

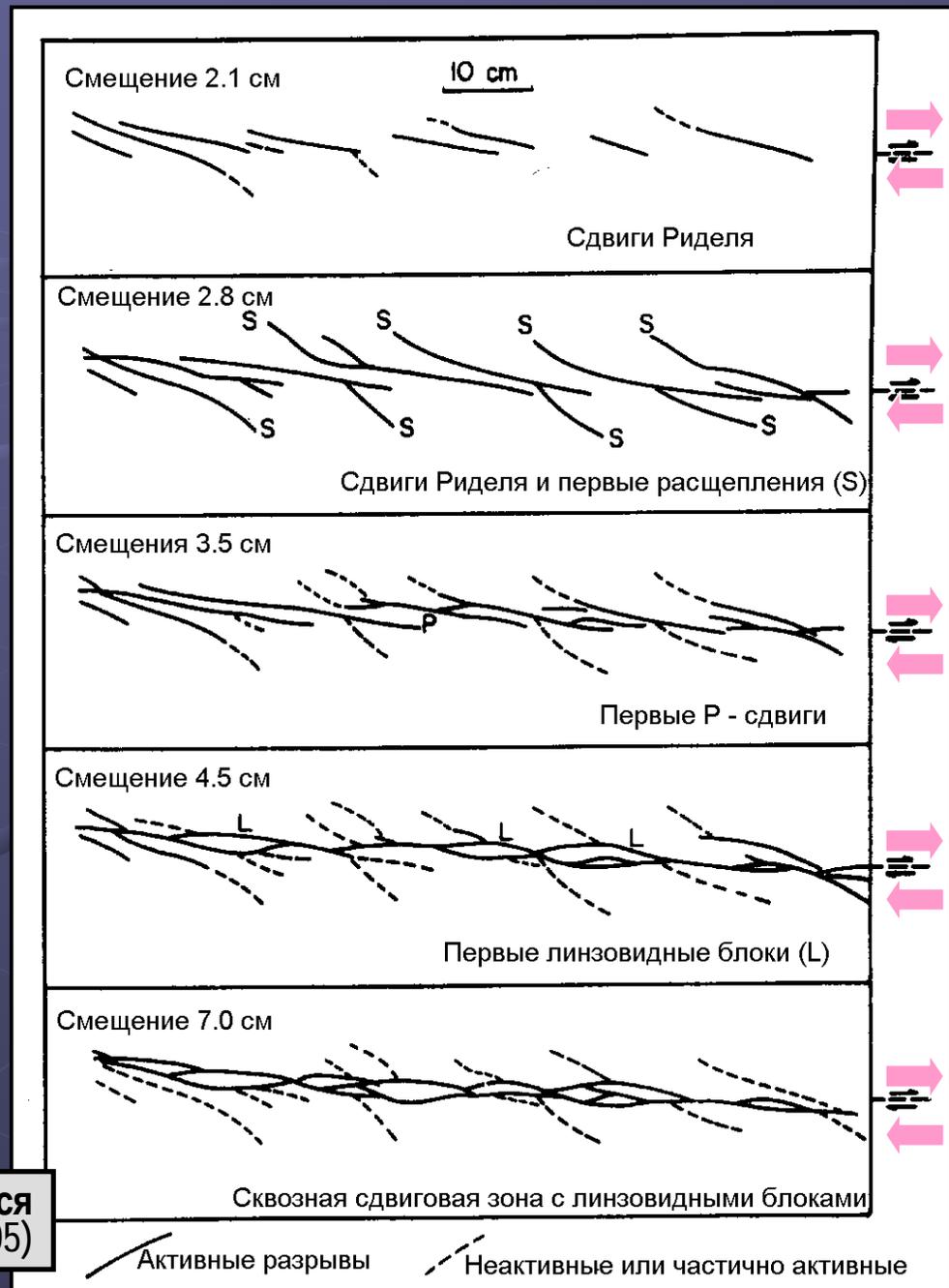
В данном случае – **левые!**

T – трещины отрыва (развиваются под $\pm 45^\circ$ к основной зоне смещения образуются ортогонально к **максимальному главному нормальному напряжению**

В лабораторных экспериментах обычно моделируется жесткий фундамент, включающий разлом (например из двух жестких досок), перекрытый покровом осадочных пород (обычно это слой глины).

Первыми структурами в перекрывающей глине оказываются эшелонированные сколы Риделя, причем их кулисное расположение прямо зависит от направления сдвига в подстилающих досках – они образуют **левокулисное** перекрытие **при правом сдвиге** и **правокулисный ряд** **при левом сдвиге**.

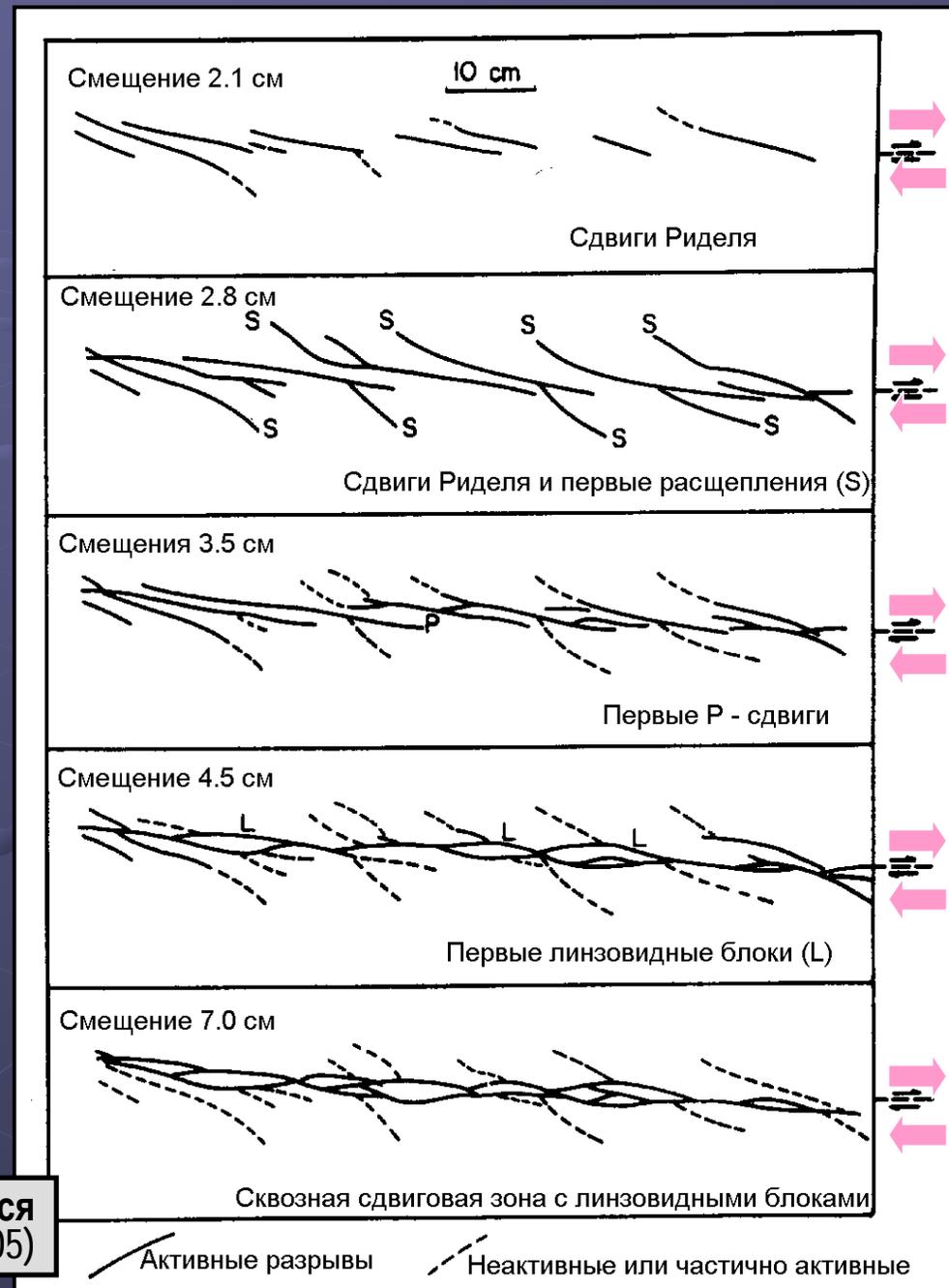
В.Г. Талицкий, 1991 (цитируется по Арк.В. Тевелеву, 2005)



Направление сдвигания вдоль сколов R, P, Y то же самое, что и в разломе фундамента, а в R' — противоположное.

Все разломы, исключая надвиги, близки к вертикальным во время образования. Сколы R и R' составляют с основной зоной смещения углы $\phi/2$ и $90^\circ - \phi/2$ соответственно, где ϕ — угол внутреннего трения.

Это обозначает, что риделевские сколы ориентированы под углом от 15° до 20° к зоне главного смещения, а R' — под углом от 60° до 75° .

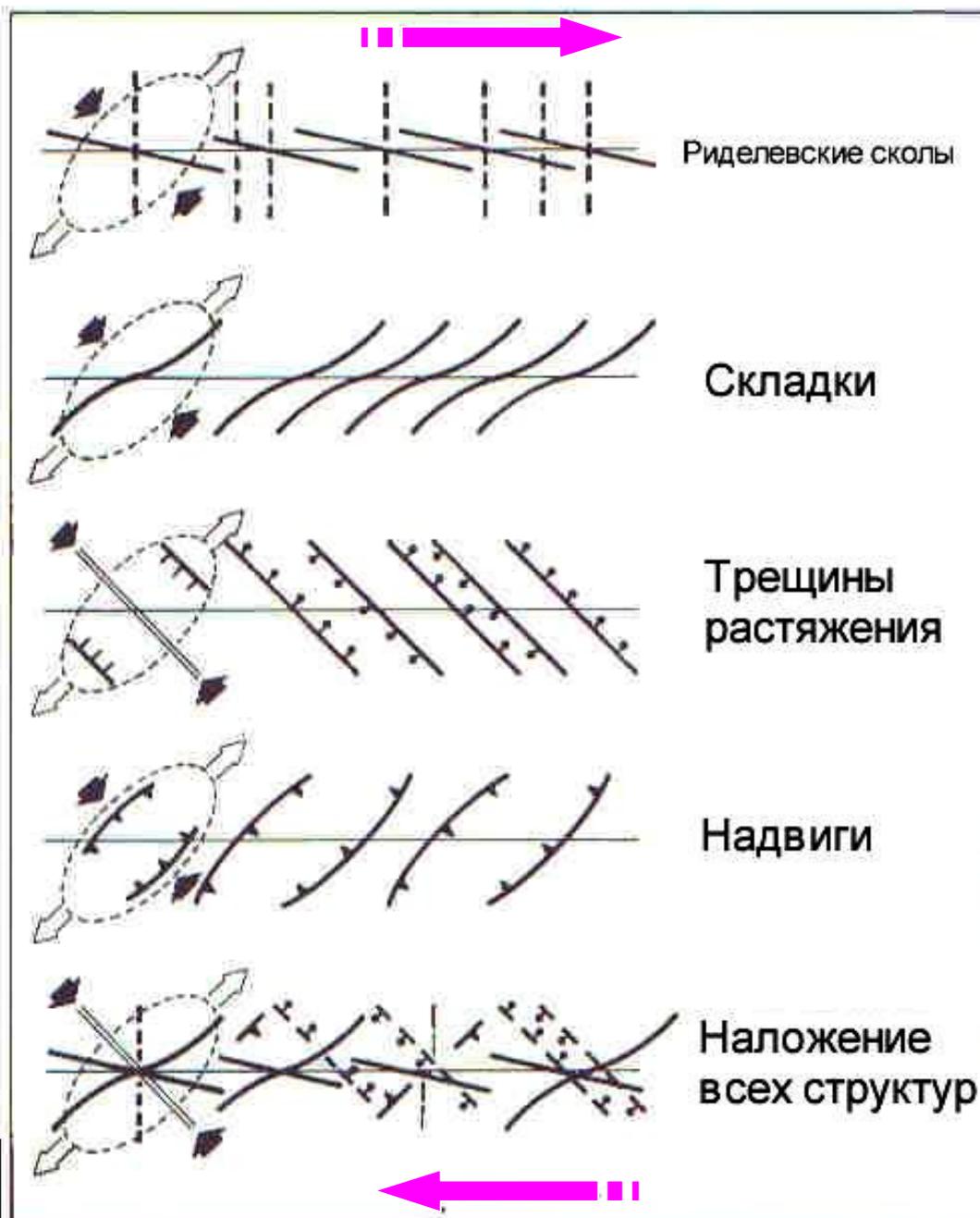


Талицкий, 1991 (цитируется по Арк.В. Тевелеву, 2005)

Полный набор структур,
сформированных в
условиях простого

сдвига:

- риделевские сколы,
- складки,
- сбросы,
- надвиги

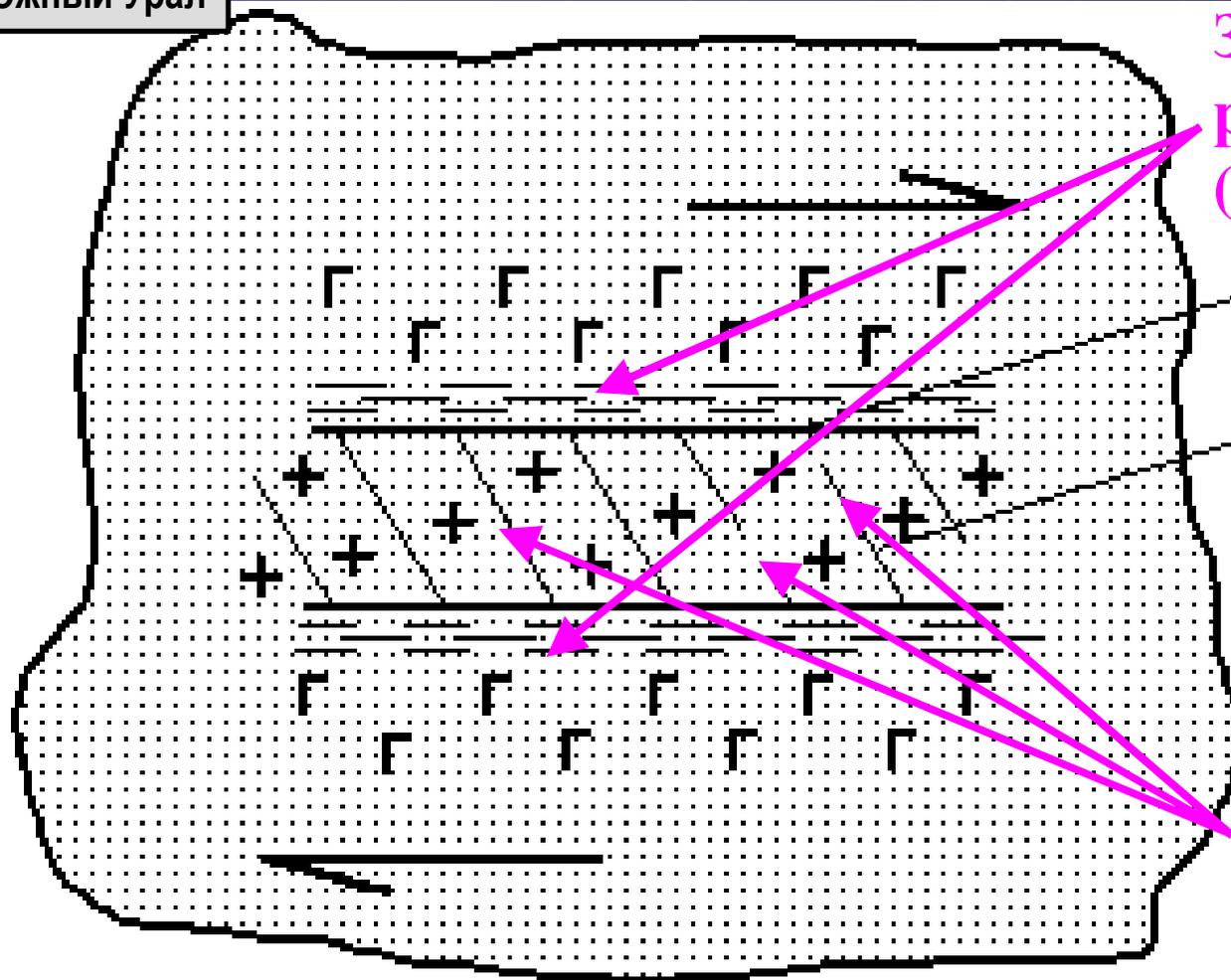


Из Sylvester, 1988
(упрощено, по Арк.В. Тевелеву, 2000)

Примеры структур, сформированных в обстановке простого сдвига (модель Риделя)

Дайка аплитов (M=20 см) в габброидах
(Каменский гранитоидный массив)

Зауральская зона.
Южный Урал



Зоны
рассланцевания
(Y-сколы)

АзпдЮВ-120/60

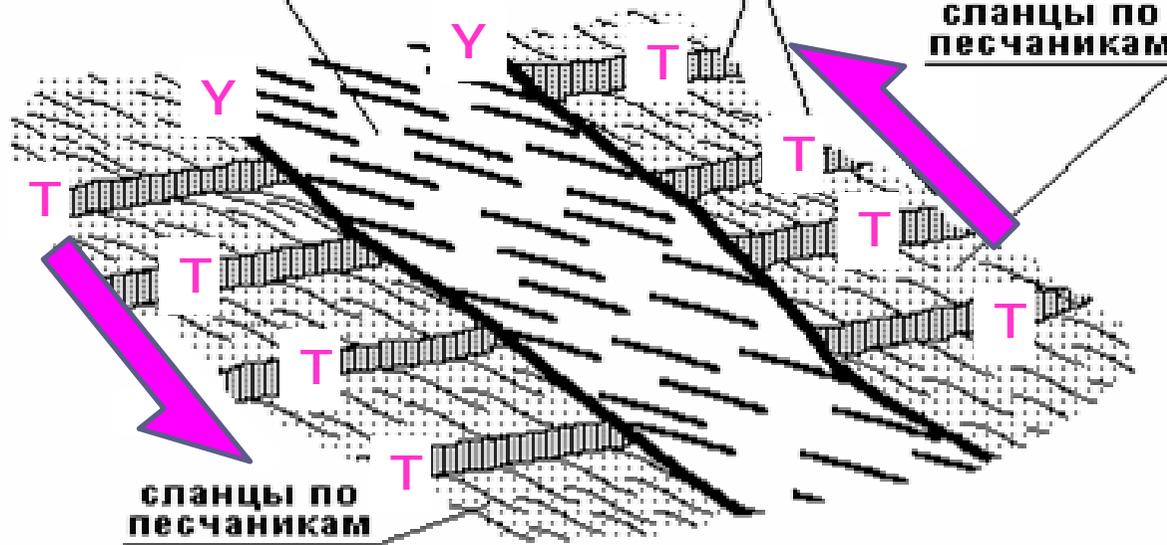
АзпдС-0/55

Трещины
отрыва
(Т-трещины)

сланцы по алевритам

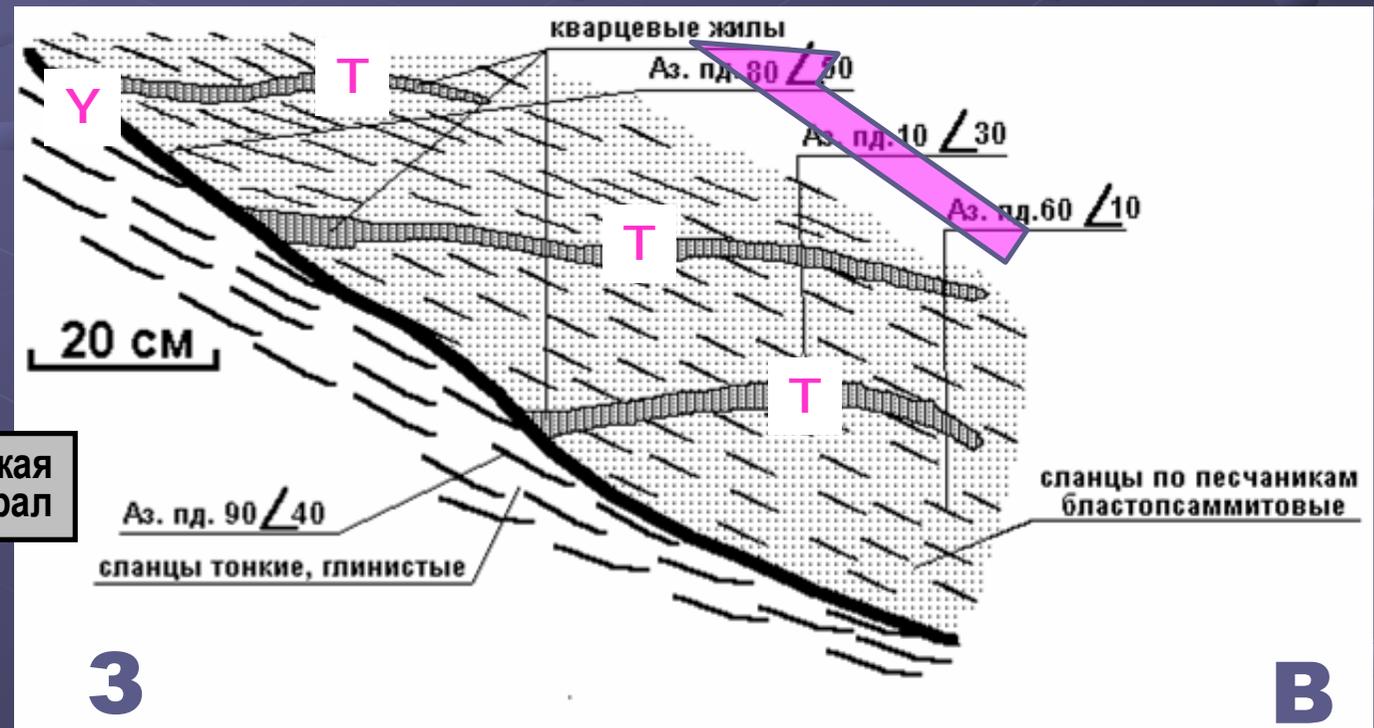
кварцевые жилы

сланцы по песчаникам



Трещины отрыва
в компетентных
слоях

Восточно-Уральская
зона. Южный Урал



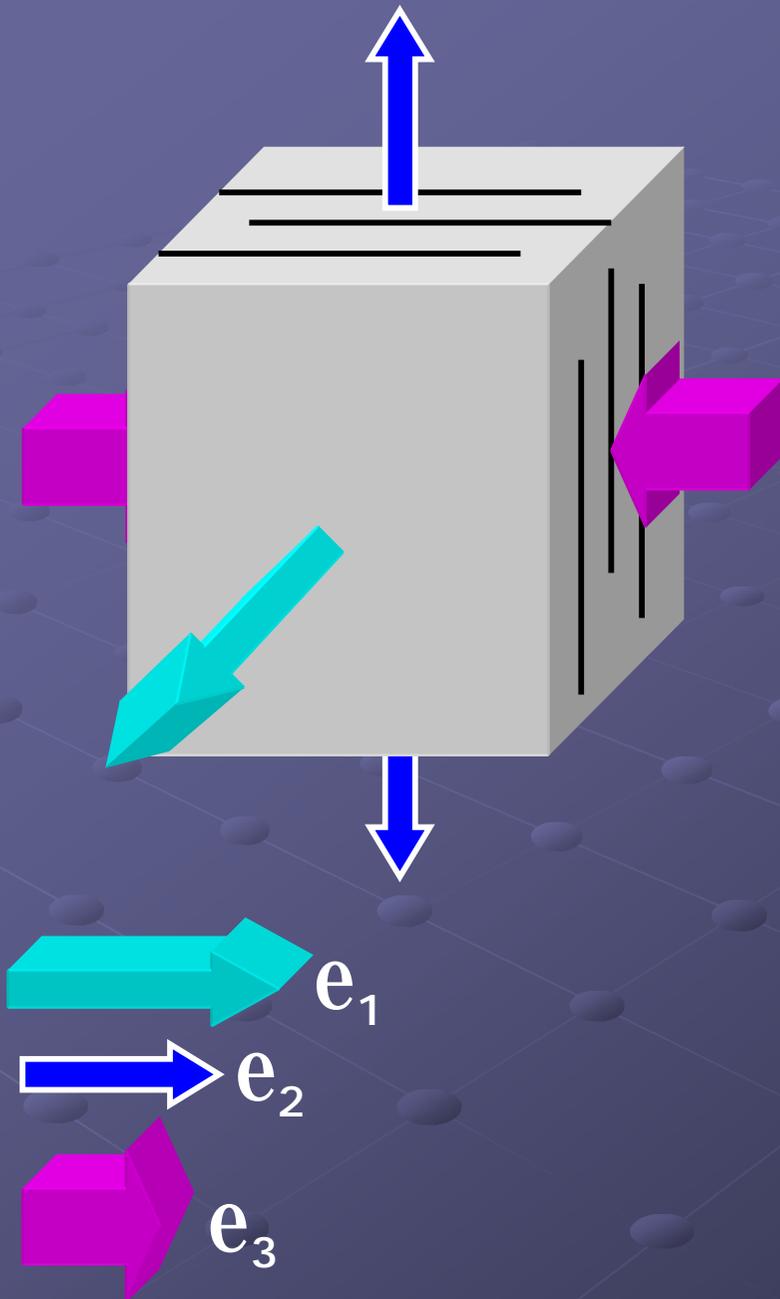
Трещины – дело тонкое!



Финальный тест 1

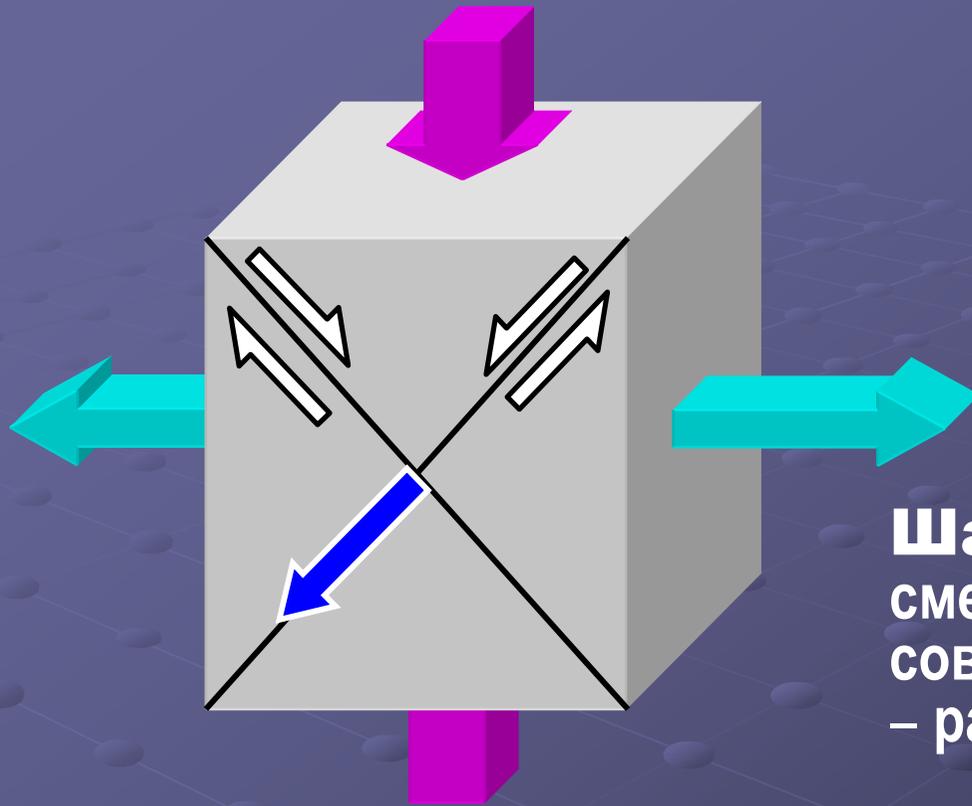
Шаг 1. Дорисовать третью ось напряжений

Шаг 2. Дорисовать трещины отрыва. Они ортогональны направлению растяжения (e_1), т.е. расположены в плоскости $e_3 - e_2$



Дорисуйте трещины отрыва

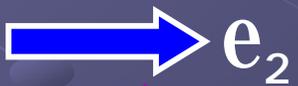
Финальный тест 2



Шаг 1. Дорисовать третью ось напряжений

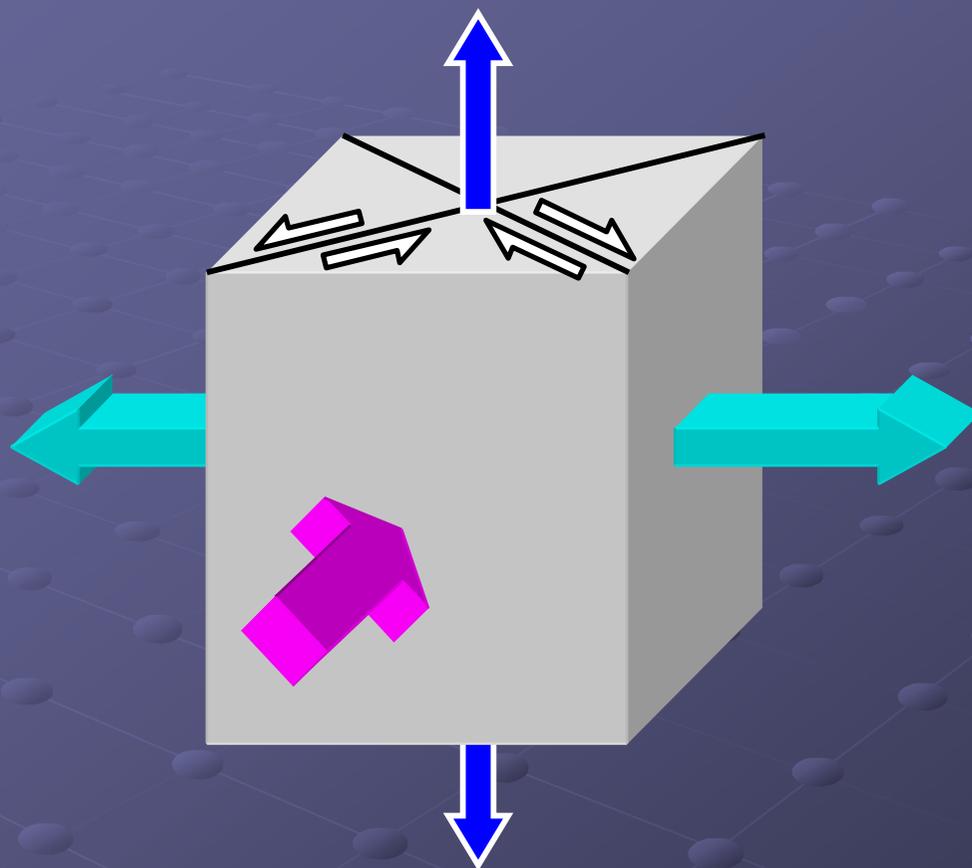
Шаг 2. Дорисовать трещины скола. Линия их пересечения совпадает с направлением e_2

Шаг 3. Определить направления смещения блоков, которые совпадают с направлениями сжатия – растяжения. Нарисовать стрелки

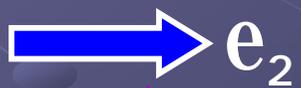


Дорисуйте трещины скола, определите направления смещения по ним

Финальный тест 3



e_1



e_2



e_3

Дорисуйте трещины скола

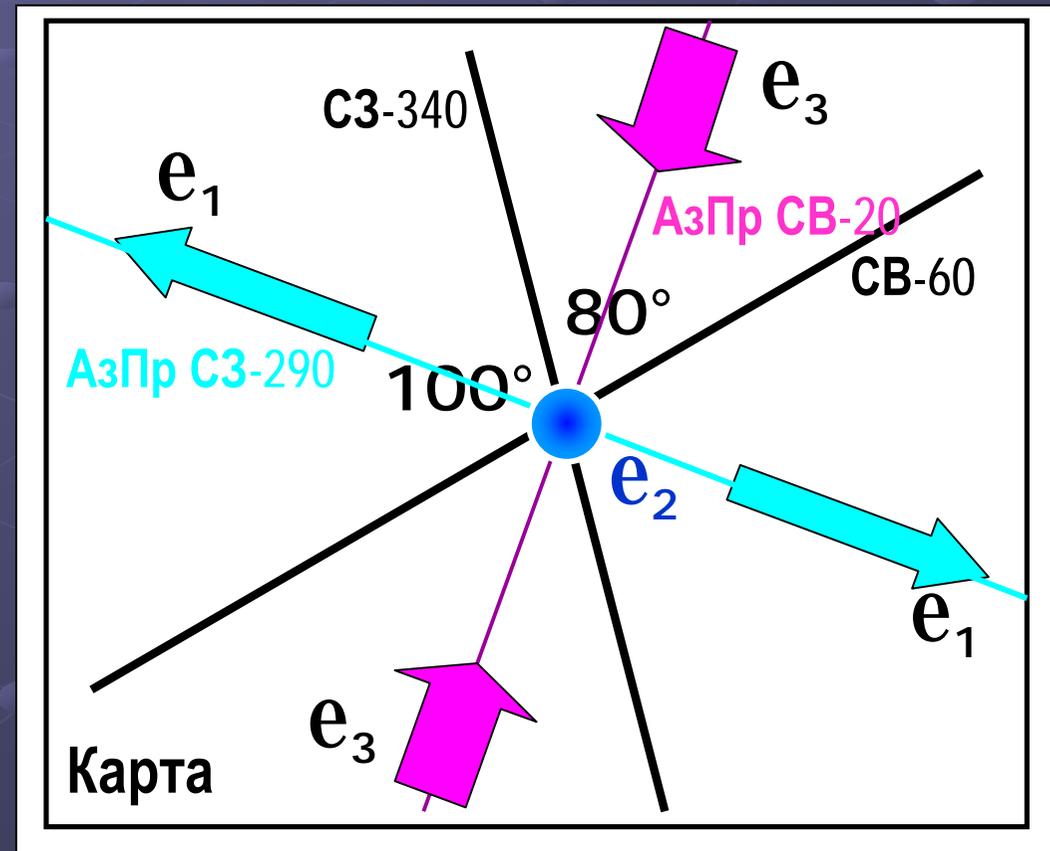
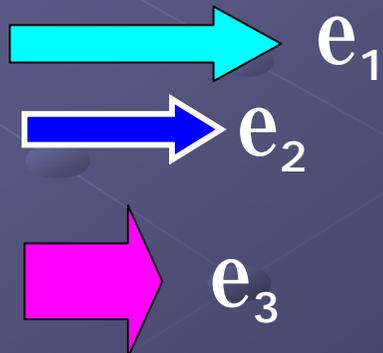
Вы наблюдаете две системы вертикальных сколов:
1) АзПр СВ-60; 2) АзПр СЗ-340.

Что можно сказать об ориентировке главных осей напряжений?

Шаг 1. Определить острый и тупой углы между сколами и азимуты простираения биссектрис.

Шаг 2. Нарисовать оси напряжений e_1 и e_3 . Ось сжатия e_3 совпадает с биссектрисой острого угла, ось растяжения e_1 – с биссектрисой тупого угла.

Шаг 3. Ось e_2 вертикальна, т.к. перпендикулярна плоскости $e_1 - e_3$.



Вы наблюдаете две системы сколов:

1) АзПд Ю-180 Д40 2) АзПд С-0 Д40.

Что можно сказать об ориентировке главных осей напряжений?

Шаг 1. Построить разрез вкрест простирания трещин. Определить острый угол

Шаг 2. Нарисовать оси напряжений e_1 и e_3 . Ось сжатия совпадает с биссектрисой острого угла, ось растяжения – с биссектрисой тупого угла.

Шаг 3. Нарисовать оси напряжений e_2 и e_3 на карте. Ось среднего главного напряжения e_2 перпендикулярна оси e_3 .

