

# **Структурная геология и геологическое картирование**

## **Лекция № 11**

### **«Модели формирования разрывов»**

# Прочность пород, угол внутреннего трения

**Прочность** пород есть свойство сопротивляться воздействию внешних нагрузок без разрушения. Для того, чтобы разрушить породу необходимо преодолеть во-первых, силу сцепления между зернами и, во-вторых, силу трения между ними. Прочность породы увеличивается с увеличением всестороннего давления.

Уравнение теории прочности Кулона-Мора:  $\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg}\varphi + c$

где  $\sigma_n$  и  $\tau_n$  нормальное и касательное напряжения; **c** – коэффициент сцепления (зависит от силы связи между зернами);  $\varphi$  – **угол внутреннего трения** материала (зависит от силы трения между зернами при сдвиговой деформации – для горных пород 35-40°); **tgφ** – коэффициент пропорциональности между максимальными касательными и нормальными напряжениями.

Для графического определения коэффициента сцепления и угла внутреннего трения применяют круги Мора для напряжений, **разрушающих породу** (предельные круги Мора).

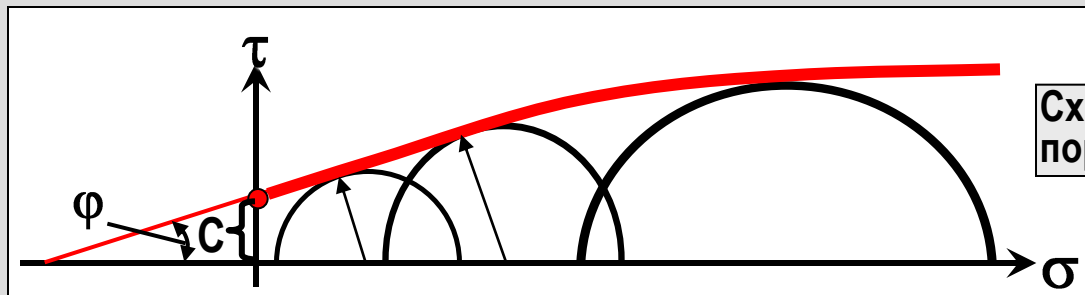


Схема результатов испытаний пород на разрушение. Упрощено

**Угол внутреннего трения** – показатель прочности горной породы, равный углу наклона касательной к огибающей предельных кругов напряжений в точке ее пересечения с осью касательных напряжений (ГОСТ 30416-96)

# Модели формирования разрывных нарушений

Разрушение горных пород происходит под воздействием напряжений, превышающих их предел прочности. В природе разрывы возникают в различных условиях за счет образования трещин, имеющих, как правило, закономерную ориентировку в поле напряжений. Смещение происходит по трещинам скалывания, которые из-за воздействия сил внутреннего трения формируются под углом, **меньшим  $45^\circ$** ,.

Различают две основные модели образования разрывных нарушений:

**Модель Кулона-Андерсона** – формирование систем разрывов в механической обстановке **чистого сдвига**.

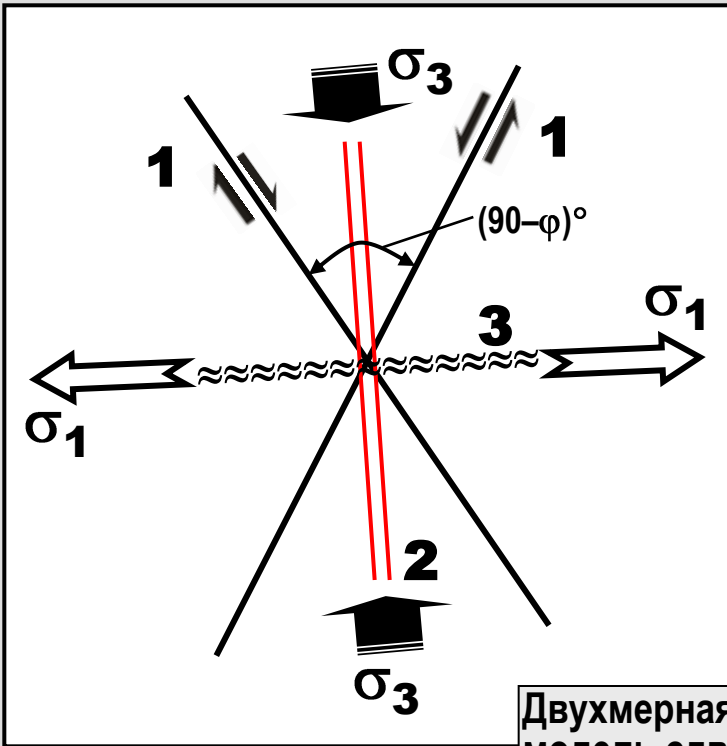
**Модель Риделя** – формирование систем разрывов в механической обстановке **простого сдвига**.

В механической обстановке **чистого сдвига** разрывы возникают под действием **нормальных напряжений**, блоки перемещаются по ним параллельно самим себе.

В механической обстановке **простого сдвига** разрывы возникают под действием **тангенциальных напряжений**, блоки перемещаются по ним, испытывая разворот, ротацию.



# Модель Кулона – Андерсона



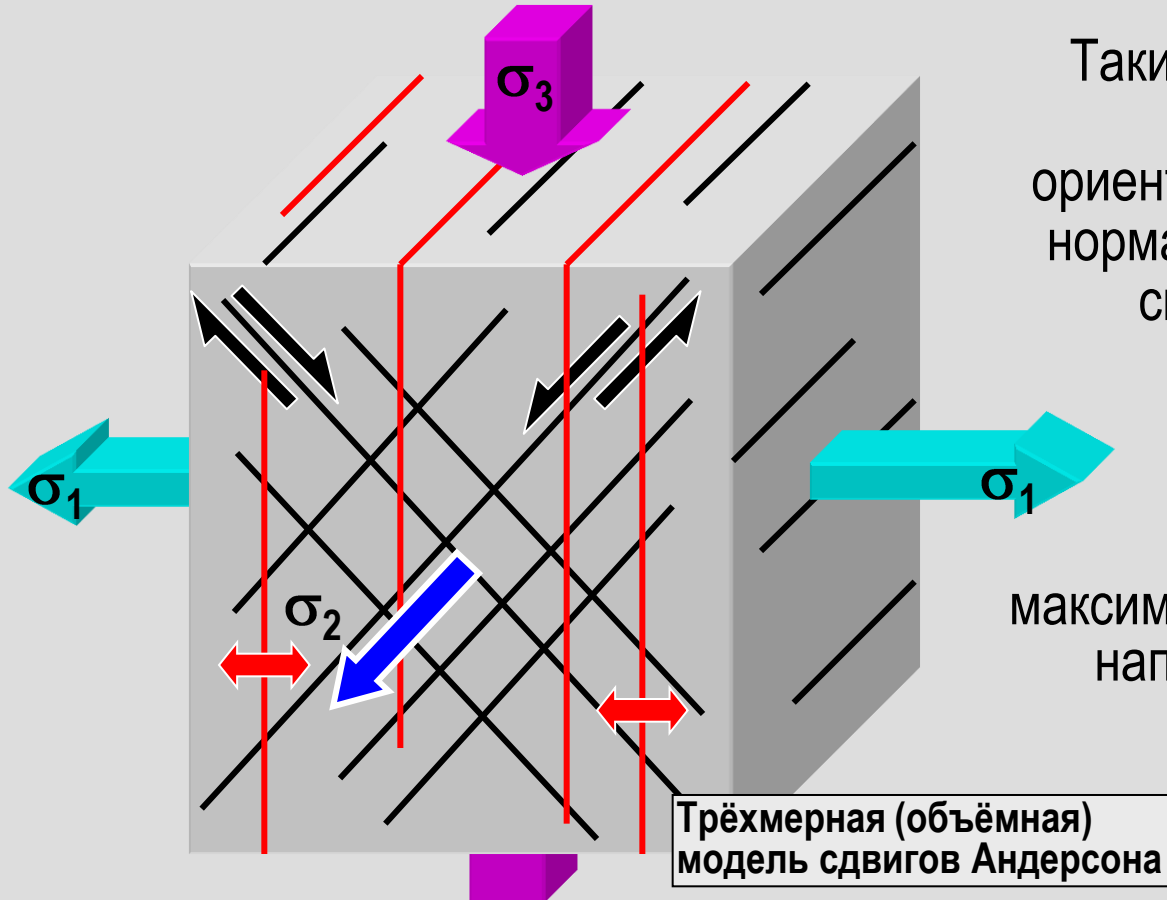
Двухмерная (плоская)  
модель сдвигов Андерсона

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 система сопряженных левых и правых сколов будет формироваться **симметрично** относительно направления сокращения под углом  $(90-\varphi)^\circ$ , где  $\varphi$  – угол внутреннего трения

**1** – сопряженные **трещины скальвания** образуют острый угол, биссектриса которого совпадает с направлением минимального главного нормального напряжения –  $\sigma_3$  (сжатия);

**2** – **трещины отрыва** образуются ортогонально к максимальному главному нормальному напряжению –  $\sigma_1$  (растяжению);

**3** – **структуры сжатия** образуются ортогонально к минимальному главному нормальному напряжению –  $\sigma_3$  (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

**1 – отрывы**

образуются ортогонально к направлению растяжения – максимальному главному нормальному напряжению ( $\sigma_1$ ) и лежат в главной плоскости напряжений  $\sigma_2 - \sigma_3$

**2 – сопряженные левые и правые сколы образуют:**

а) острый угол, биссектриса которого совпадает с направлением **минимального** главного нормального напряжения – сжатия ( $\sigma_3$ ) и лежит в главной плоскости напряжений  $\sigma_2 - \sigma_3$ ,

б) тупой угол, биссектриса которого совпадает с направлением **максимального** главного нормального напряжения – растяжения ( $\sigma_1$ ) и лежит в главной плоскости напряжений  $\sigma_2 - \sigma_1$ ;



**NB!**  
 Линии пересечения сколов совпадают направлением среднего главного нормального напряжения  $\sigma_2$ !

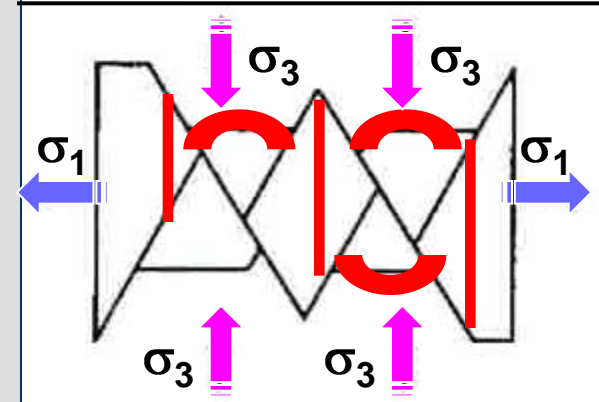
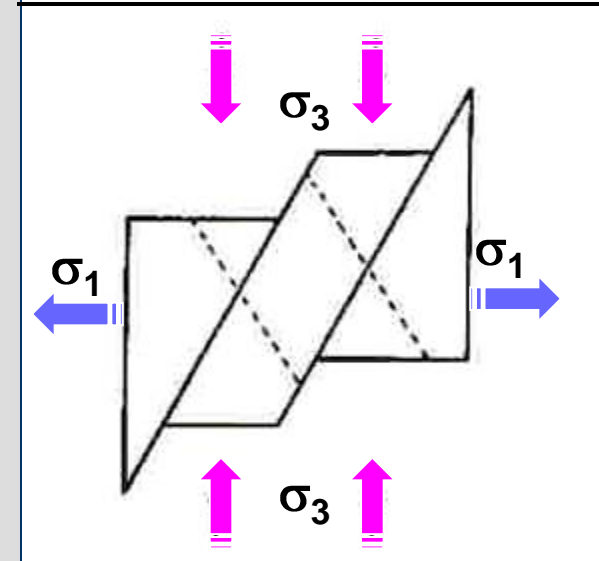
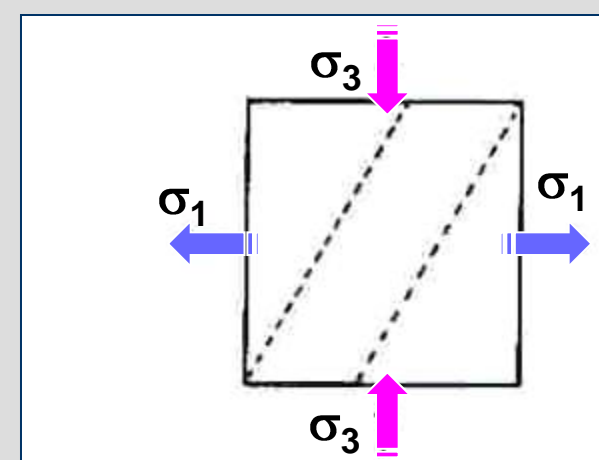


Блоки, ограниченные сколами, перемещаются параллельно самим себе.

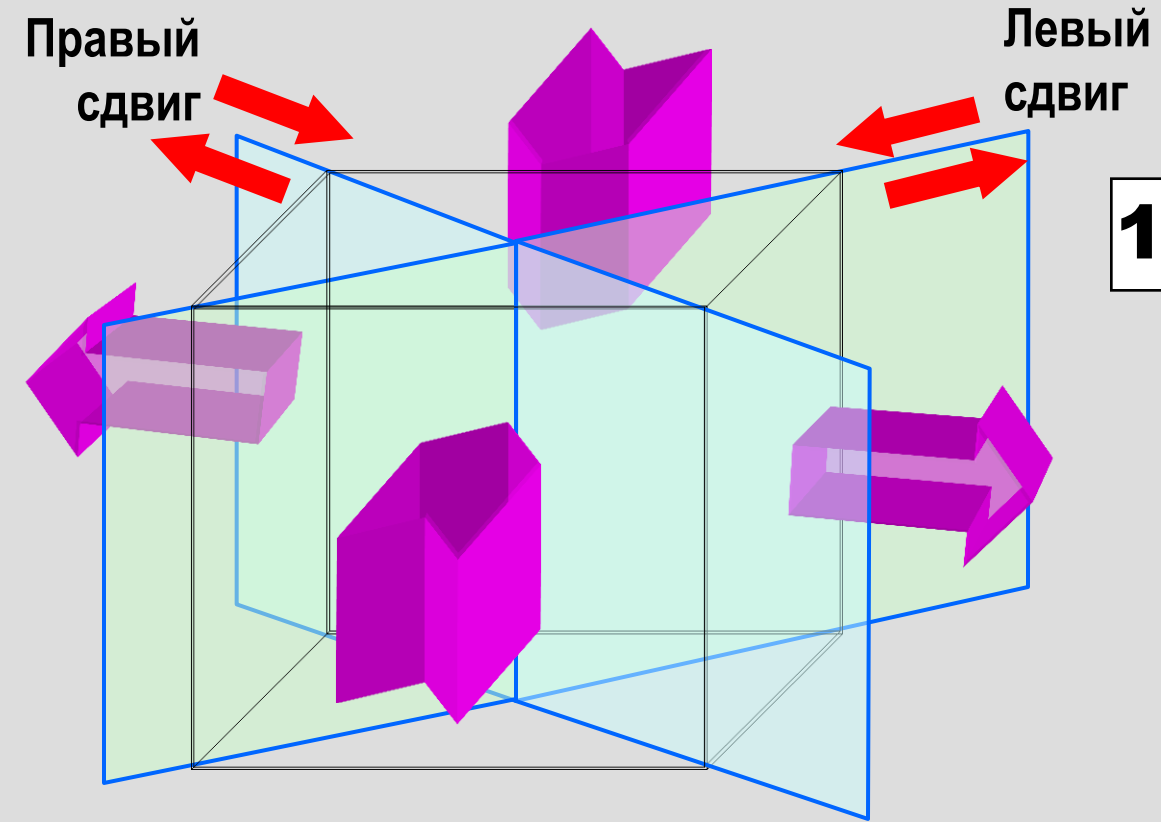
В целом происходит **удлинение** деформируемого объема в направлении максимального напряжения ( $\sigma_1$ ) и **укорочение** в направлении минимального напряжения ( $\sigma_3$ )

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.

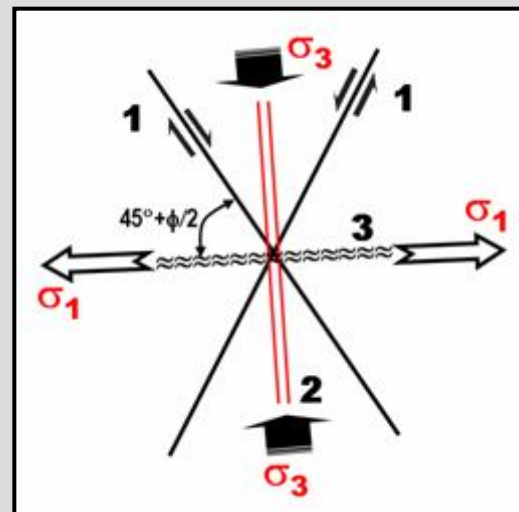


# Реконструкция полей напряжения в механических условиях чистого сдвига

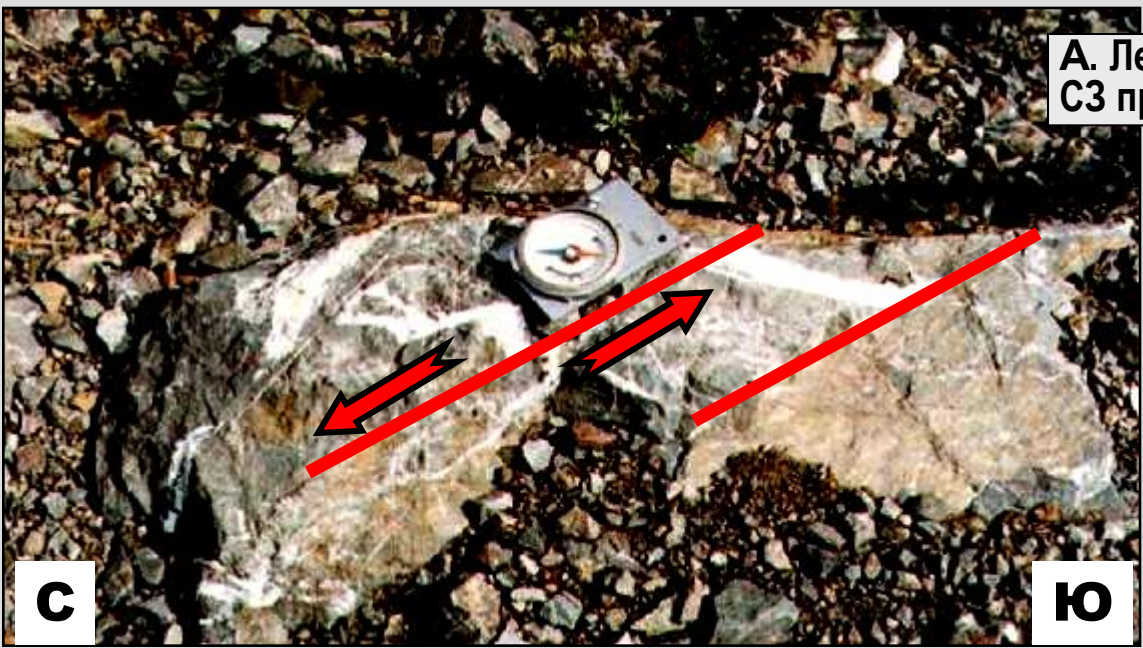


**1** При разрушении породы формирование **СКОЛОВ** (в данном случае – сдвигов) наиболее выгодно **энергетически!**

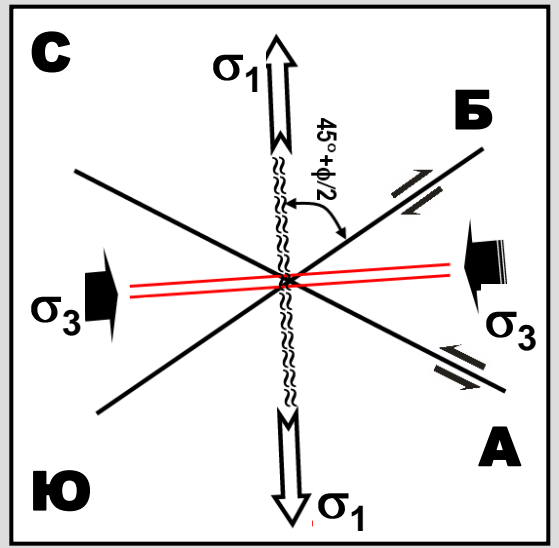
Реальное положение конкретных трещин в пространстве может отличаться от теоретического (иногда весьма существенно) в силу неоднородности деформируемой породы. Поэтому для них обычно определяют среднестатистическое значение



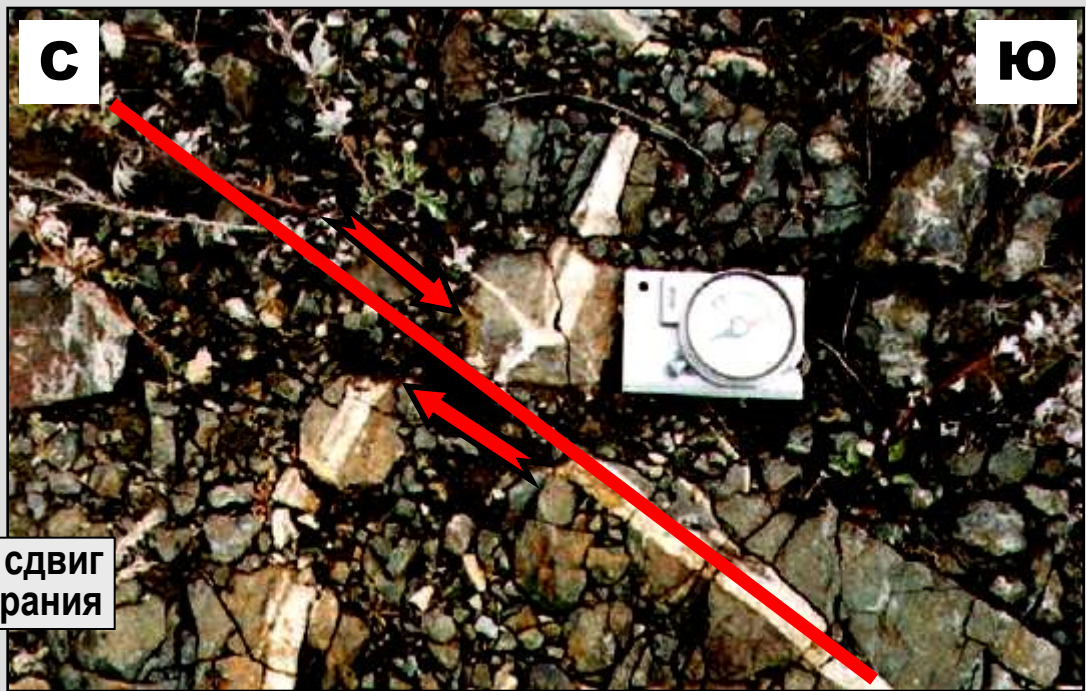
**А. Левый сдвиг  
СЗ простираения**



Направление сдвигания по сколам Андерсона можно определить по смещению маркеров, в данном случае – кварцевых жил в базальтах. Южный Урал



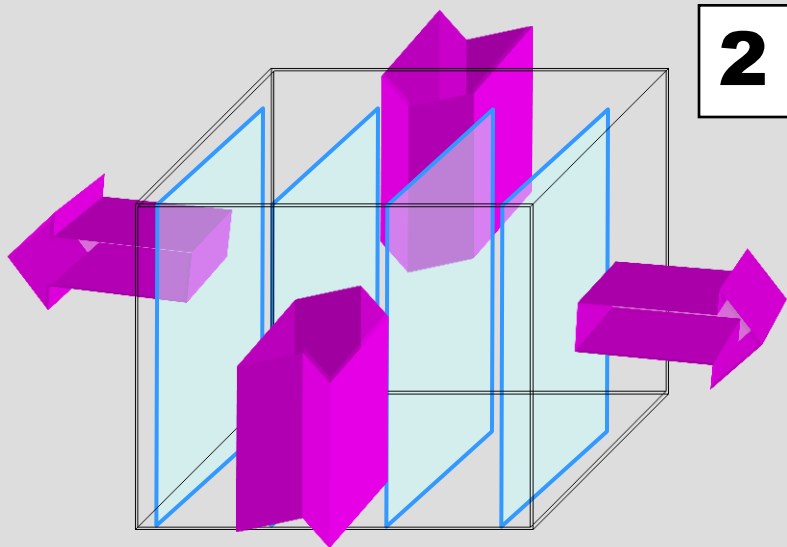
**Б. Правый сдвиг  
СВ простираения**



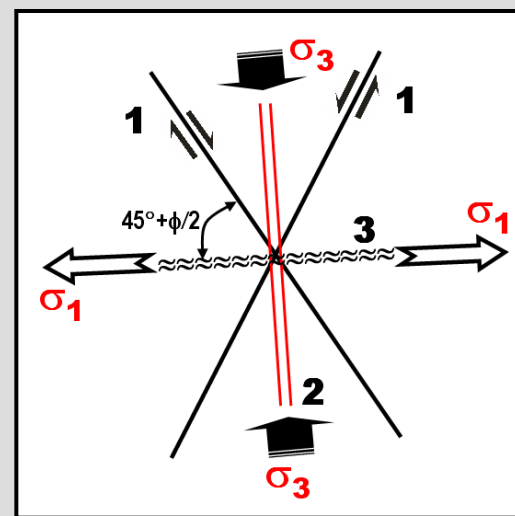


**2**

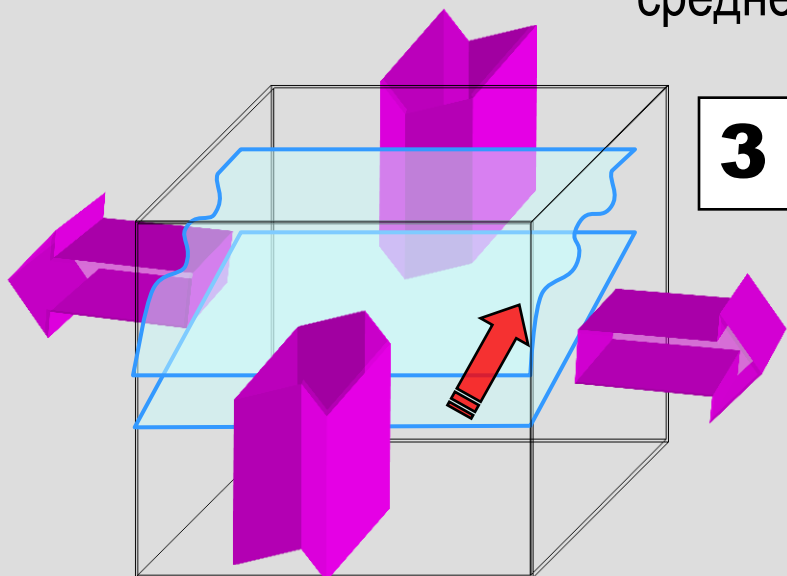
Кроме сколов в условиях чистого сдвига перпендикулярно растяжению формируются **трещины отрыва**, которые заполняются гидротермальными минералами (кварц, кальцит и пр.), а также **сбросы, грабены** и др. **структуры растяжения**.



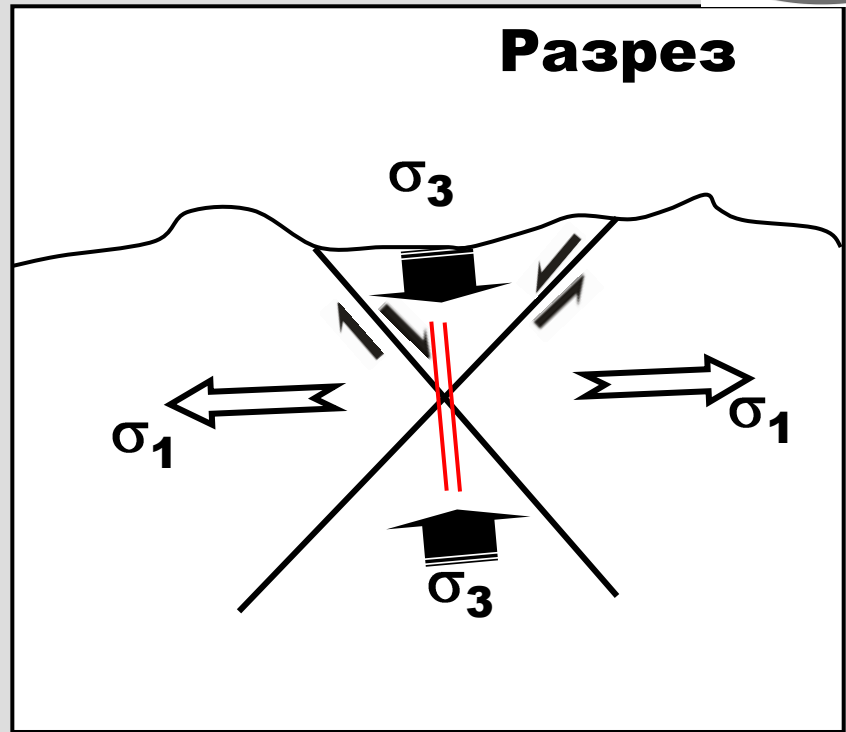
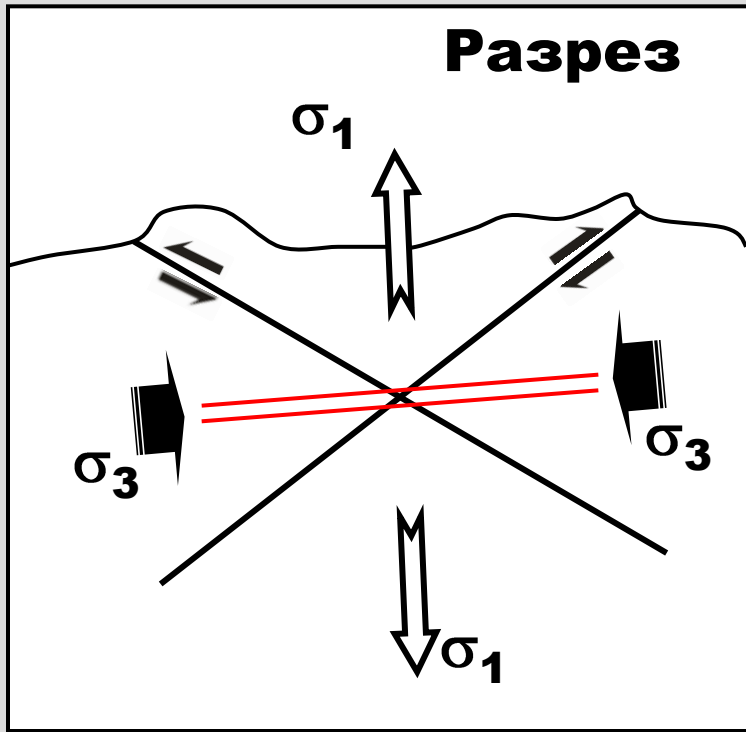
Реальное положение конкретных трещин в пространстве может отличаться от теоретического (иногда весьма существенно) в силу неоднородности деформируемой породы. Поэтому для них обычно определяют среднестатистическое значение

**3**

Кроме сколов и отрывов в условиях чистого сдвига перпендикулярно сжатию формируются **надвиги, взбросы, складки**, т.е. разнообразные **структуры сжатия**



"Сдвиги" (сколы) Андерсона отвечают морфологическому типу разрывов "сдвиги" только при горизонтальной ориентировке главных минимального и максимального напряжений! При вертикальной ориентировке  $\sigma_1$  эти сколы будут "надвигами", а при вертикальной ориентировке  $\sigma_3$  – "сбросами"

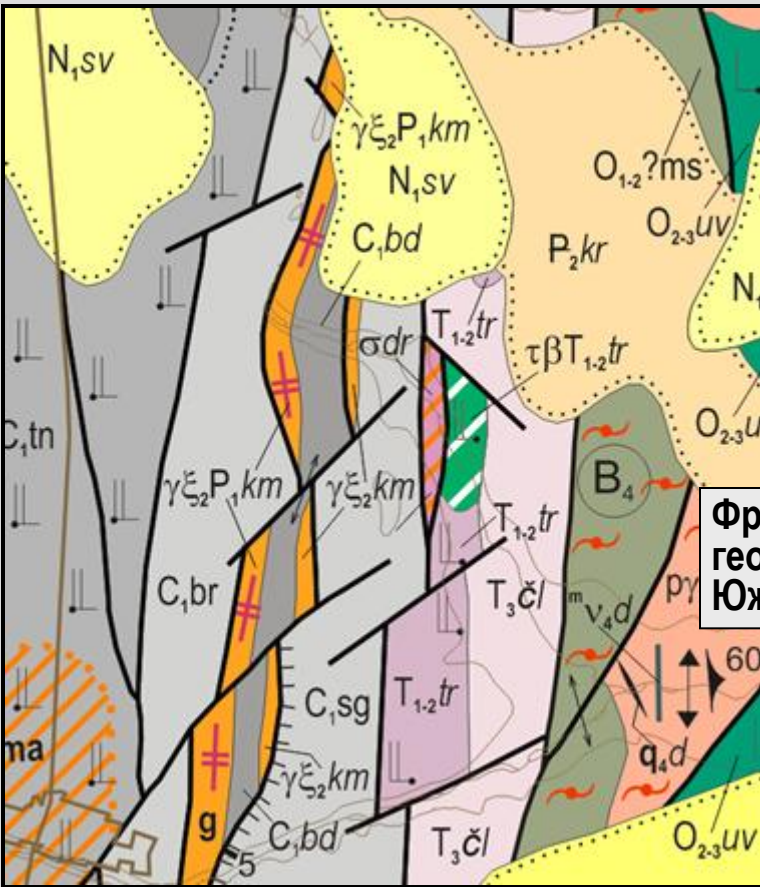


Сдвиги Андерсона длительное время рассматривались как единственный возможный тип сдвиговых разрывов именно потому, что они просты для понимания и во многих случаях хорошо объясняют крупно- и среднемасштабные перемещения в различных регионах.

# Механизмы сдвига при чистом сдвиге



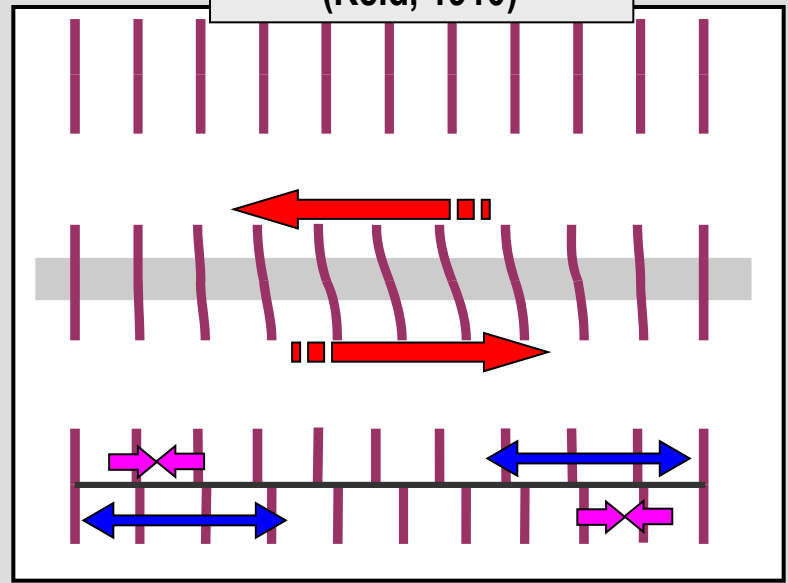
Разрывы на геологических картах имеют конечные размеры. Это не только и даже не столько результат рисовки карты, сколько отражение действительности – разрывы на самом деле имеют конечную длину, т.е. на концах этих разрывов никакого **смещения нет**, а в середине – **есть!**



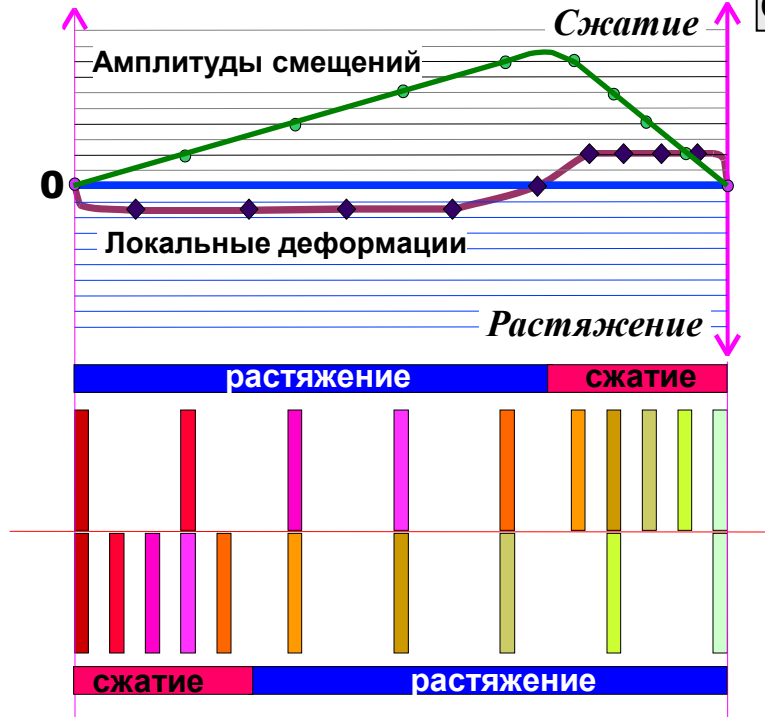
Фрагмент Государственной геологической карты Южного Урала

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.

Механизм сдвига по Андерсону – Риду (Reid, 1910)



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.

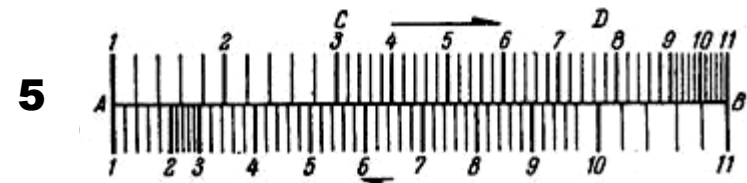
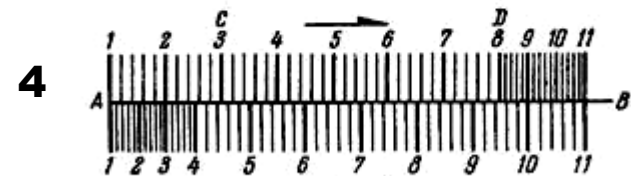
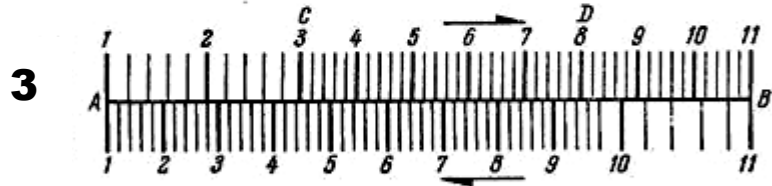
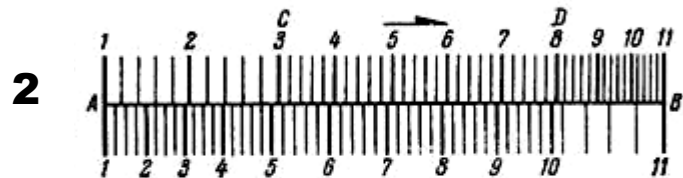
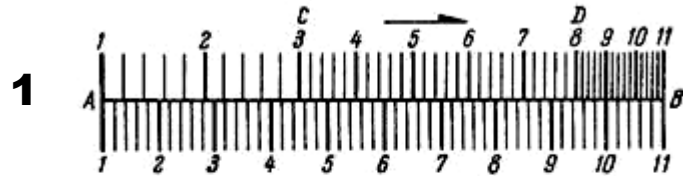
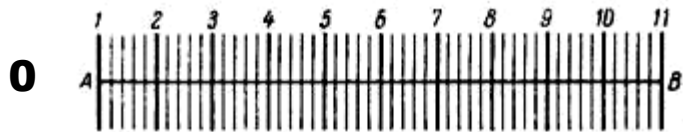
**Максимальные смещения** в крыле сдвига расположены именно там, где деформации растяжения сменяются деформациями сжатия.

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 реобладании **тангенциальных напряжений**.

В таких условиях возникают серии сколов: синтетических сдвигов (совпадающих по направлению смещения с главным сдвигом) и антитетических сдвигов (с противоположным смещением).

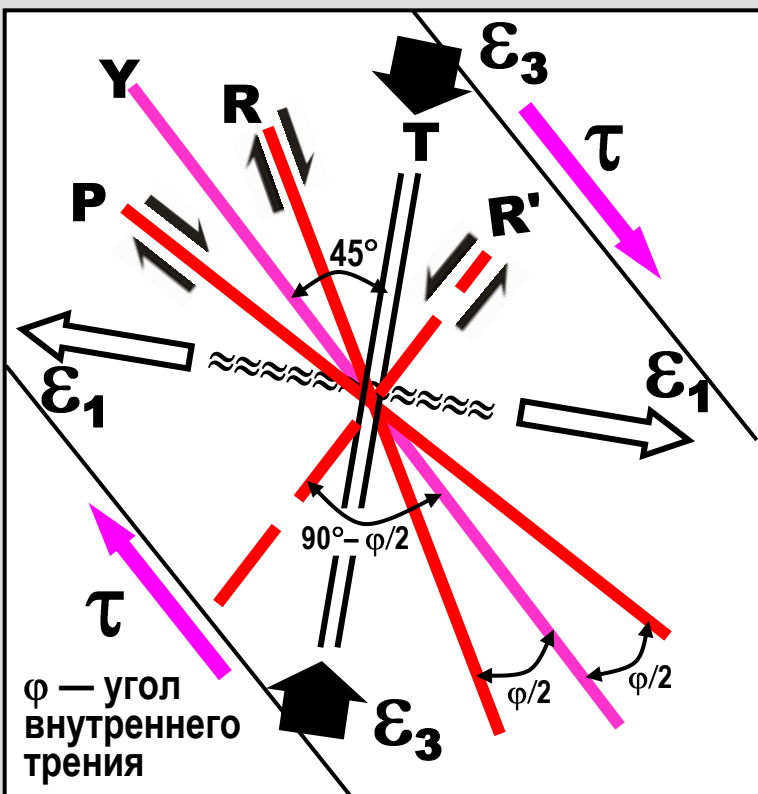
**Y** – разломы, параллельные направлению максимальных тангенциальных напряжений (**Y-сколы**, или **генеральные сдвиги**). В данном случае – правые!

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

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

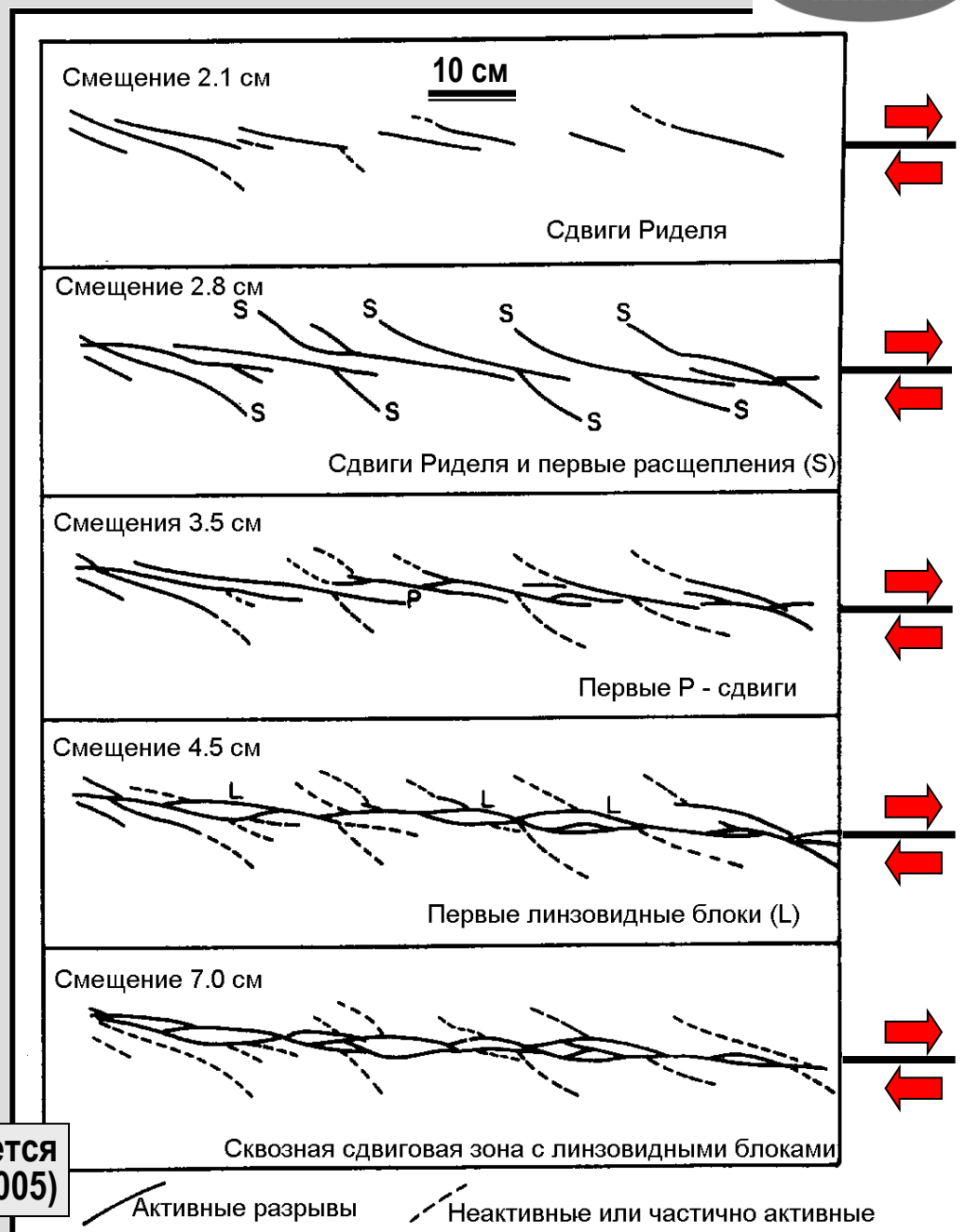
**R'** – **сопряженные сколы Риделя** – "антириделевские" (антитетические сдвиги). В данном случае – левые!

**T** – **трещины отрыва** ( $\angle \approx 45^\circ$  к генеральному сдвигу). 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 сдвигания 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)

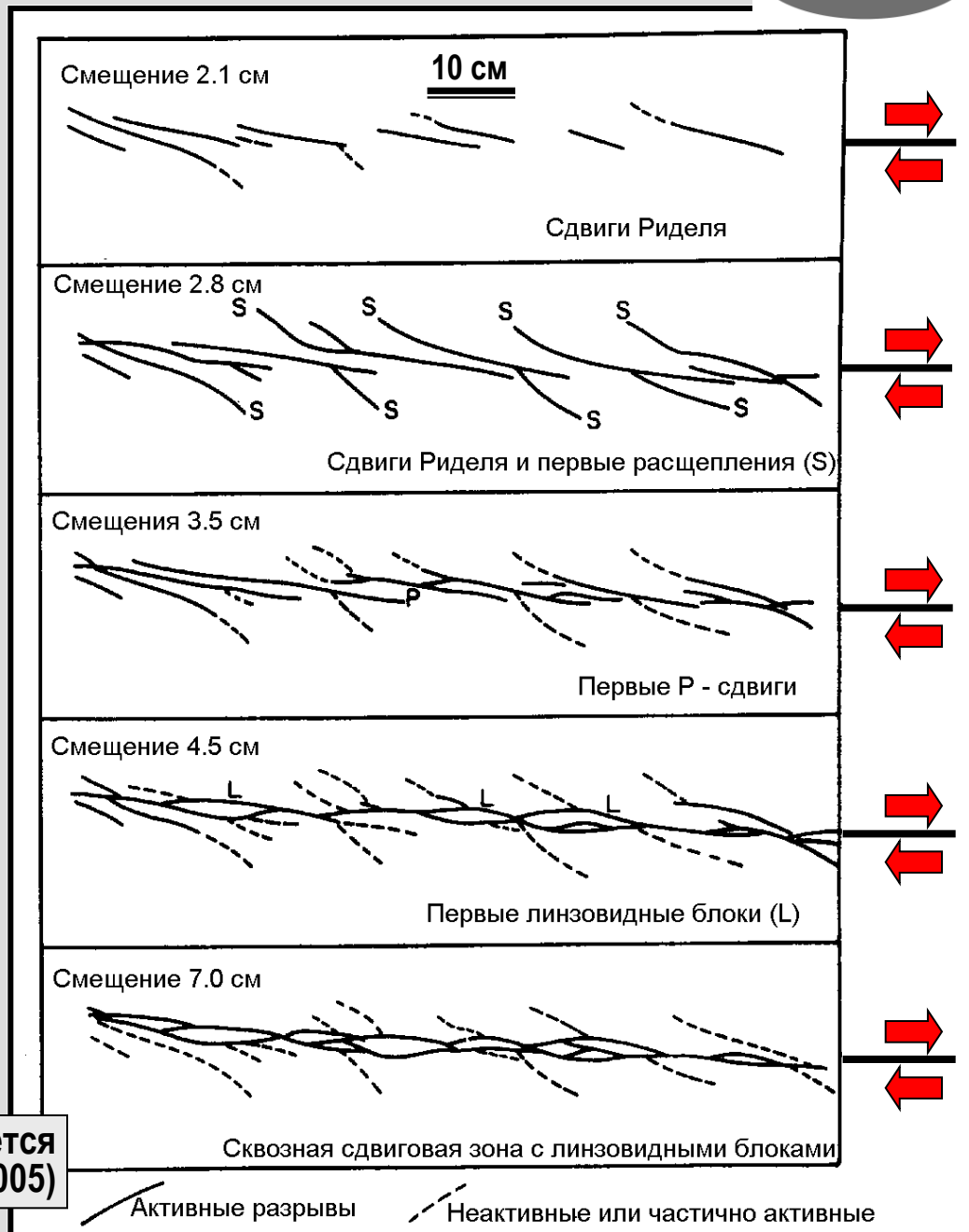
Направление сдвигания вдоль  
сколов R, P, Y то же самое,  
что и в разломе фундамента,  
а по R' — противоположное.

Все разломы, исключая надвиги,  
близки к вертикальным.

Сколы R и R' составляют с основной  
зоной смещения углы  $(\varphi / 2)^\circ$  и  
 $(90 - \varphi / 2)^\circ$  соответственно,  
где  $\varphi$  — угол внутреннего трения.

Это означает, что риделевские  
сколы ориентированы под углом  
от  $15^\circ$  до  $20^\circ$  к генеральному сдвигу,  
а R' — под углом от  $60^\circ$  до  $75^\circ$ .

При развитии системы риделевских  
сколов возникают сложно  
построенные сдвиговые зоны,  
составленные разномасштабными  
линзовидными блоками.



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



Набор структур, сформированных при **правом** простом сдвиге:

**1 – риделевские сколы**  
(кулисы левосторонние);

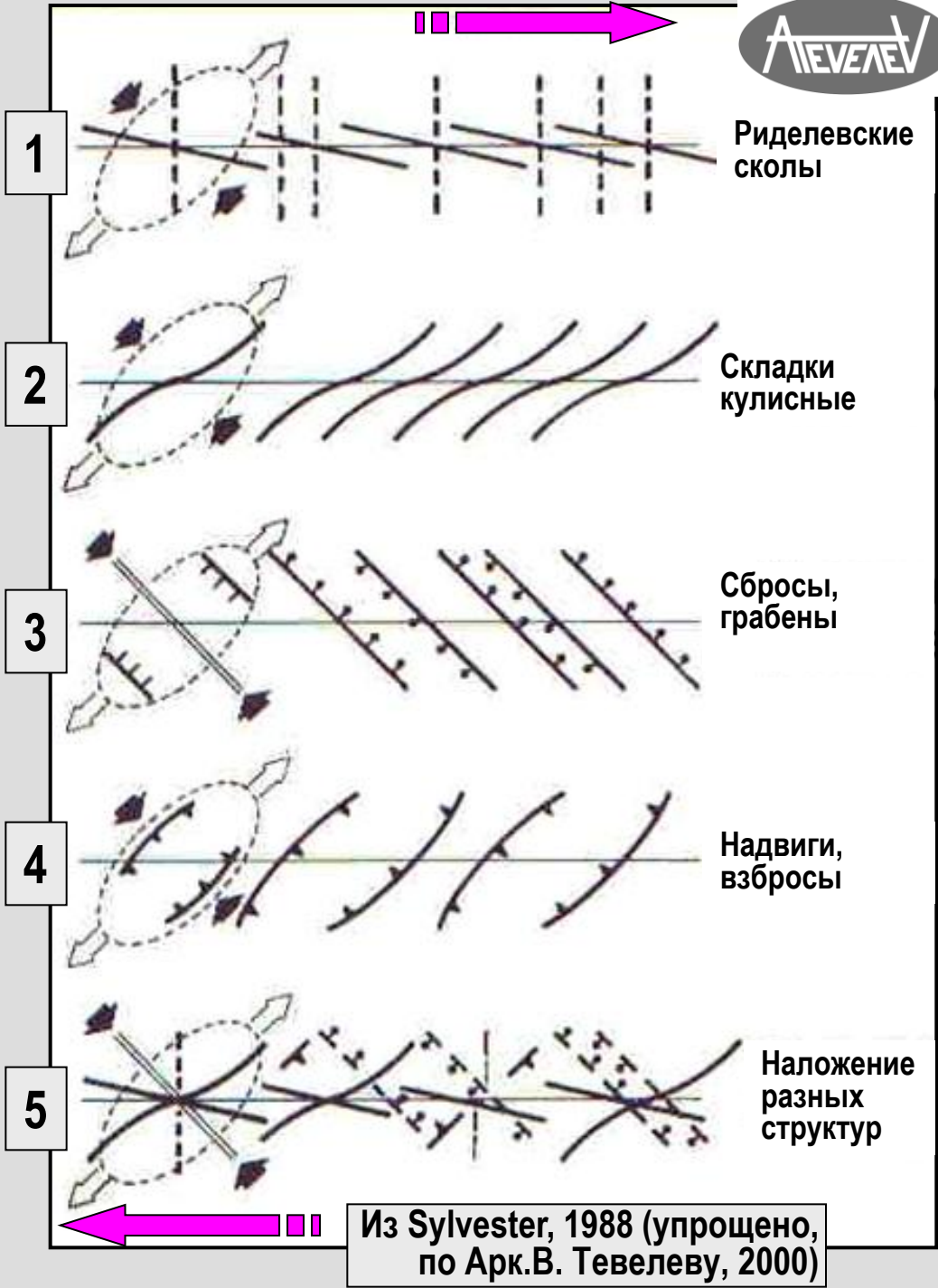
**2 – складки кулисные**  
(ориентированы нормально к оси сжатия, кулисы правосторонние);

**3 – сбросы, грабены**  
(ориентированы нормально к оси растяжения);

**4 – надвиги, взбросы**  
(ориентированы нормально к оси сжатия);

**5 – сочетание различных структурных элементов.**

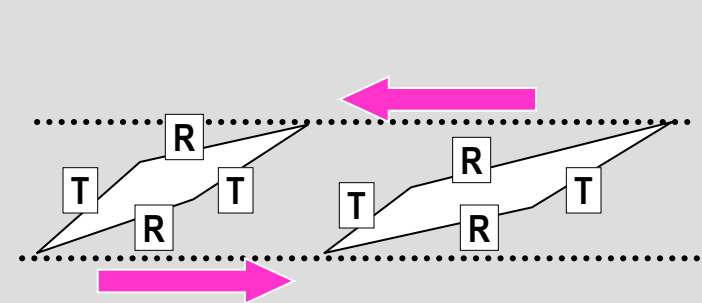
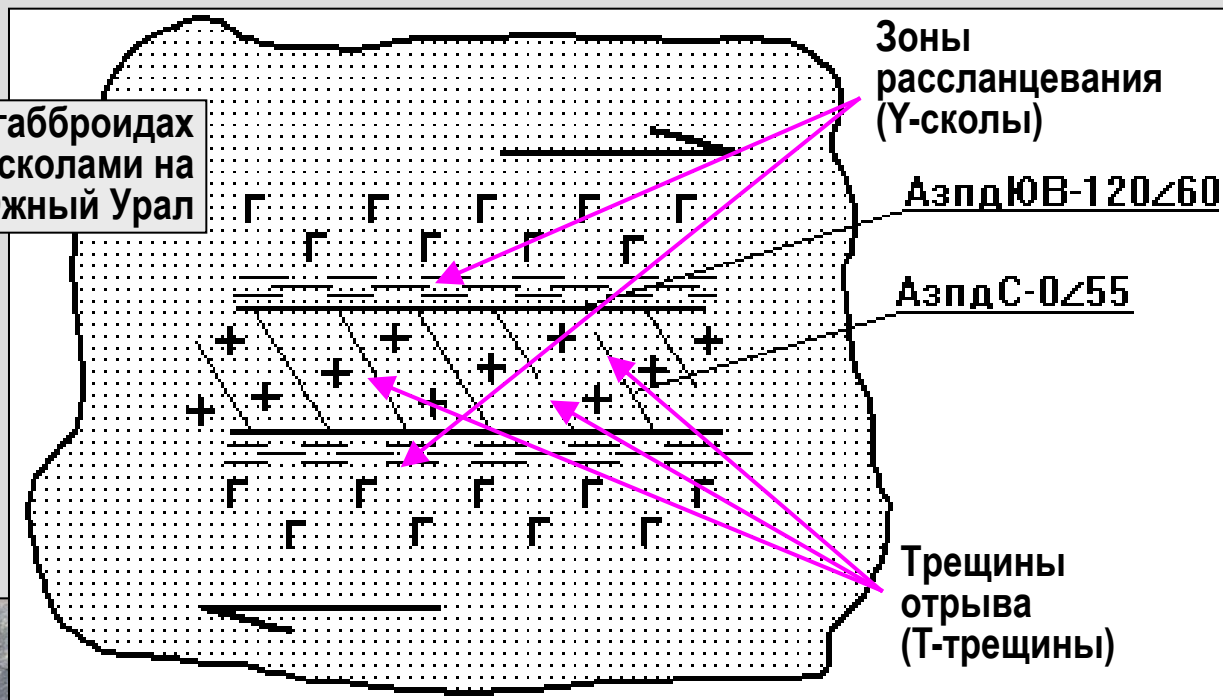
Таким образом, в условиях простого сдвига может формироваться серия сопряженных структур сжатия и растяжения.



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



Дайка аплитов (M=20 см) в габброидах с трещинами отрыва и Y-сколами на правом сдвиге. Южный Урал

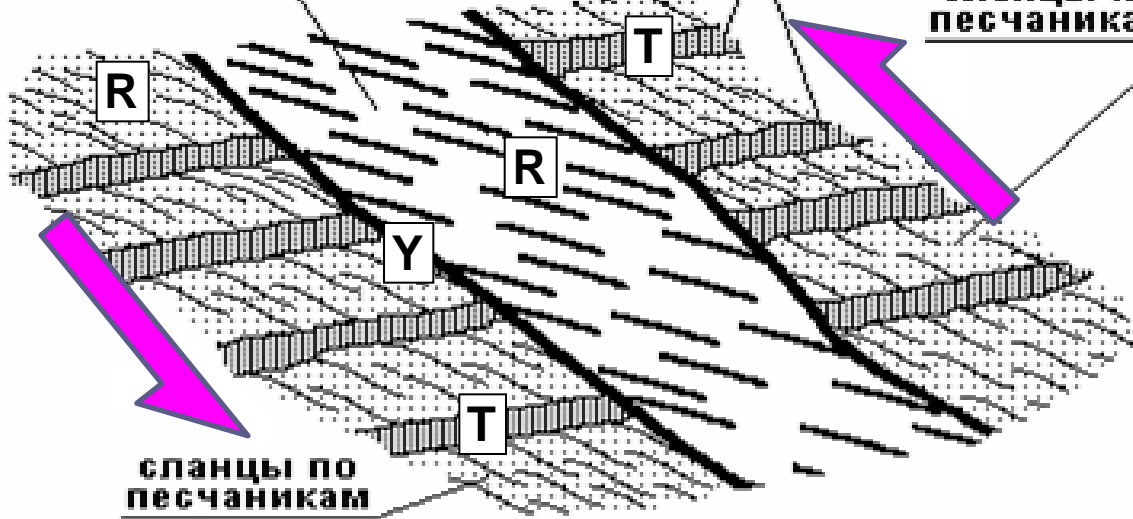


Правокулисные трещины отрыва и сколы Риделя на левом сдвиге, выполненные кальцитом. Известняки нижнего карбона. Южный Урал

сланцы по алевролитам

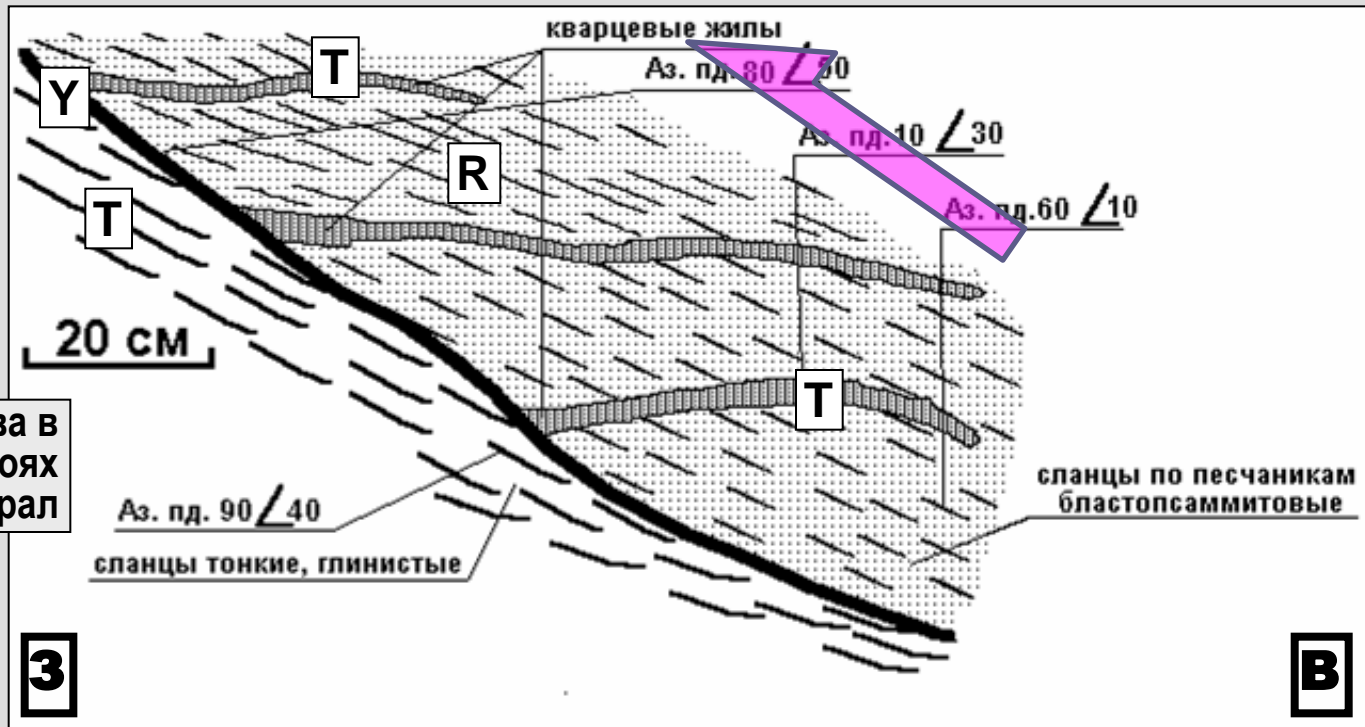
кварцевые жилы

сланцы по песчанникам



сланцы по песчанникам

Трещины отрыва в компетентных слоях Южный Урал



Трещины отрыва в компетентных слоях Южный Урал



**Б.** Трещина представляется в виде плоскости, секущей ориентированный в пространстве шар и проходящей через его центр – большой круг. Проекции больших кругов (**плоскостных элементов**) верхней полусферы на горизонтальную плоскость представляют собой дуги разной кривизны.

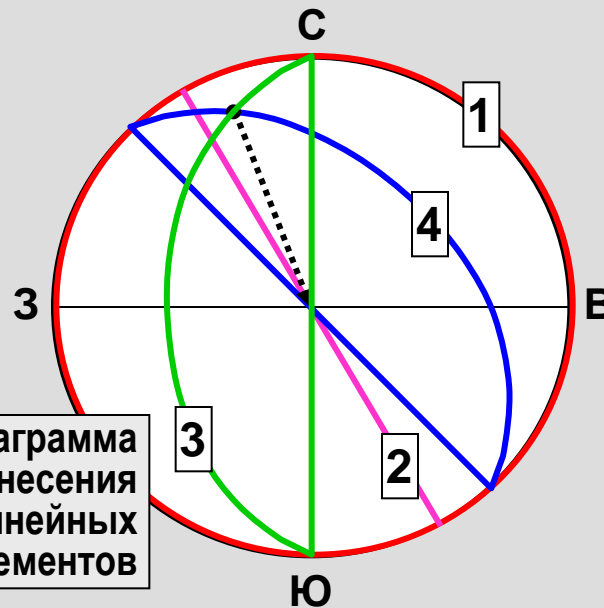
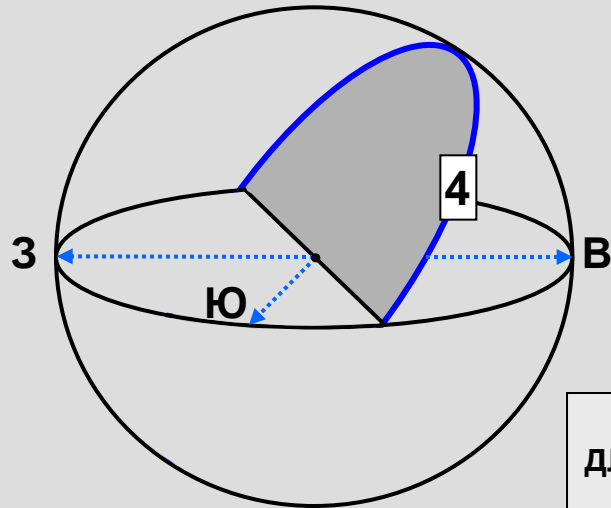
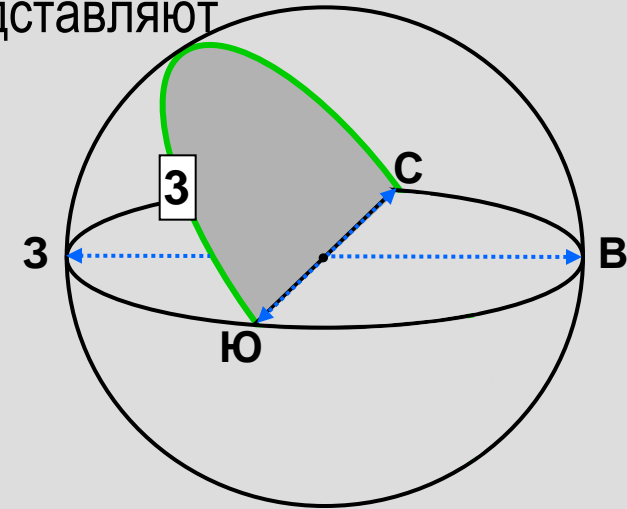
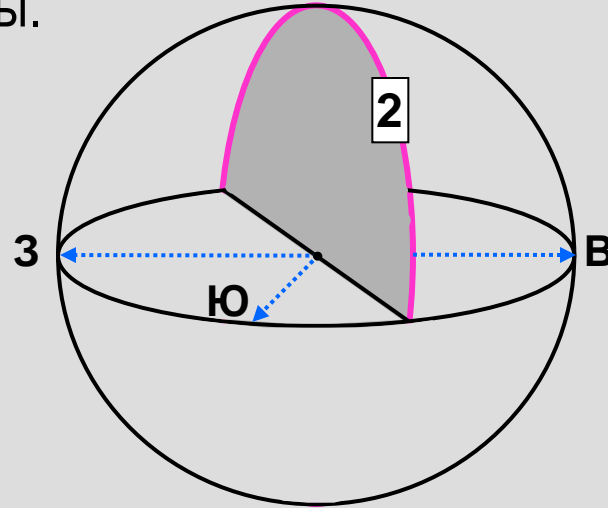
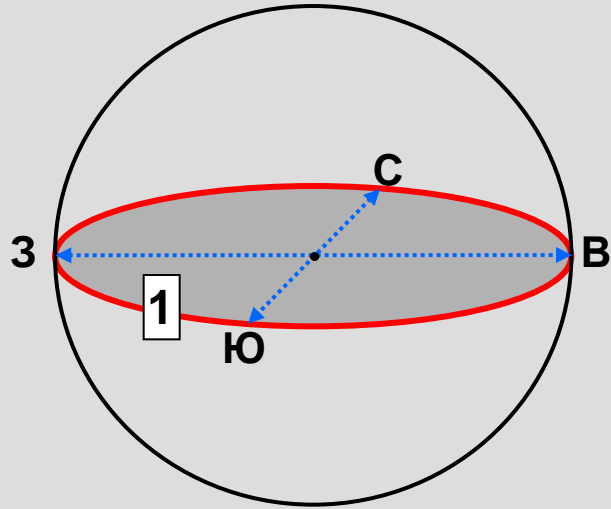


Диаграмма для нанесения линейных элементов

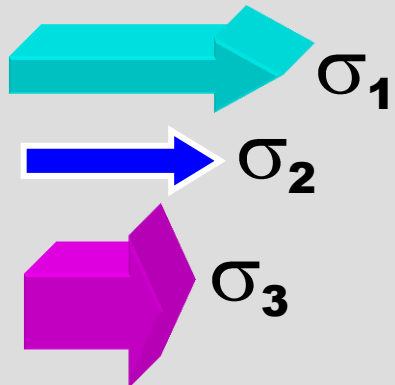
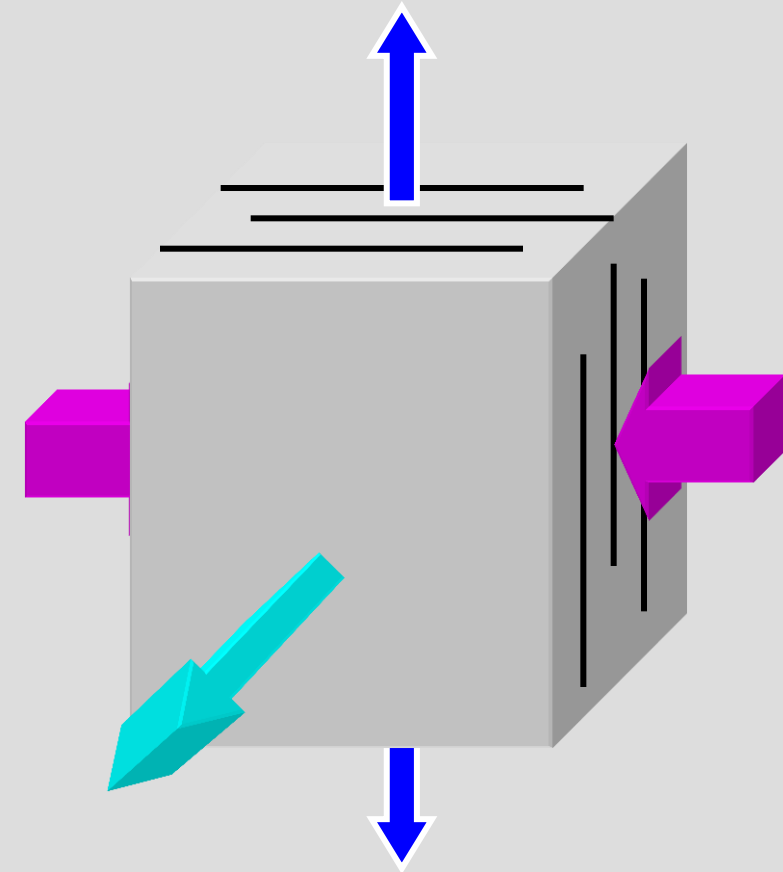
**NB!**  
Проекция линии пересечения больших кругов проводится от точки пересечения дуг к центру круга!

**?**  
Каковы элементы залегания линии пересечения?

Трещины – дело тонкое!



# Финальный тест 1

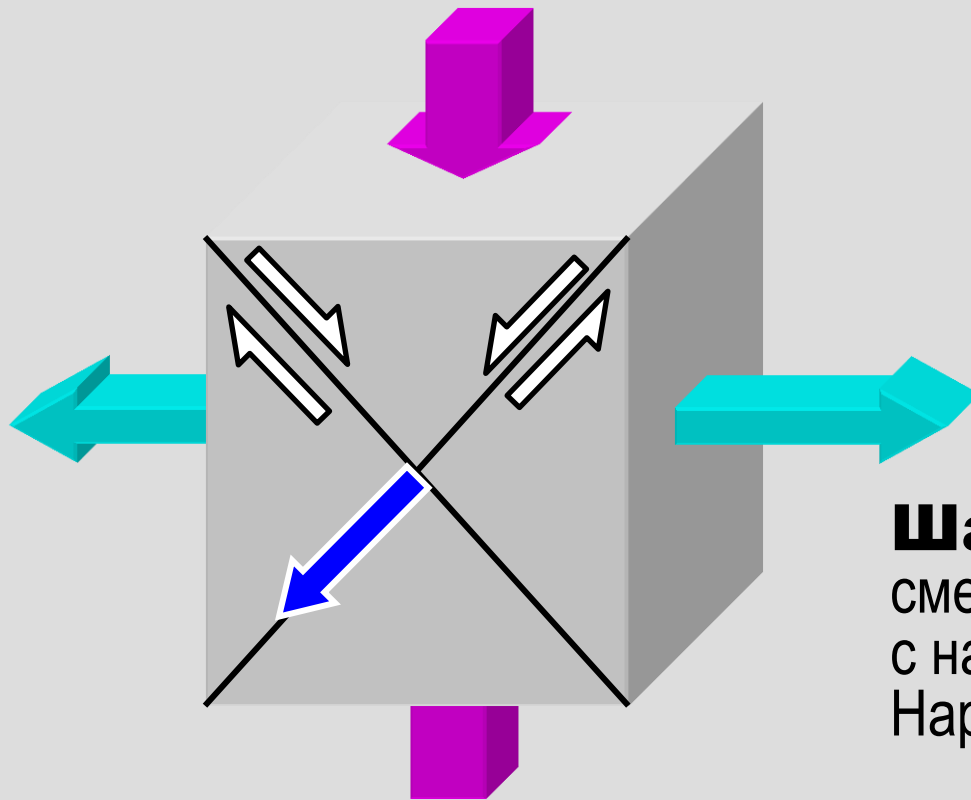


**Шаг 1.** Дорисовать третью ось напряжений

**Шаг 2.** Дорисовать трещины отрыва. Они ортогональны направлению растяжения ( $\sigma_1$ ) и расположены в плоскости  $\sigma_3 - \sigma_2$

Дорисуйте трещины отрыва

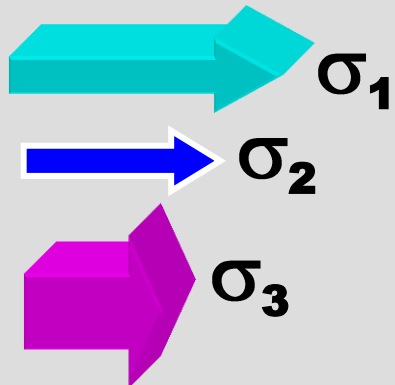
# Финальный тест 2



**Шаг 1.** Дорисовать третью ось напряжений

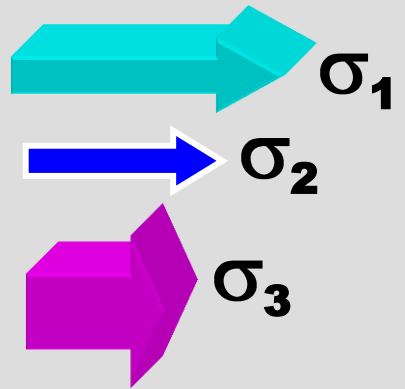
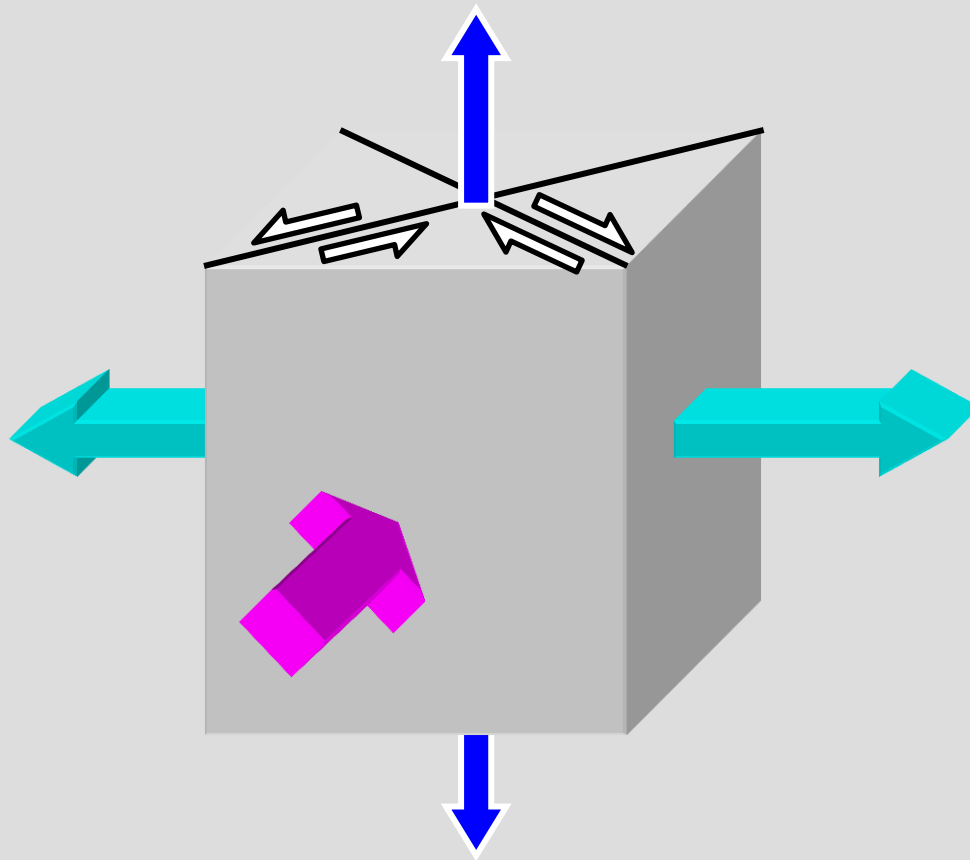
**Шаг 2.** Дорисовать трещины скола. Линия их пересечения совпадает с направлением  $\sigma_2$

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



**Дорисуйте трещины скола, определите направления смещения по ним**





Дорисуйте трещины скола

# Финальный тест 4

Вы наблюдаете две системы вертикальных сколов:

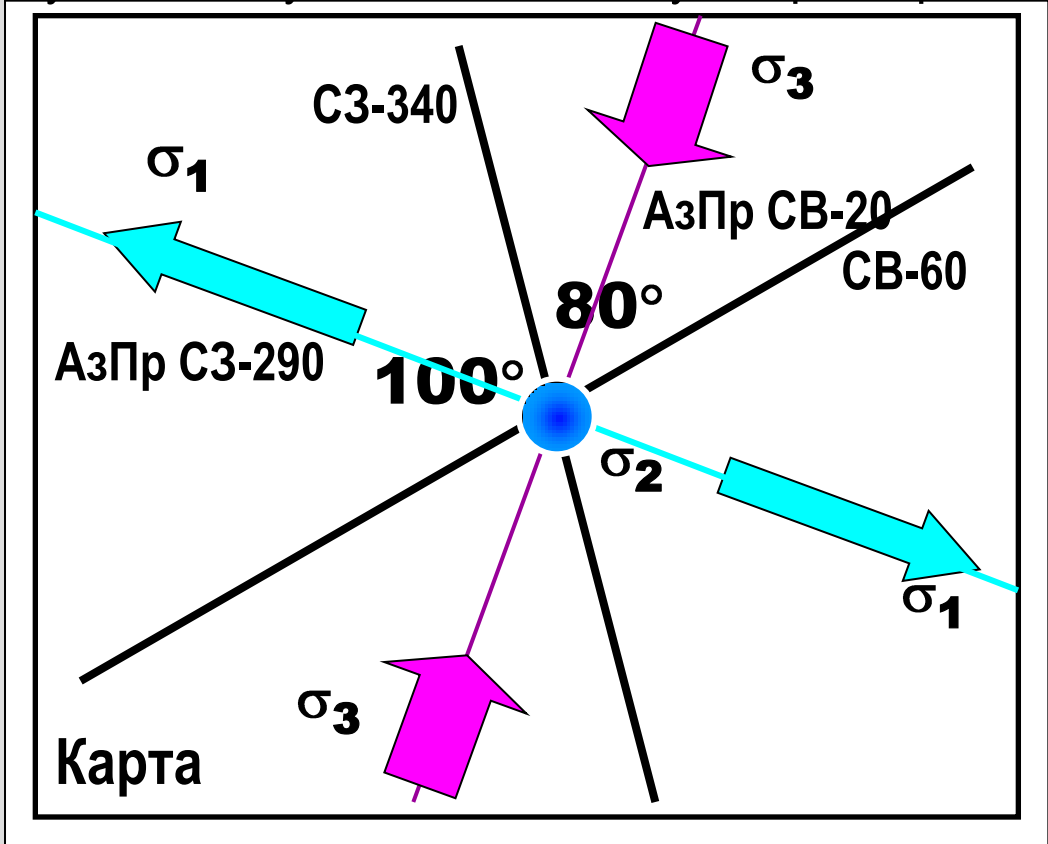
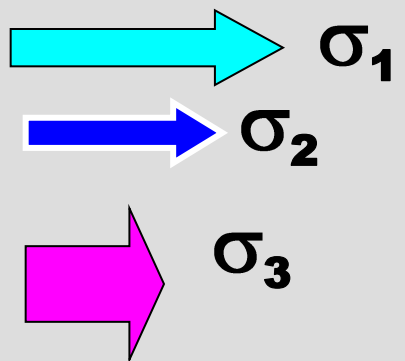
- 1) АзПр СВ-60; 2) АзПр СЗ-340.

Что можно сказать об ориентировке главных осей напряжений?

**Шаг 1.** Ось  $\sigma_2$  совпадает с линией пересечения сколов, т.е. – вертикальна и перпендикулярна плоскости  $\sigma_1 - \sigma_3$ .

**Шаг 2.** Определить острый и тупой углы между сколами и азимуты простираения биссектрис.

**Шаг 3.** Нарисовать оси напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ .  
 Ось сжатия  $\sigma_3$  совпадает с биссектрисой острого угла, ось растяжения  $\sigma_1$  совпадает с биссектрисой тупого угла.

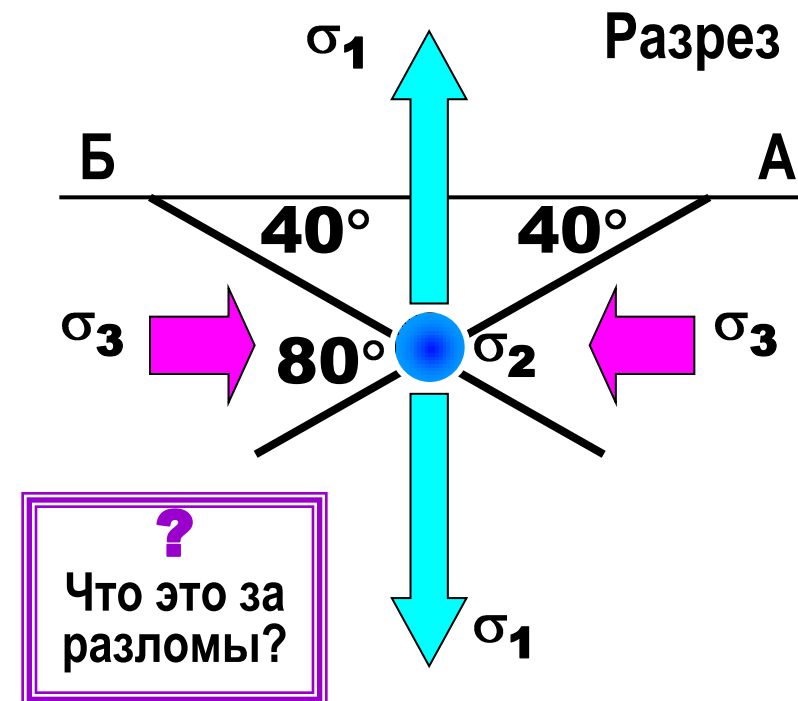
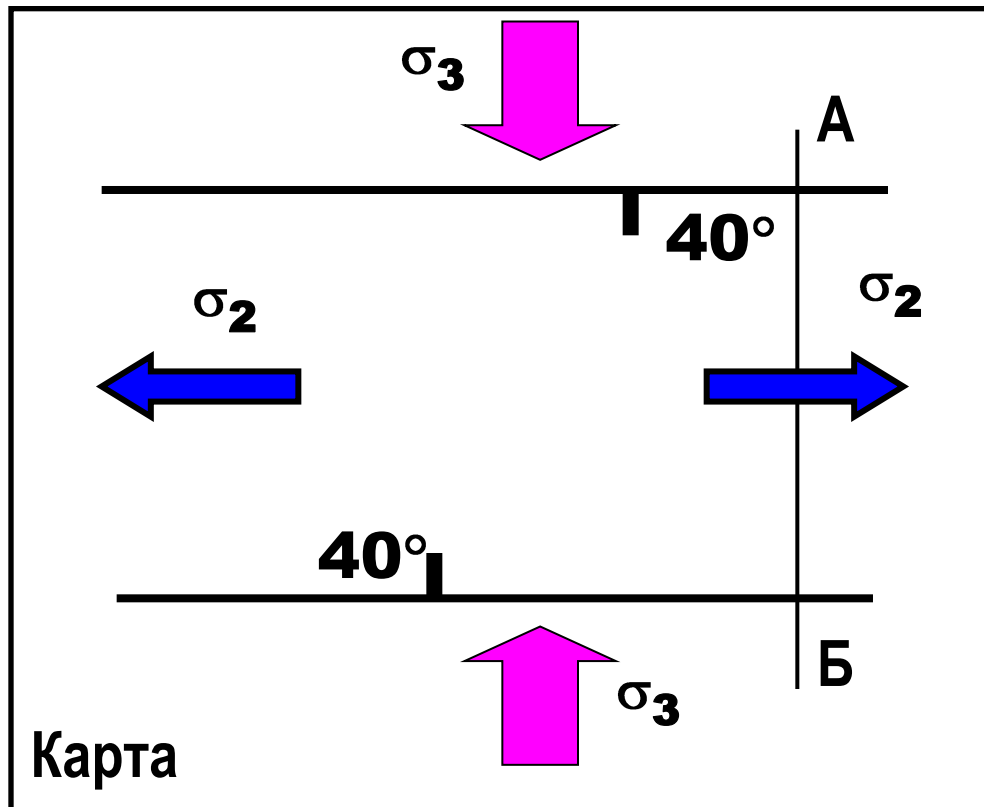


Вы наблюдаете две системы сколов: 1) АзПд Ю-180  $\angle 40$   
2) АзПд С-0  $\angle 40$ . Какова ориентировка главных осей напряжений?

**Шаг 1.** Поскольку нам нужна линия пересечения, надо построить разрез вкрест простирания трещин и определить острый угол.

**Шаг 2.** Нарисовать оси напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ . Ось сжатия совпадает с биссектрисой острого угла, ось растяжения – с биссектрисой тупого угла.

**Шаг 3.** Нарисовать оси напряжений  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  на карте. Ось среднего главного напряжения  $\sigma_2$  перпендикулярна оси  $\sigma_3$ .

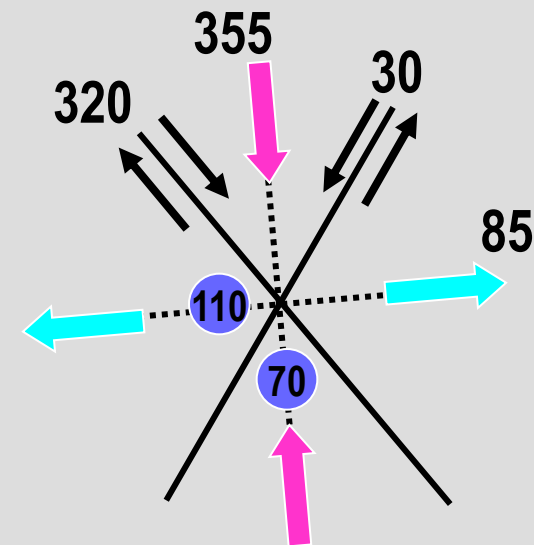


Вы наблюдаете две системы вертикальных трещин:

- 1) сколы правые – АзПр СЗ-320;
- 2) сколы левые – АзПр СВ-30.

Как ориентированы главные оси напряжений, если интерпретировать эти сколы:

- а) в рамках модели Андерсона;
- б) в рамках модели Риделя, считая, что первые это генеральные сколы?

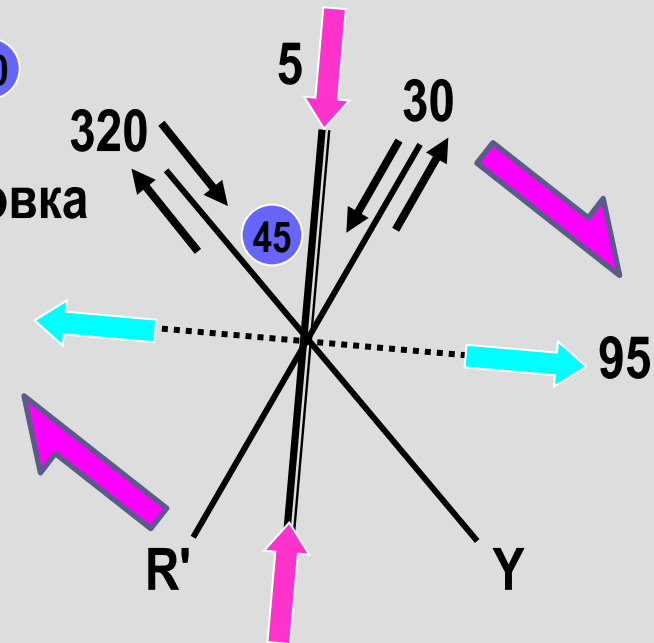


Андерсон

1. Тип 2 скола?

2. Угол  $\varphi$ ? 40

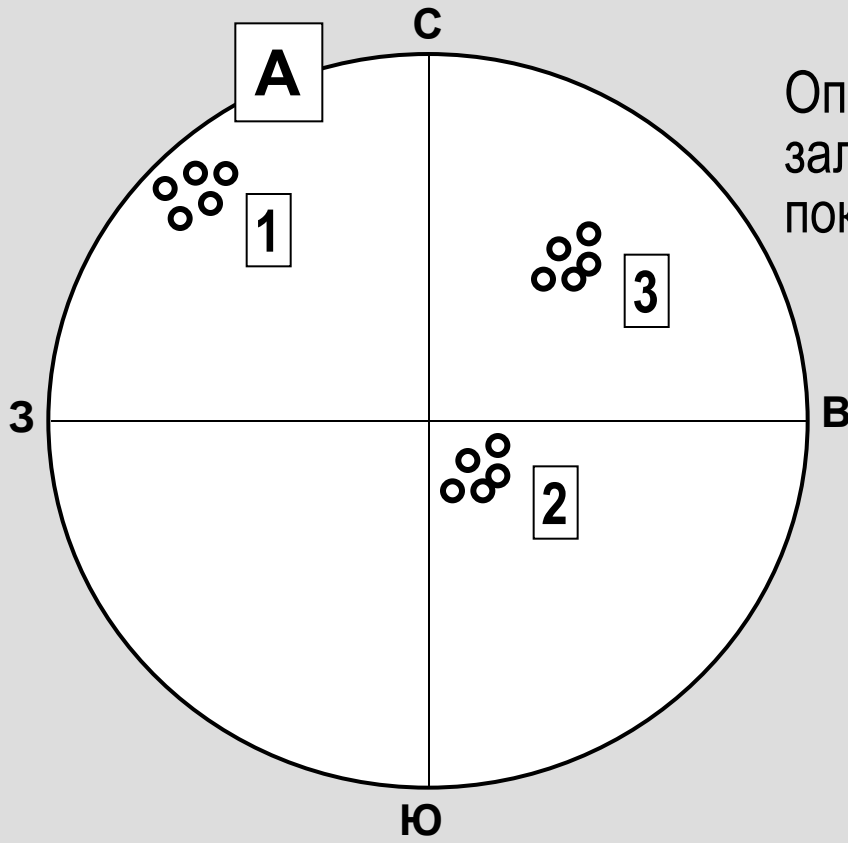
3. Ориентировка отрывов?



Ридель



# Финальный тест 7



Определите примерные элементы залегания групп трещин (1, 2, 3), показанных точками на диаграмме А

Определите примерные элементы залегания трещин (1, 2, 3), показанных дугами на диаграмме Б.

Определите примерные элементы залегания линий пересечения трещин (1, 2, 3), показанных стрелками на диаграмме Б.

