

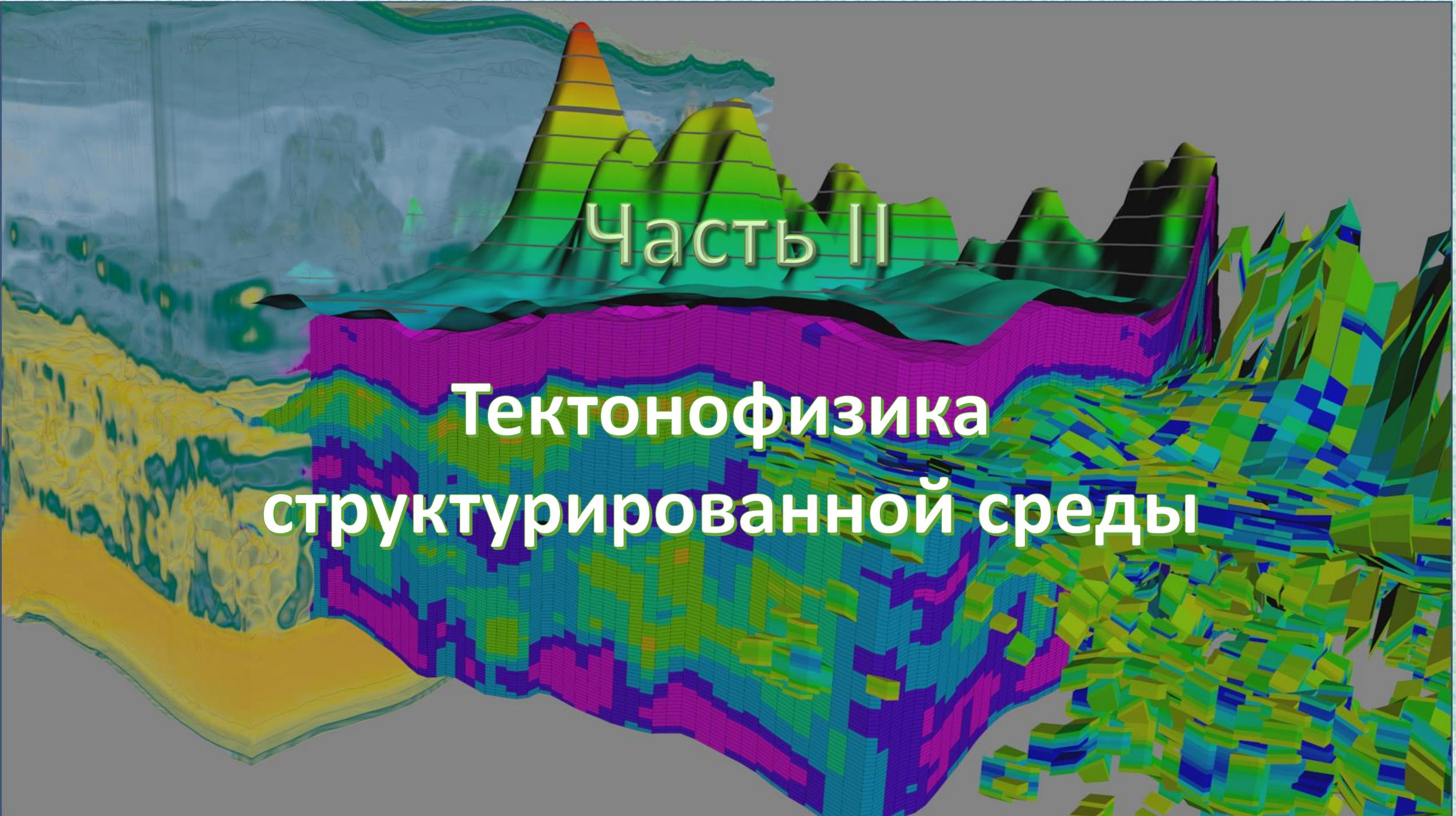


Геологический факультет МГУ
Кафедра динамической геологии
Лаборатория тектонофизики и геотектоники

Лекция 9

Тектонофизика

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

A 3D geological model showing a cross-section of the Earth's crust. The top surface is a topographic map with a color gradient from blue (low elevation) to red (high elevation). Below this, the crust is shown as a series of colored layers, with a prominent purple layer in the middle. The layers are deformed, showing folds and faults. The background is a light blue sky.

Часть II

Тектонофизика
структурированной среды

Лекция 9

Понятие о структурных парагенезах

Деформация кристаллов и их агрегатов

Объект и задачи исследования в тектонофизике

- Структура и деформационные процессы, происходящие в земной коре и их причины.
- Задачи:
 - Описание строения
 - Восстановление недостающей информации
 - Установление закономерностей строения
 - Установление деформированного состояния
 - Выяснение условий образования (обратная задача)

Изучение механизма формирования структур. Фундаментальное и прикладное значение решения этой задачи.

Что подразумевается под механизмом формирования структур

Каковы же движущие силы и обстановка структурообразования?

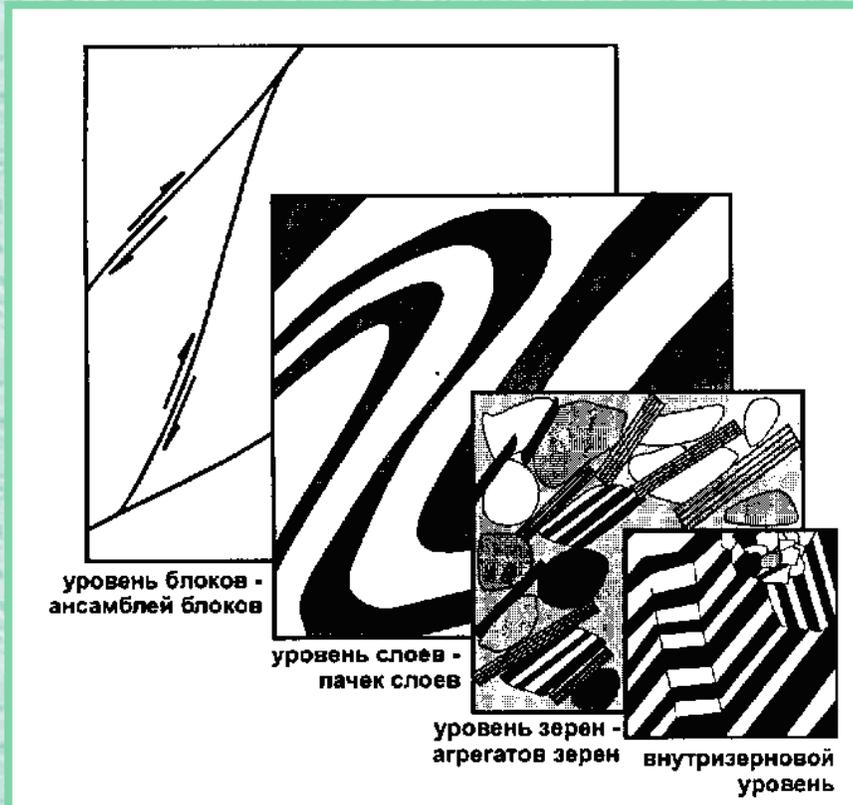
Движущие силы и обстановка структурообразования

- Деформируемая среда
- Характер напряженного состояния
- Давление
- Температура
- Флюидная обстановка
- Время

Особенности геологической среды

- Неоднородность
- Дискретность
- Естественная грубодискретная квазифрактальность (самоподобие блоковой делимости. Соотношение линейных размеров блоков на смежных рангах 3,5:1)
- Геосреда обладает свойством самоорганизации (самоподобие возникает естественно и спонтанно при интенсивном нагружении среды)

Уровни структурной организации геологической среды



Один из вариантов
(по В.Г. Талицкому)

- ✓ Разный масштаб структурных элементов
- ✓ Одни элементы являются составной частью других
- ✓ Существуют уровни высшего и низшего порядка

С процессами, происходящими на высших уровнях, связано возникновение тектонических напряжений

- Перераспределение напряжений. Существование концентраторов напряжений
- Релаксационный подход к описанию тектонических деформаций

Другие условия протекания деформационного процесса

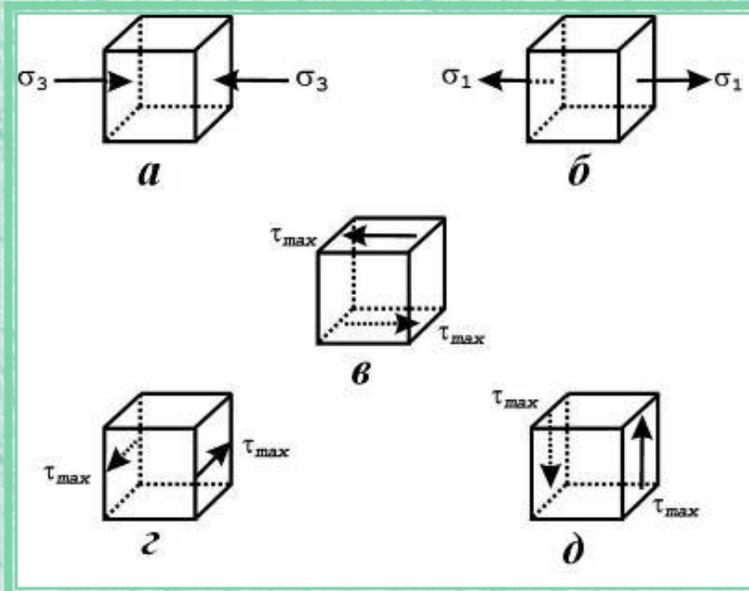
- **Характер напряженного состояния.**
Разный результат деформации в различной среде
- **Всестороннее давление**
- **Температура**
- **Флюидная обстановка**
- **Время**
 - ✓ Различие длительных и кратковременных деформаций
 - ✓ Стадийность формирования структуры

Понятие о структурных парагенезах

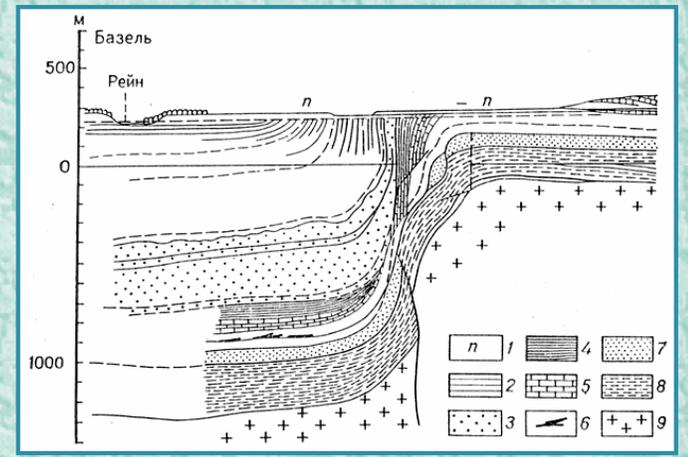
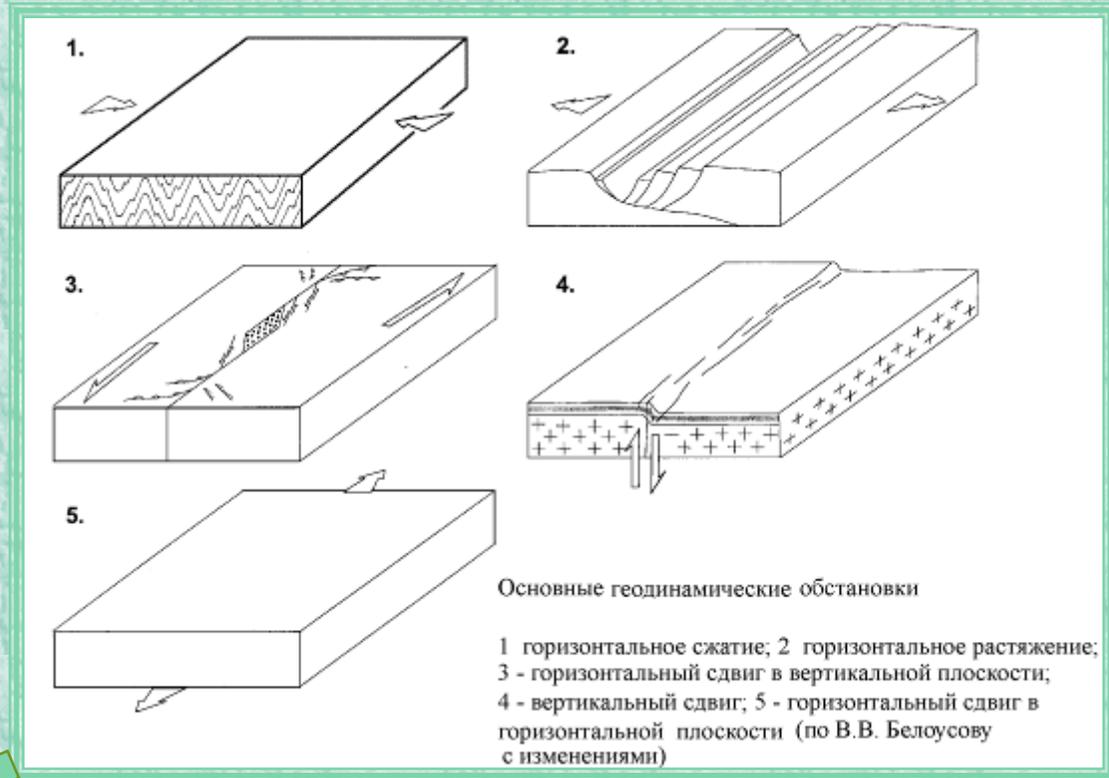
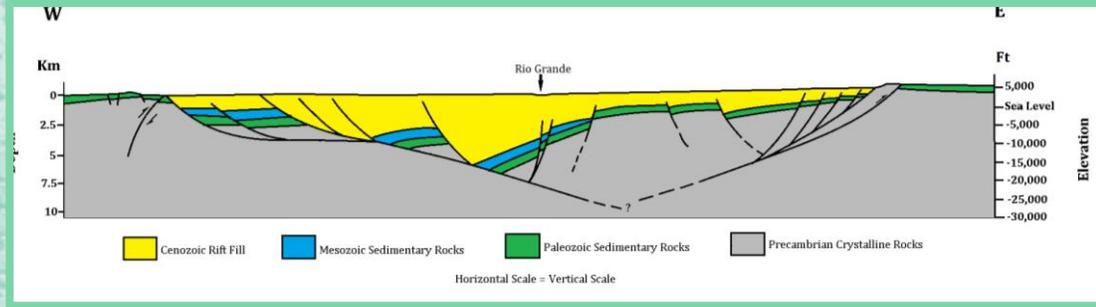
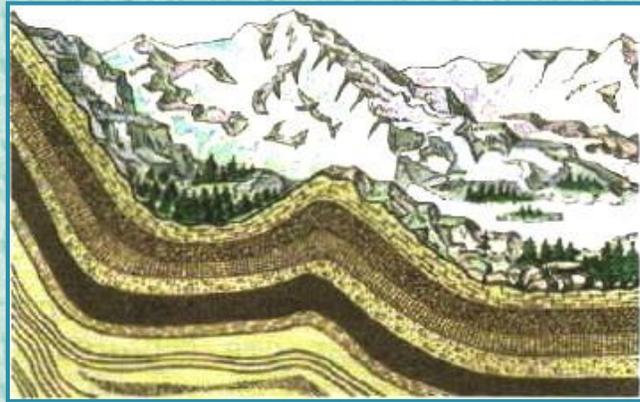
- Этимология
- Использование в других науках
- **Структурный парагенез**: совокупность структурных форм разного размера, возникающих в определенном объеме геологической среды, находящихся в определенных отношениях друг с другом и возникающих в *единой деформационной обстановке*
- Понятие о механической или геодинамической обстановке
- Определение структурного парагенеза по М.А. Гончарову
- Роль структурно-парагенетического анализа

Главные (элементарные) геодинамические обстановки

- Определение: главные оси нормальных девиаторных напряжений или оси максимальных касательных напряжений ориентированы ортогонально, т.е. в горизонтальном или вертикальном направлении
- Роль слоистости
- Принцип выделения обстановок



горизонтальное сжатие (*a*)
горизонтальное растяжение (*б*)
горизонтальный сдвиг в вертикальной плоскости (*в*)
вертикальный сдвиг (*г*)
горизонтальный сдвиг в горизонтальной плоскости (горизонтальное скашивание) (*д*).

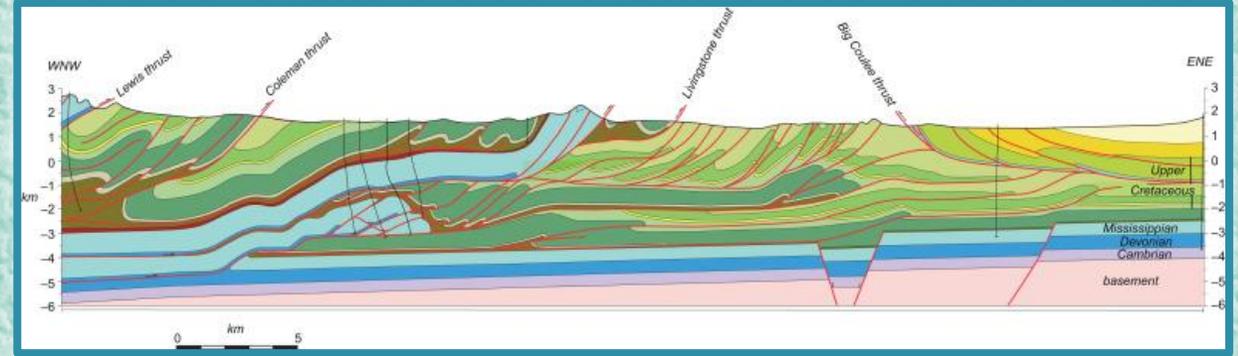
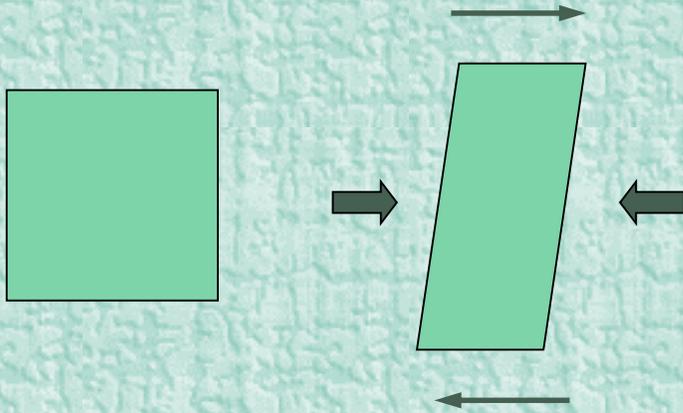


?

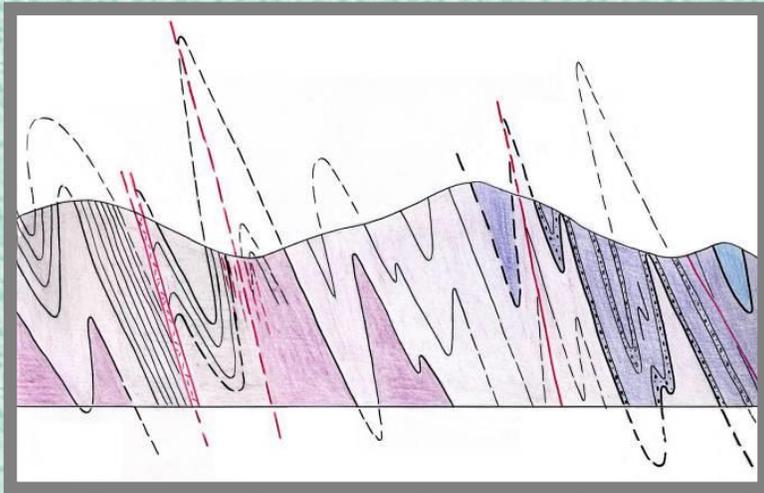


5 главных элементарных геодинамических обстановок с формирующимися в них структурами (по В.В. Белоусову с изменениями)

Сочетание обстановок



(RobButler, ClareBond, 2020)

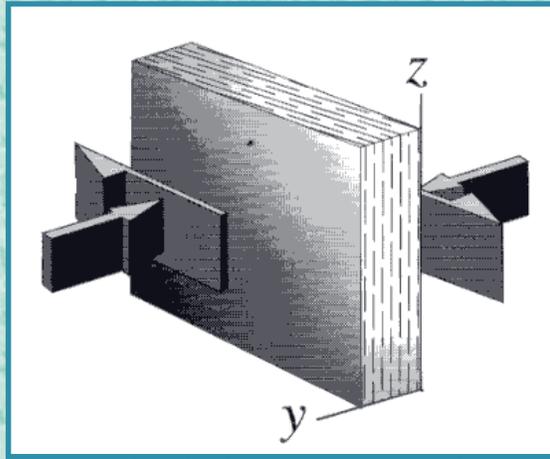


(по М.А. Гончарову и др.)

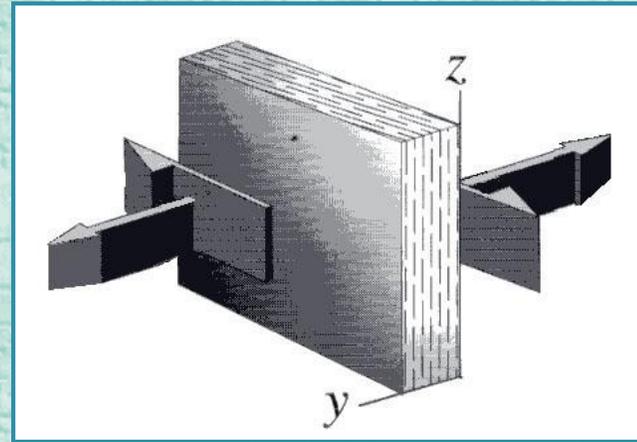
Все надвигово-складчатые и складчато-надвиговые структуры сформировались именно в этой обстановке

Обстановка сочетания горизонтального сжатия с горизонтальным скашиванием – очень часто встречающаяся обстановка, однако она не имеет собственного названия

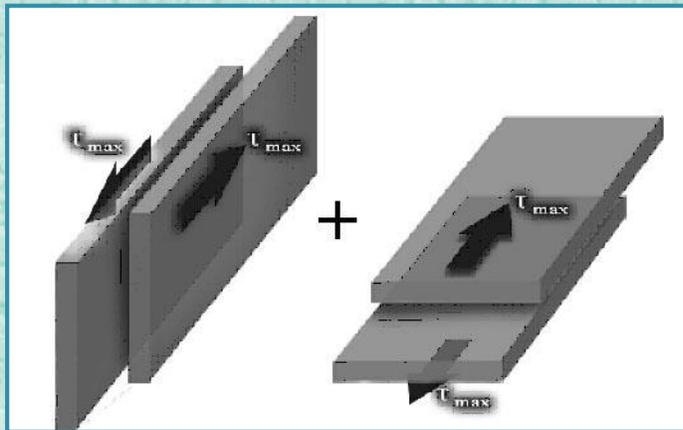
Сложные сдвиговые обстановки



транспрессия (сочетание горизонтального сдвига в вертикальной плоскости с горизонтальным сжатием)



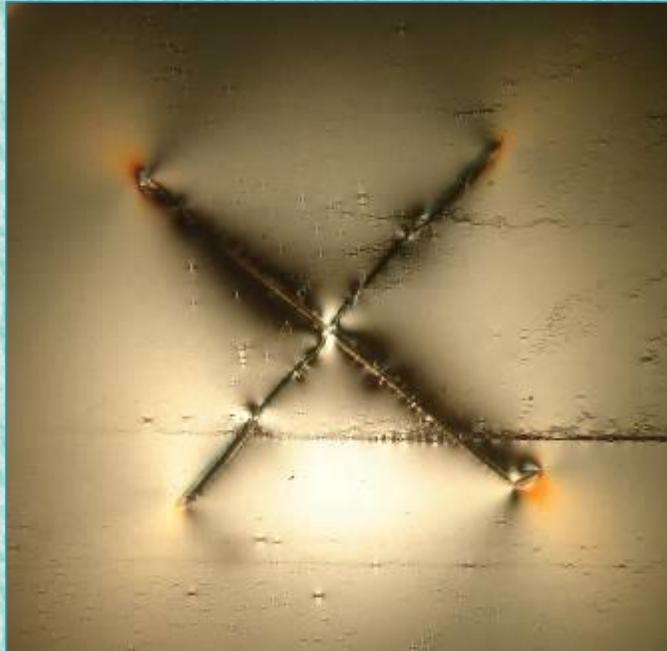
транстенсия (сочетание горизонтального сдвига в вертикальной плоскости с горизонтальным растяжением)



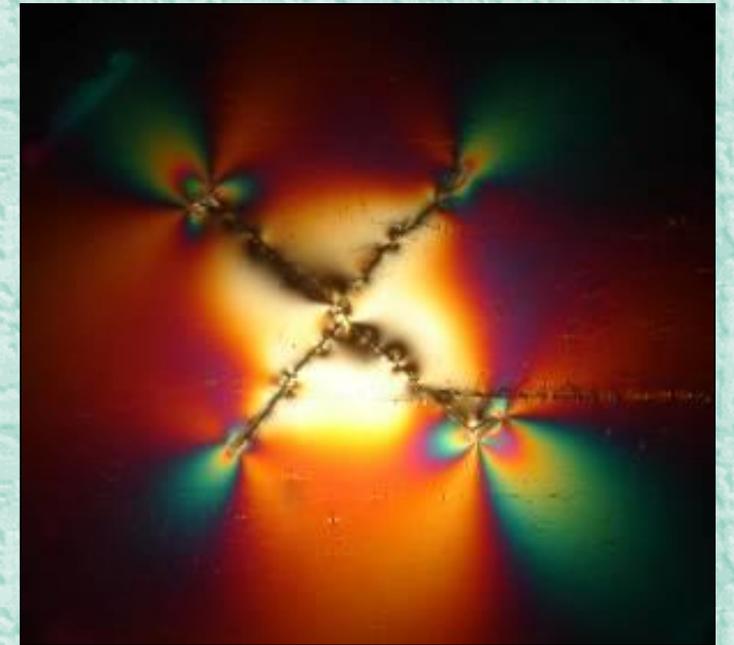
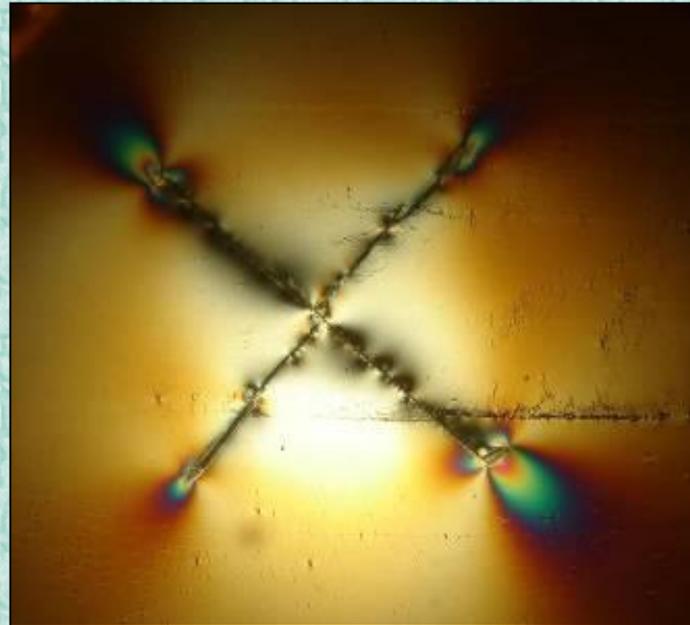
трансламинация (сочетание горизонтального сдвига в вертикальной плоскости с горизонтальным скашиванием)

- Геодинамические обстановки могут сменять друг друга во времени (пример сочетания горизонтального сжатия со скашиванием)
- В пределах каждой элементарной геодинамической обстановки существуют поля напряжений более высокого ранга (при этом формируются более мелкие структуры). Эти поля напряжений сильно отличаются от поля напряжений самого низкого ранга

Перераспределение напряжений в процессе деформации

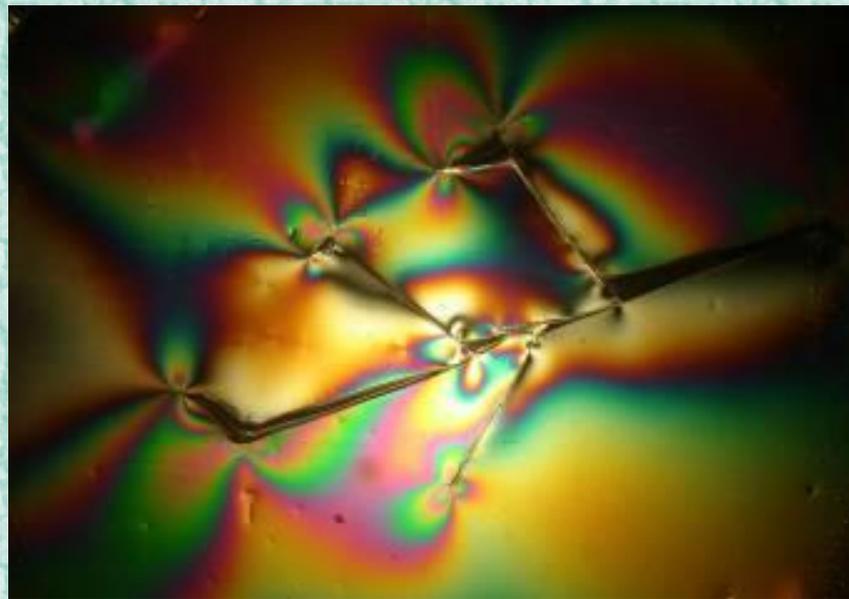
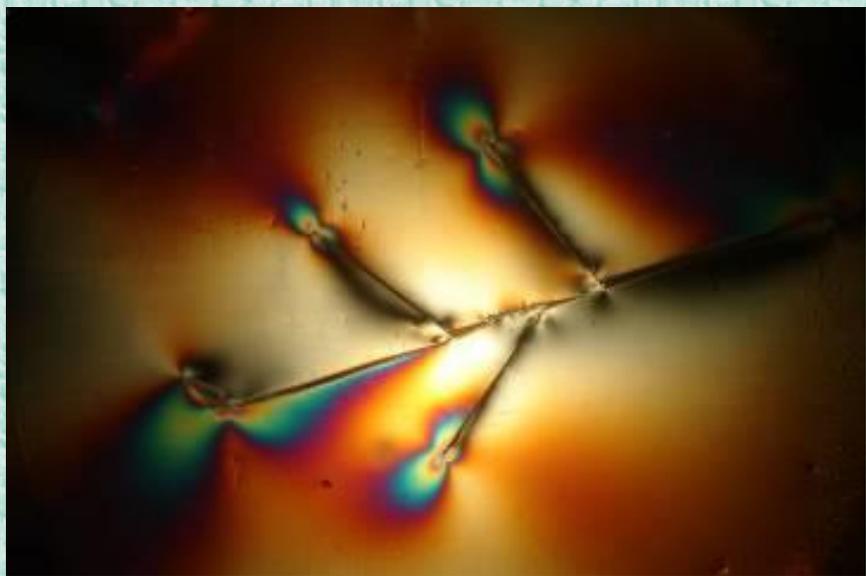
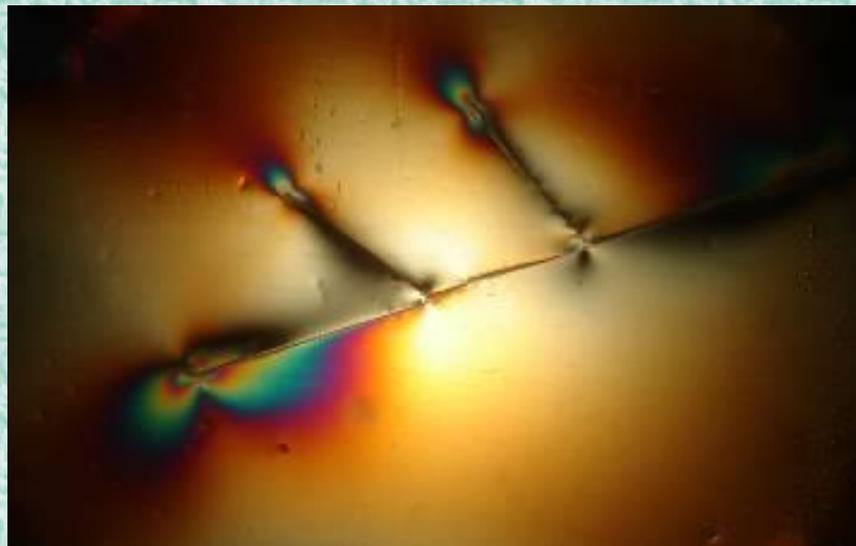
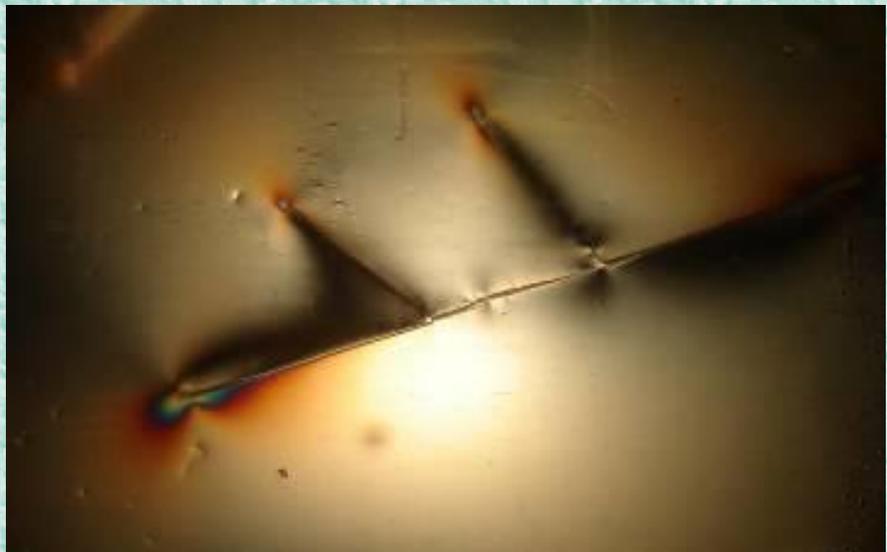


Здесь производилось горизонтальное сжатие.
Надрезы были сделаны заранее



Моделирование на оптически активных материалах
(эксперимент А.В. Черемных)

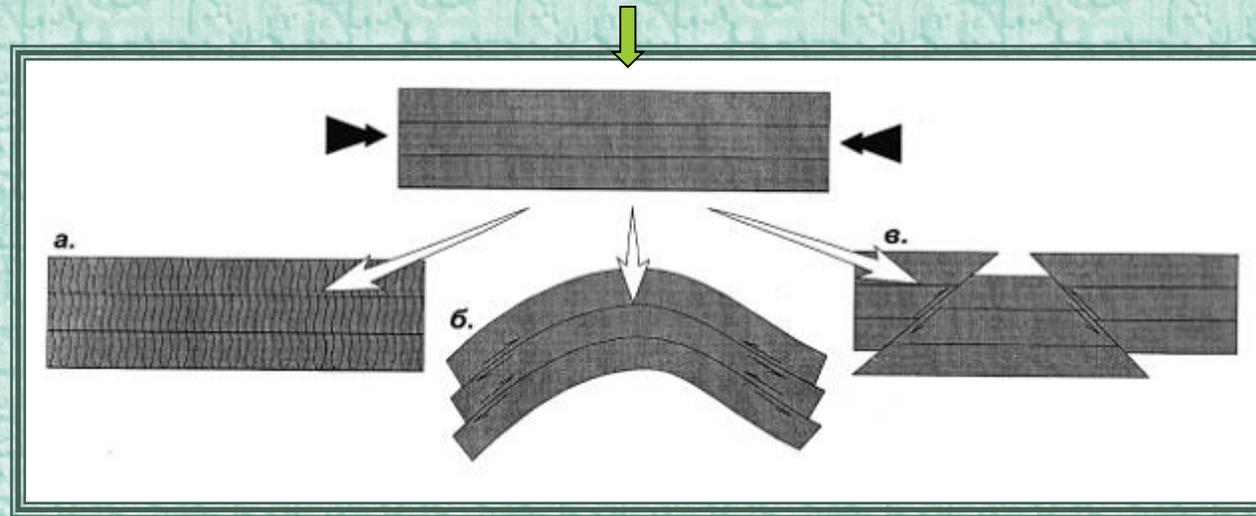
Еще один эксперимент



Релаксационный подход к описанию тектонических деформаций

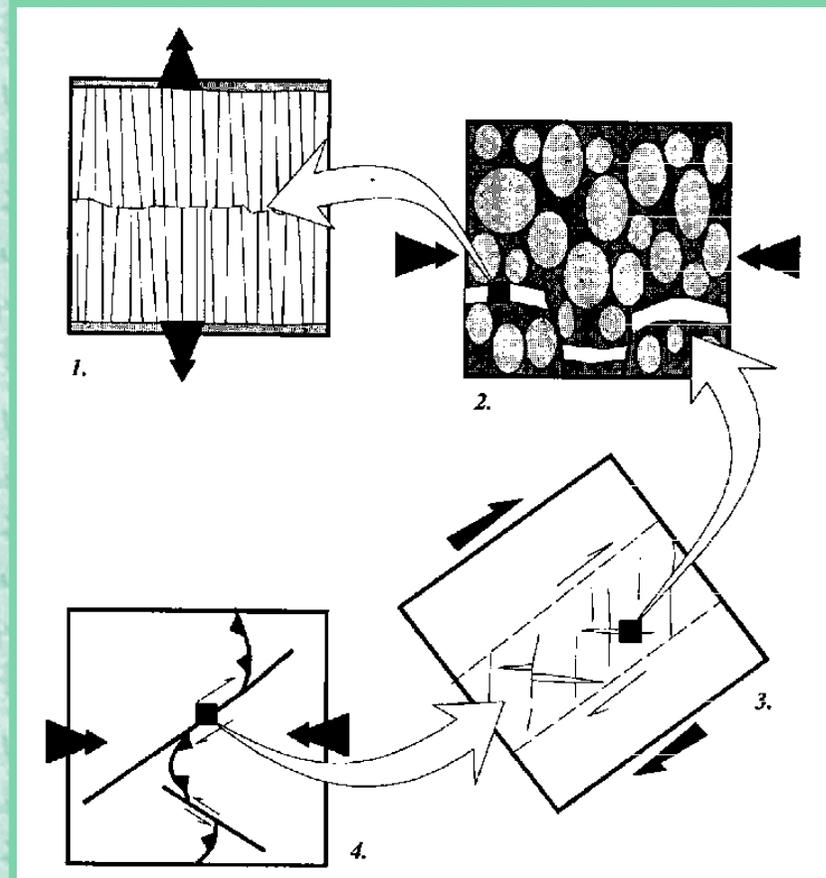
- ✓ Деформация осуществляется путем самосогласованных структурных перестроек на разных структурных уровнях
- ✓ Релаксация может осуществляться разными механизмами на разных уровнях
- ✓ В процессе принимают участие как изначальные, так и приобретенные структуры разных уровней

Различные структурные уровни деформации слоистой пачки песчаников, определяемые внешними условиями



(по А.Б. Курмасову)

Структурные парагенезы разных масштабов



Различные механические обстановки формирования структур и структурных парагенезов на разных уровнях структурной организации геологической среды (*по А.Б. Кирмасову*)

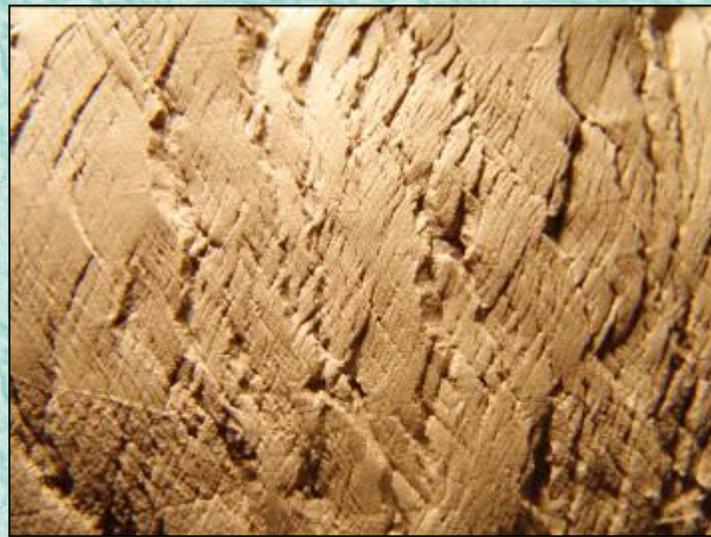
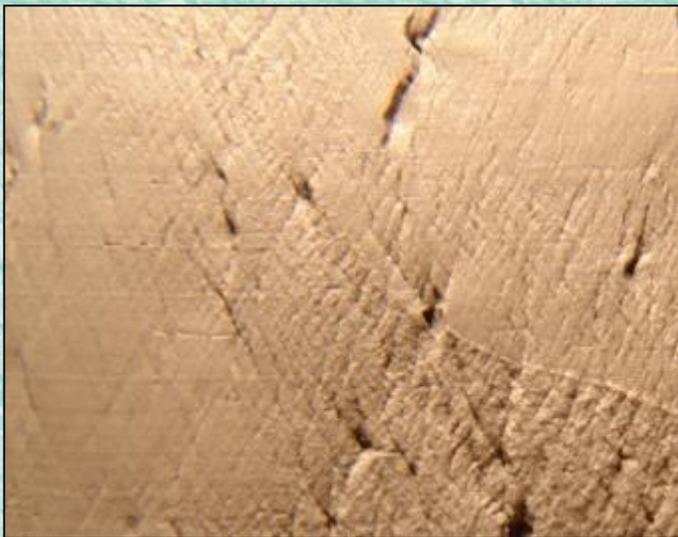
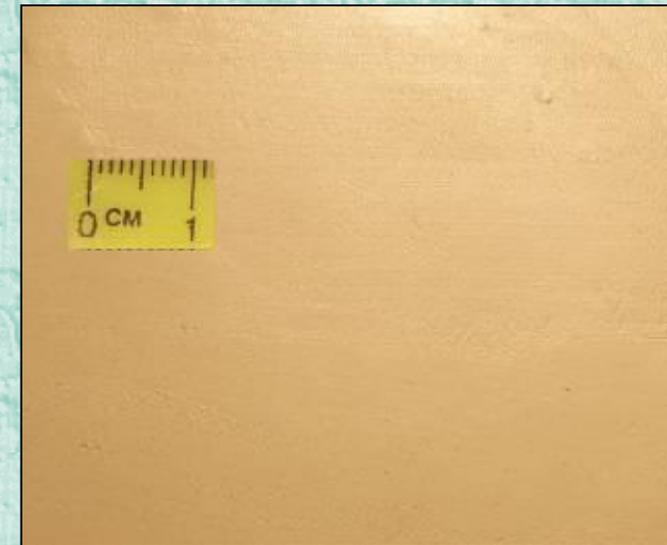
Относительность разделения деформаций на связные и разрывные

Структурные парагенезы состоят из отдельных структурных форм, которые обычно подразделяют на дизъюнктивные (разрывы) и пликативные. Деформации, соответственно, называются хрупкими и пластическими

В тектонике разрывами обычно называют поверхности или зоны, по которым наблюдается разобщение геологических тел на фрагменты и смещение этих фрагментов друг относительно друга

Известно, что типы разрывов со смещением варьируют от резких трещин до зон, вдоль которых происходит, скорее, пластическая деформация

Зарождение и развитие
разрывов в модели
из влажной глины
при растяжении

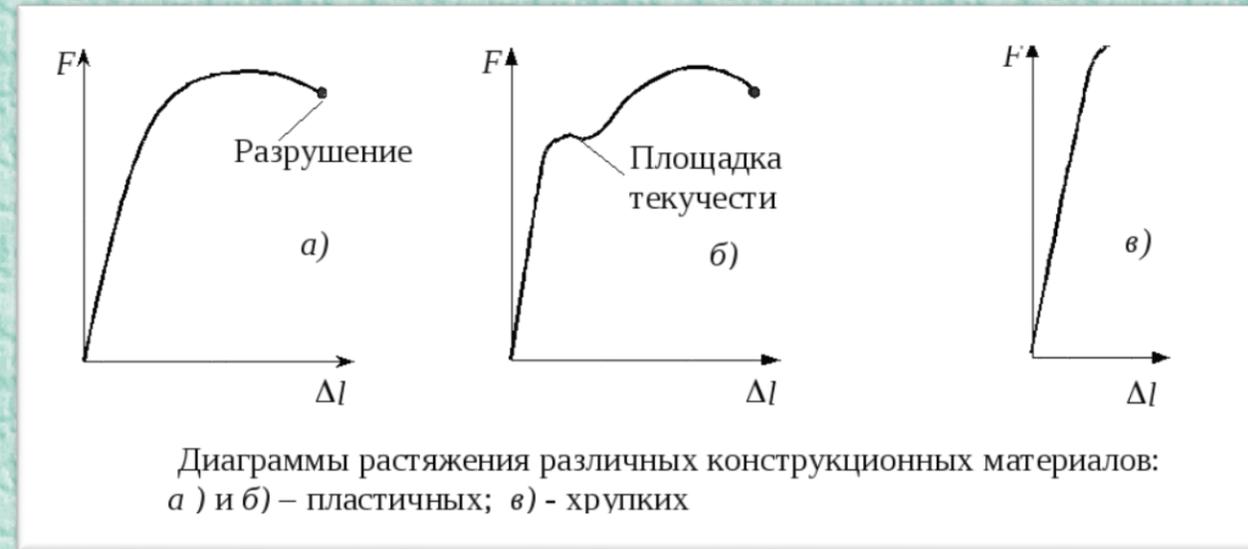


Эксперименты Лаборатории
тектонифизики и геотектоники МГУ

Где граница между разрывной и пластической деформацией?

Установить эту границу пытались, используя:

- Интуитивный подход
- Анализ деформационных диаграмм
- Степень нарушения сплошности среды (зависит от масштабов рассмотрения)
- Степень однородности деформации



Разрыв - предельный случай неоднородности деформации; или, по-другому, это узкие протяженные зоны резкой локализации (концентрации) деформации

В неоднородной среде утрачивается противопоставление разрывной и пластической деформации

Возможные подходы к классификации структурных парагенезов *(по В.А.Галкину)*

- По принадлежности к структурному уровню (уровни зерен, агрегатов зерен, слоев, пачек слоев, толщ, блоков и ансамблей блоков);
- По доминирующим механизмам деформационного процесса (механические, деформационно-химические, деформационно-метаморфические, деформационно-магматические и др.);
- По характеру распределению в пространстве (локальные, регулярные, повсеместные, пронизывающие);
- По временным соотношениям друг с другом (синхронные, последовательные, одновременные)
- По механическим обстановкам (горизонтального сжатия, горизонтального растяжения, трех типов сдвига, комплексные);
- По температурным условиям формирования (высоко- и низкотемпературные);
- По геодинамической обстановке формирования (континентального рифтогенеза, океанического рифтогенеза, активных окраин, пассивных окраин, коллизионные, орогенные и т.п.)

Выбор подхода зависит от поставленных задач

Решение обратных задач с помощью структурно-парагенетического анализа сопряжено с немалыми трудностями

Механика структурированной среды

A micrograph showing a complex microstructure of deformed crystals and aggregates. The image features a dense network of dark, elongated, and somewhat irregularly shaped regions, likely representing dislocations or grain boundaries. These dark regions are interspersed with lighter, more crystalline-looking areas. The overall appearance is highly textured and suggests a material that has undergone significant plastic deformation. The text is overlaid in the center of the image.

Деформация кристаллов и их агрегатов

Два подхода к изучению пластичности и деформации твердых тел:

1. Атомно-молекулярный подход
2. Мезомеханика структурно-неоднородных сред



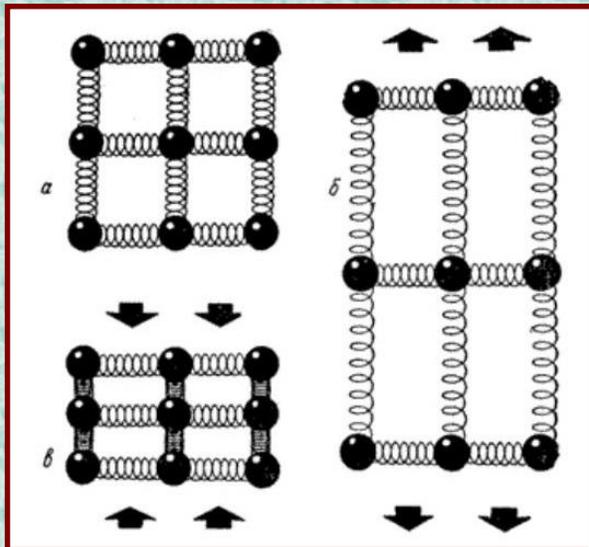
Атомно-молекулярный подход

В отличие от механики сплошных сред, основанной на абстрактном математическом понятии частицы сплошной среды, в атомно-молекулярном подходе при описании механических свойств твердых тел фигурируют взаимодействующие между собой атомы и молекулы, из которых состоят реальные материалы.

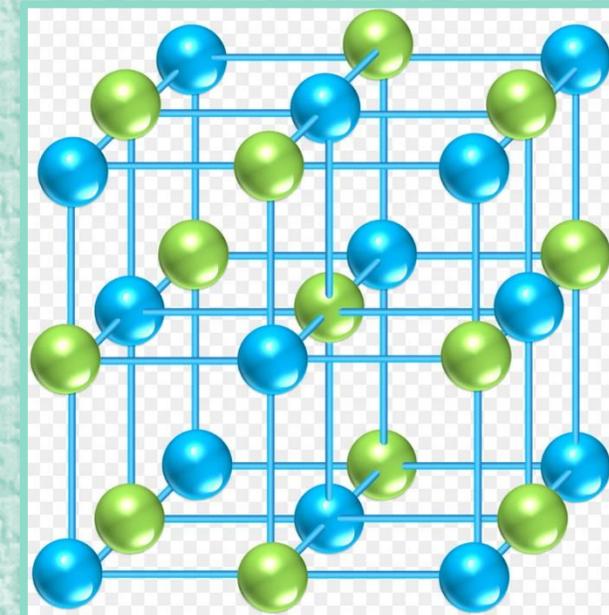
Горные породы часто представляют собой сложные многокомпонентные и многофазные системы, деформацию которых нельзя свести к деформациям составляющих их компонентов. Тем не менее, при этом невозможно обойтись без понимания процессов, происходящих в относительно простых кристаллических структурах: монокристаллах и однофазных поликристаллах.

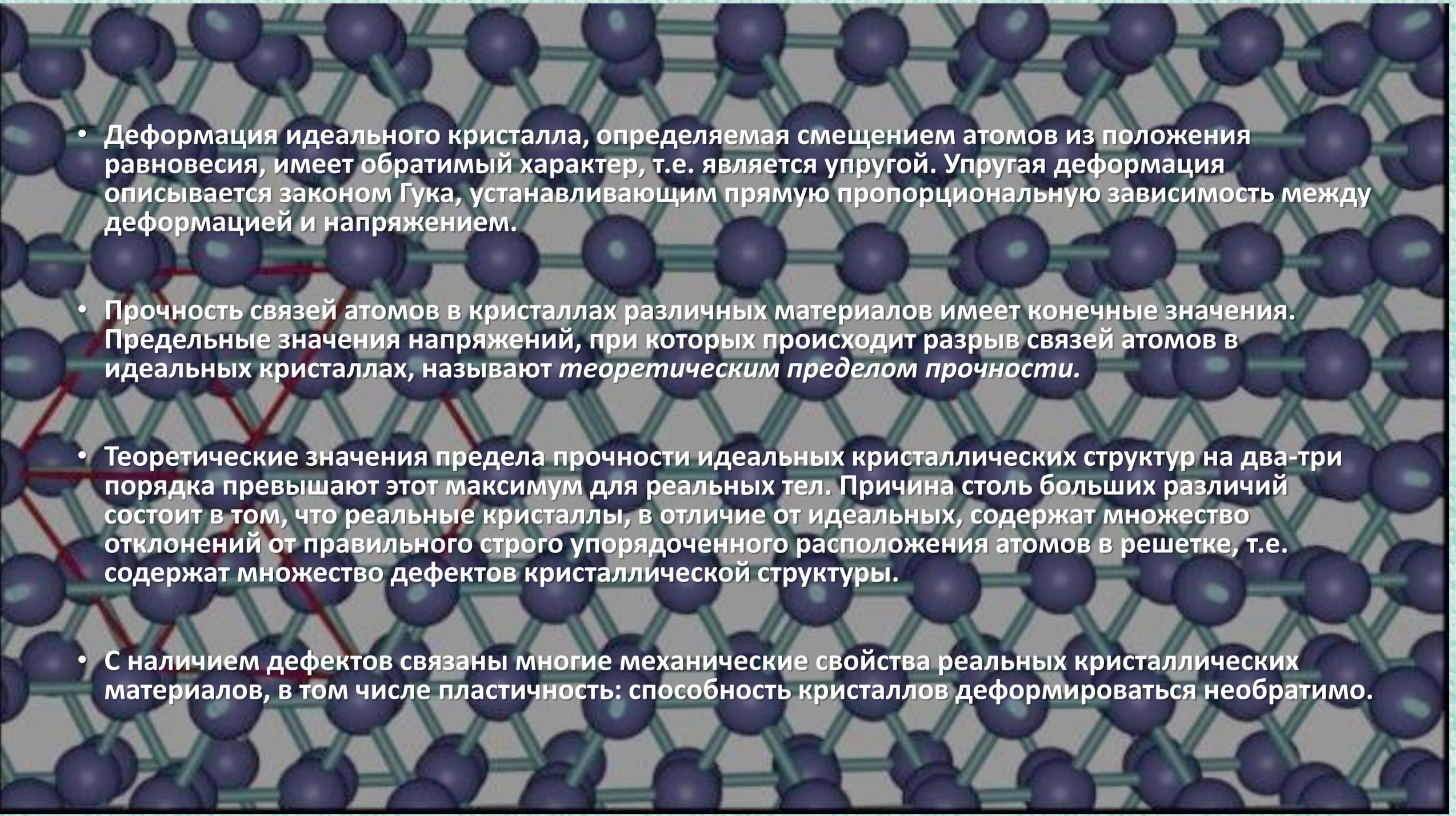
Идеальный кристалл

- В кристаллофизике модели идеальных кристаллов представляются в виде правильных трехмерных решеток различной конфигурации, в узлах которых располагаются атомы.
- В узлах кристаллической решетки атомы удерживаются силами межатомного взаимодействия, имеющими электрическую природу. На рисунке эти силы изображены в виде одинаковых пружин, образующих каркас решетки, в узлах которой расположены шарики-атомы.



- Окажем на кристалл, находящийся в состоянии равновесия, внешнее воздействие, например, растянем его в каком-то направлении. Пружины, соединяющие атомы растянутся и в них возникнут силы, которые будут стремиться вернуть атомы в исходное равновесное состояние. Иными словами, при деформации в кристалле возникнут внутренние напряжения.
- При снятии с кристалла растягивающей нагрузки пружины сожмутся и вернут атомы в исходные позиции, т.е. исчезнут внутренние напряжения и кристалл примет прежнюю форму.



- 
- Деформация идеального кристалла, определяемая смещением атомов из положения равновесия, имеет обратимый характер, т.е. является упругой. Упругая деформация описывается законом Гука, устанавливающим прямую пропорциональную зависимость между деформацией и напряжением.
 - Прочность связей атомов в кристаллах различных материалов имеет конечные значения. Предельные значения напряжений, при которых происходит разрыв связей атомов в идеальных кристаллах, называют *теоретическим пределом прочности*.
 - Теоретические значения предела прочности идеальных кристаллических структур на два-три порядка превышают этот максимум для реальных тел. Причина столь больших различий состоит в том, что реальные кристаллы, в отличие от идеальных, содержат множество отклонений от правильного строго упорядоченного расположения атомов в решетке, т.е. содержат множество дефектов кристаллической структуры.
 - С наличием дефектов связаны многие механические свойства реальных кристаллических материалов, в том числе пластичность: способность кристаллов деформироваться необратимо.

Реальные кристаллические структуры



Дефекты кристаллических структур

- точечные («нуль мерные»),
- линейные («одномерные»)
- плоскостные («двумерные»)
- объемные («трехмерные»)

Точечные дефекты

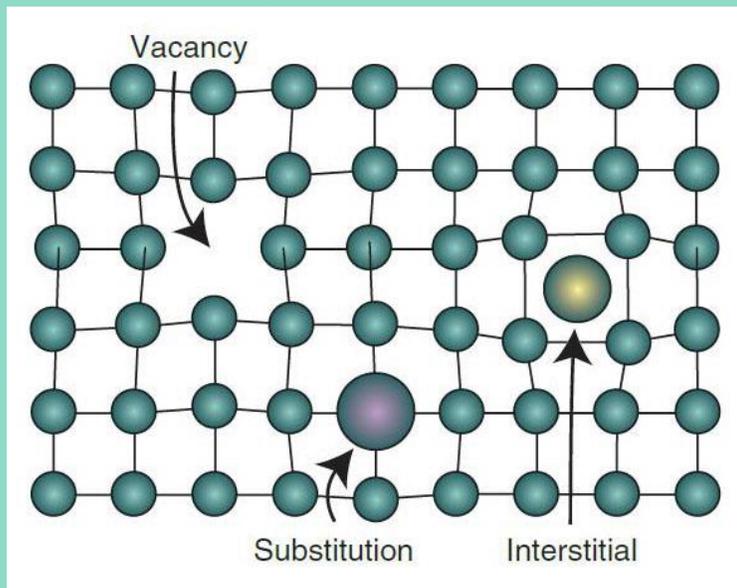
- **межузельные атомы** – атомы, располагающиеся между узлами решетки;
- **вакансии** – узлы решетки, не занятые атомами

✓ В огромном ансамбле рассогласованно колеблющихся атомов случайно могут возникать ситуации, когда энергия колебаний какого-то атома превышает энергию взаимосвязи атомов в решетке и атом покидает узел, переходя в межузлие.

✓ Число точечных дефектов в реальных кристаллах возрастает с ростом температуры.

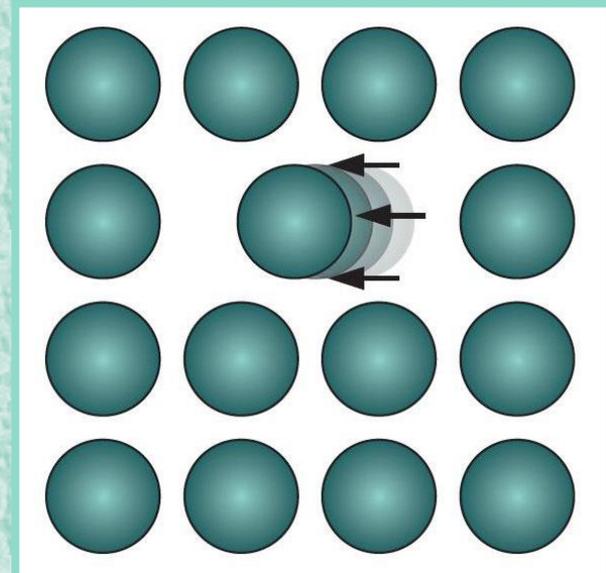
✓ Существует равновесная концентрация точечных дефектов, которая поддерживается самопроизвольно.

Точечные дефекты



(Fossen, 2011)

Точечные дефекты в кристаллической решетке представлены вакансиями (дырками), замещающими включениями и интерстиционными (межузельными) включениями (атомами). Атомы в интерстициях могут отличаться по природе от атомов основной решетки и препятствовать пластической деформации. Вакансии представляют собой наиболее важные точечные дефекты при пластическом течении кристаллов.



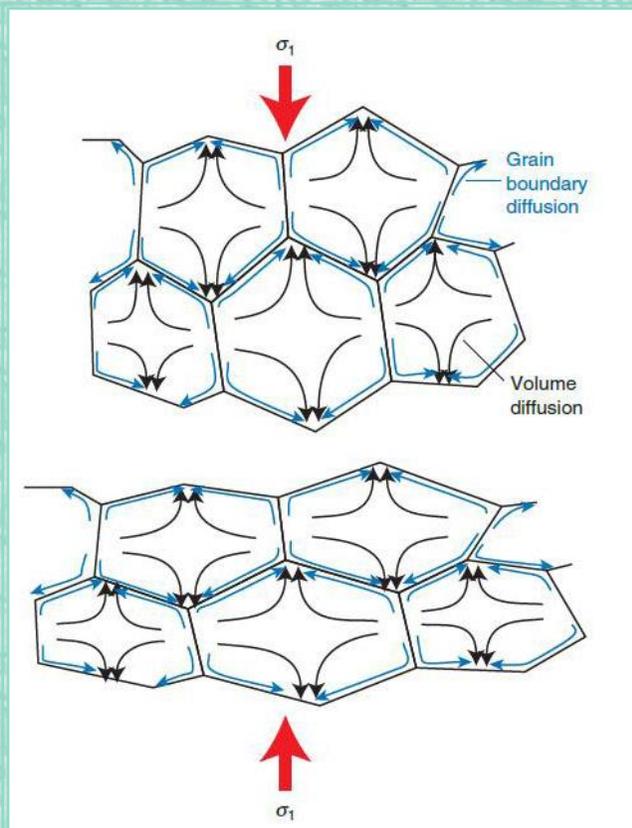
(Fossen, 2011)

Диффузия

Движение (миграция) вакансий через атомную решетку называется диффузией. Дырка движется, как бы меняясь местами с соседним атомом

Диффузионная ползучесть

- ✓ Миграция вакансий в кристаллической решетке называется диффузионным массопереносом. Обычно говорят о *диффузионной ползучести*.
- ✓ Диффузия вакансий через кристалл (внутри зерна) известна как объемная диффузия или ползучесть (крип) Набарро-Херринга.



- ✓ Если массоперенос осуществляется за счет диффузии по границам зерен (зернограничная диффузия), то это ползучесть (крип) Кобле.

Оба вида описанной ползучести осуществляются при очень высокой температуре (но для ползучести Кобле нужны несколько меньшие температуры, чем для ползучести Набарро-Херринга)

На рисунке стрелками показаны оба типа ползучести. Вакансии всегда движутся в направлении мест с повышенным давлением, так что минерал накапливает деформацию с течением времени

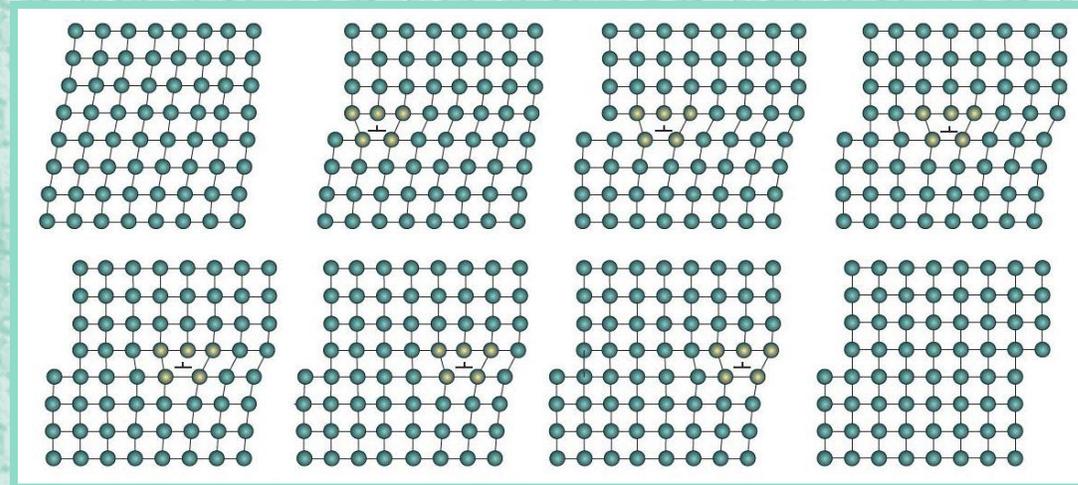
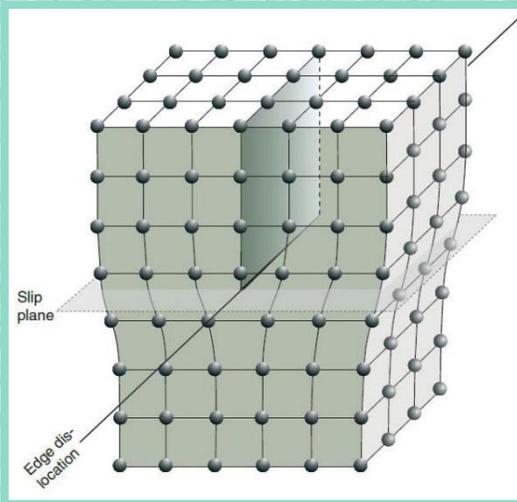
Деформационный механизм на микроуровне:
диффузионная ползучесть

(Fossen, 2011)

Линейные дефекты

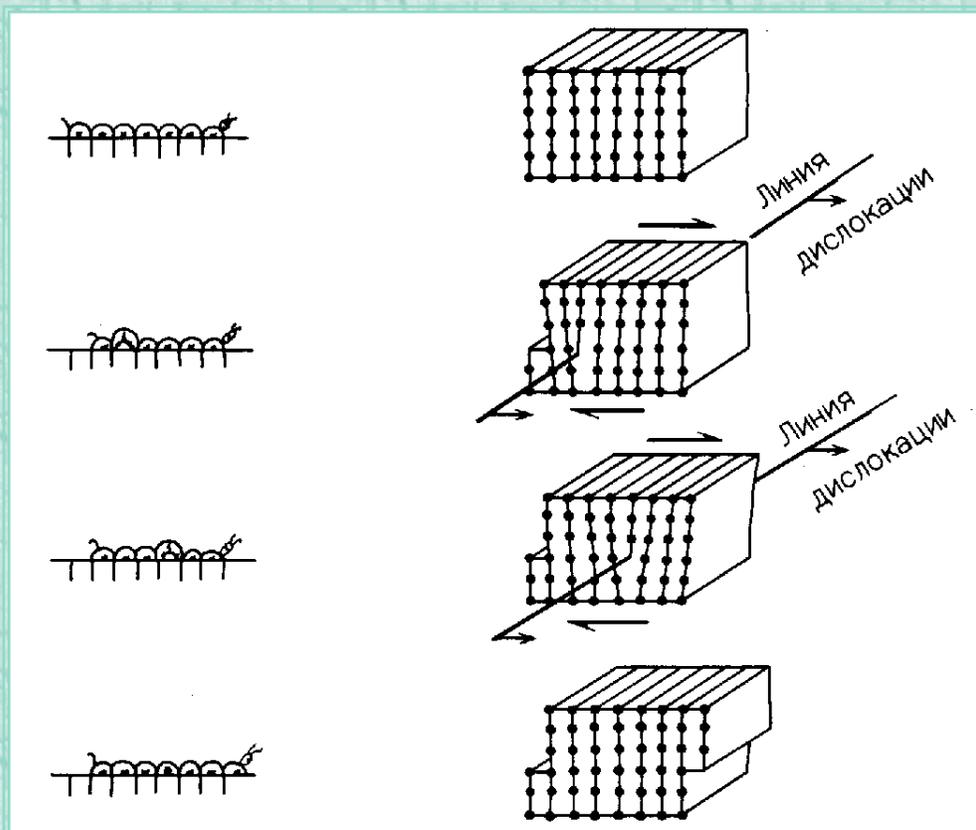
краевые дислокации

- В результате пластической деформации внутри кристалла часто возникают области, целиком смещенные относительно их окружения. Такие области ограничены дислокационной петлей. Выделяют два типа подобных дислокаций. На границе дополнительно вставленной в идеальный кристалл полуплоскости возникает **краевая дислокация** – край этой полуплоскости, около которой максимальны искажения структуры.



(Fossen, 2011)

Образование и движение краевой дислокации через кристаллическую решетку. Процесс может быть уподоблен движению гусеницы, т.к. только связи вдоль линии дислокации (она перпендикулярна чертежу) разрываются в один и тот же момент времени. Таким образом энергия, которая нужна для движения дислокации, все время остается на низком уровне



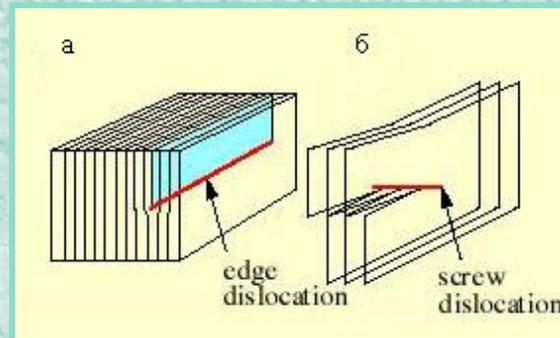
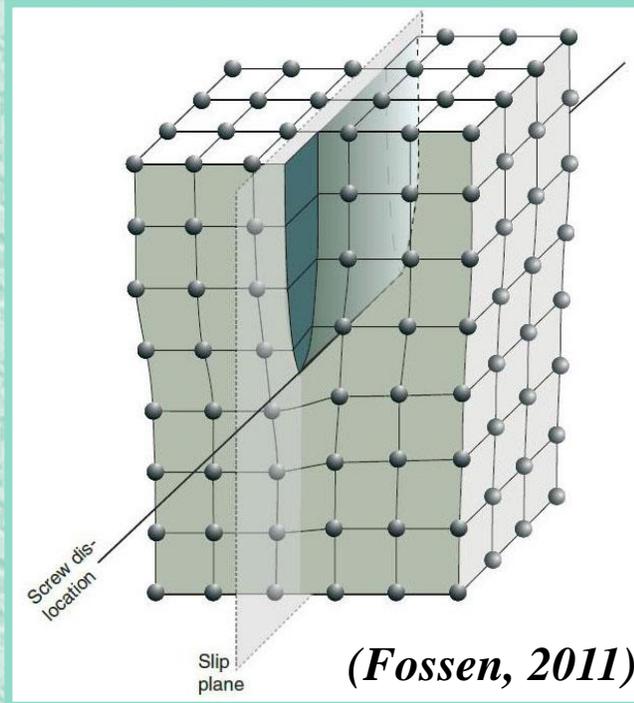
(Николя, 1992)

Скольжение вследствие распространения краевой дислокации.

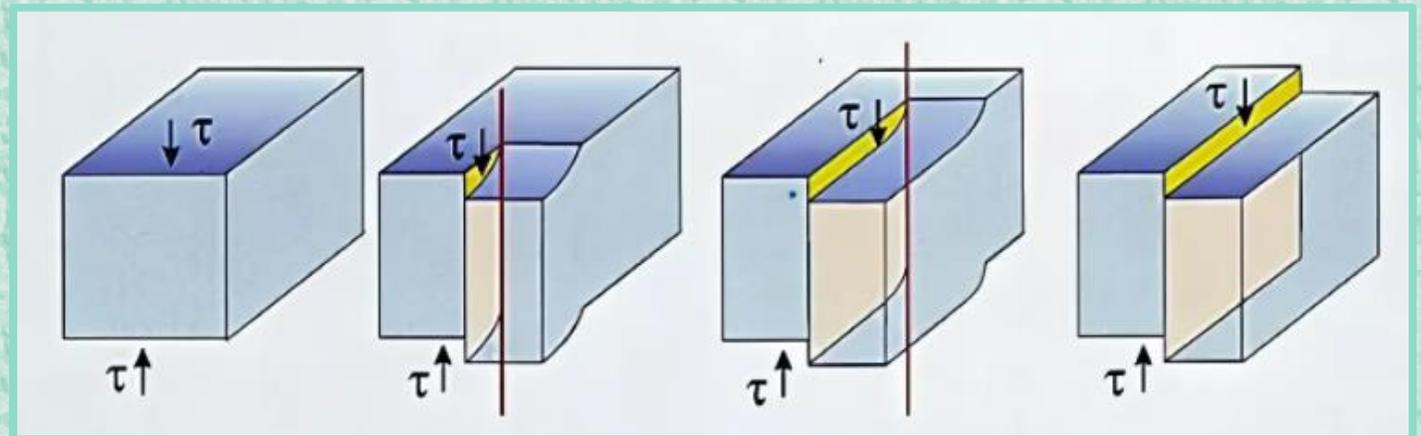
Слева – «гусеничное» движение. Справа – скольжение в кристалле при продвижении краевой дислокации. Дополнительная полуплоскость соответствует складкам гусеницы.

ВИНТОВЫЕ ДИСЛОКАЦИИ

- **Винтовая дислокация** образуется при смещении плоскостей кристаллической решетки путем их геликоидального поворота вокруг оси искаженной области.



Винтовые дислокации могут быть уподоблены прорезанной пачке бумаги

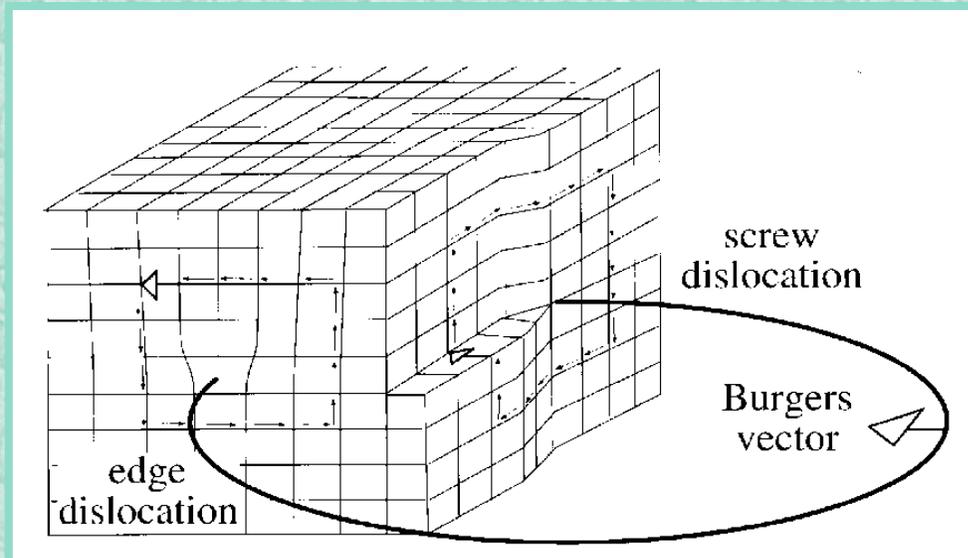


Интернет-ресурс

Винтовая дислокация включает в себя скручивание решетки

Скольжение, вызванное продвижением винтовой дислокации.

- ❑ Как мы видели, движение двух рассмотренных типов дислокаций через кристалл является до некоторой степени различным, но их объединенные усилия могут приводить к формированию сложных дислокаций, которые содержат элементы обоих видов.
- ❑ Краевая и винтовая дислокации противоположного знака образуют петлю дислокации.
- ❑ Плоскость петли называется плоскостью скольжения, а направление сдвига, параллельное линии винтовой дислокации – направлением скольжения. Вектор смещения, описывающий это скольжение, называется вектором Бюргерса.

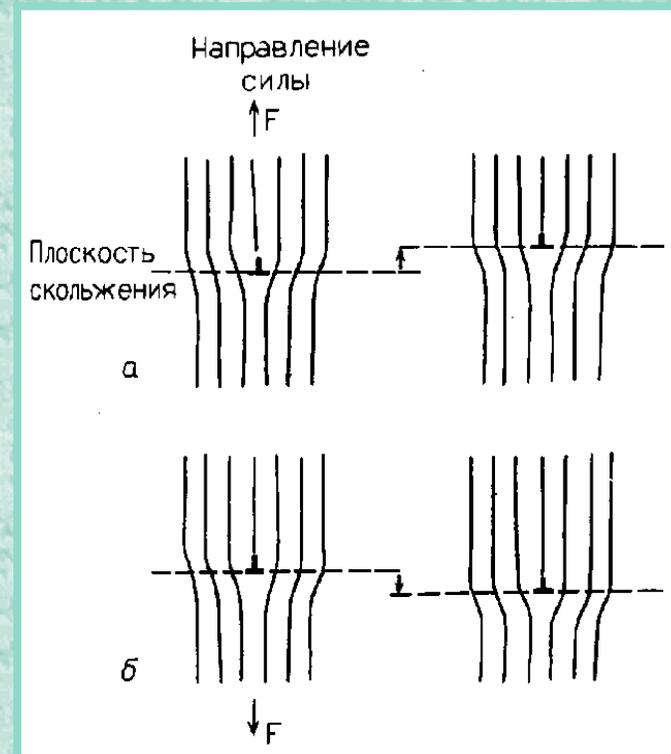


(Passchier, Trouw, 1998)

**Деформационный механизм на микроуровне:
дислокационное скольжение**

Оно создает макроскопический сдвиг.

Помимо скольжения, дислокации могут перемещаться в плоскости, перпендикулярной плоскости скольжения. В случае краевой дислокации подобное перемещение происходит за счет диффузионного переноса атомов к дополнительной полуплоскости или от нее. Это перемещение дислокаций под действием приложенных напряжений обеспечивает деформацию решетки.



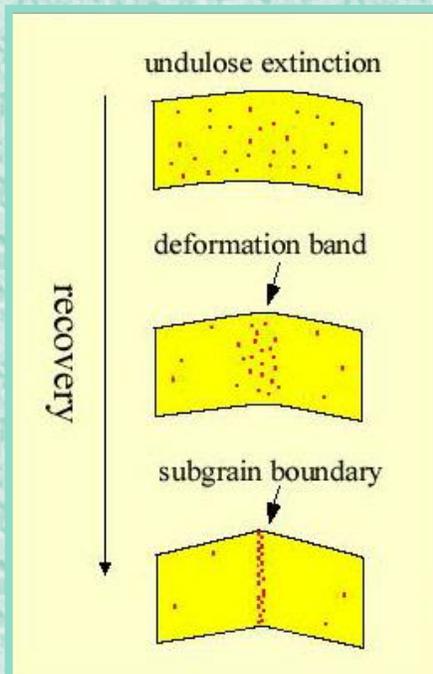
**Механизм пластической деформации
на микроуровне: перемещение дислокаций**

(Николя, 1992)

Двумерные дефекты

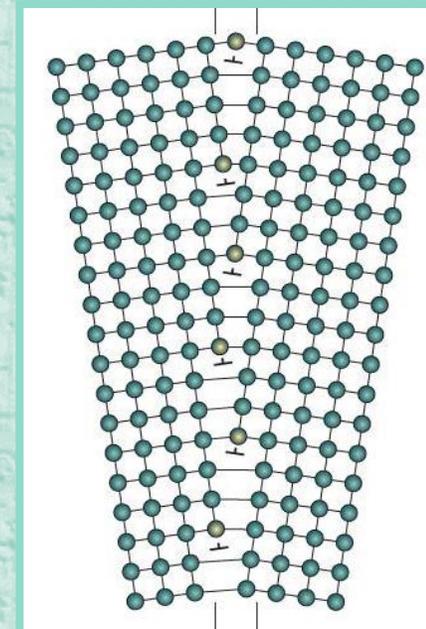
к основным двумерным дефектам относятся стенки дислокаций, двойники и грани кристаллов (границы зерен)

- Рассеянные по решетке дислокации, благодаря скольжению и переползанию выстраиваются некоторым регулярным образом. Такое распределение, соответствующее энергетическому минимуму, называется **стенкой дислокаций**.
- Как следствие кристалл расчленяется на **субзерна**, отделенные друг от друга стенками дислокаций или границами субзерен.

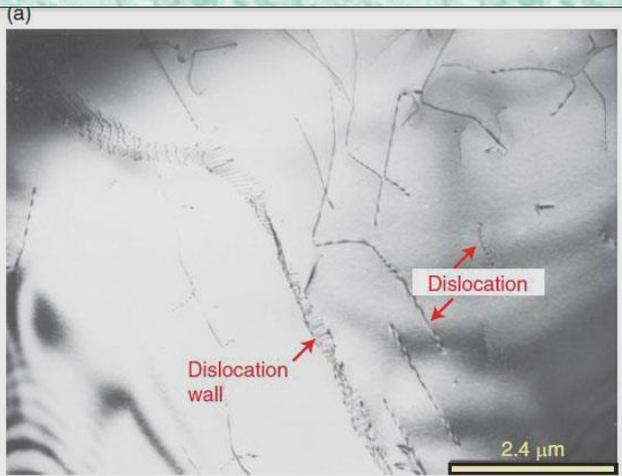


Этот процесс называется регенерацией

Схематическая иллюстрация процесса регенерации (recovery)
(*Passchier, Trouw, 1998*)



Простая дислокационная стенка сложена краевыми дислокациями
(*Fossen, 2011*)



Дислокации настолько малы, что могут быть выявлены только с помощью трансмиссионного микроскопа



Субзерна в кварце (следствие процесса регенерации)
(*Passchier, Trouw, 1998*)

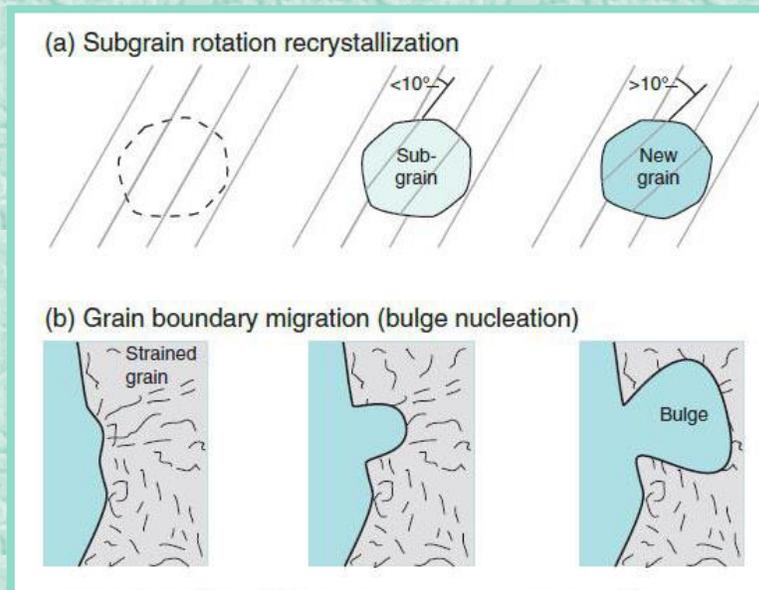
Фото под электронным микроскопом дислокаций в деформированном кварце из деформированных конгломератов Шведских Каледонид:
(а) область с низкой плотностью дислокаций, где некоторые из них имеют свободные окончания. Видны стенки дислокаций.
(б) более высокая плотность дислокаций. Широкая зона слева – граница субзерен. (*Fossen, 2011*)

Механизм пластической деформации на микроуровне: регенерация

Миграция границ зерен

Рекристаллизация

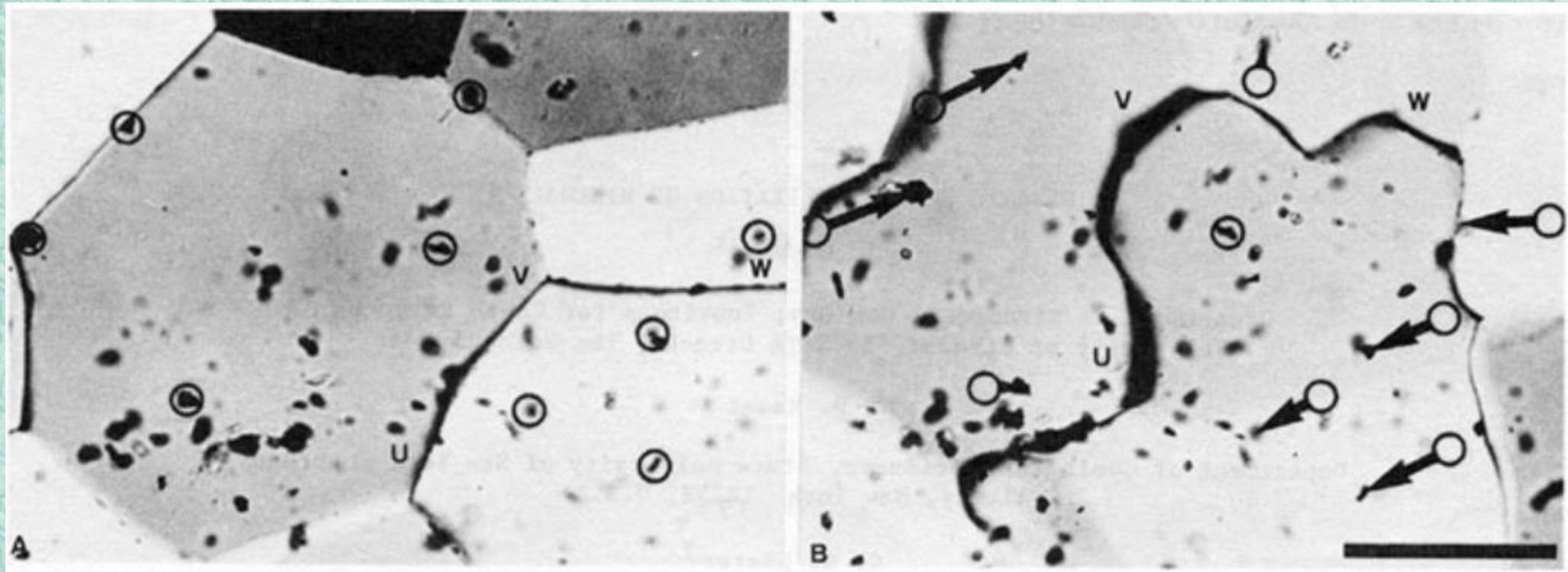
- Это процесс, посредством которого напряженные и переполненные дислокациями зерна превращаются в ненапряженные зерна с незначительным количеством дислокаций.
- Выделяют отжиговую и синтектоническую рекристаллизацию
- Рекристаллизация за счет энергии деформации осуществляется посредством двух механизмов: вращения субзерен (а) и нуклеации или миграции границ зерен (b)



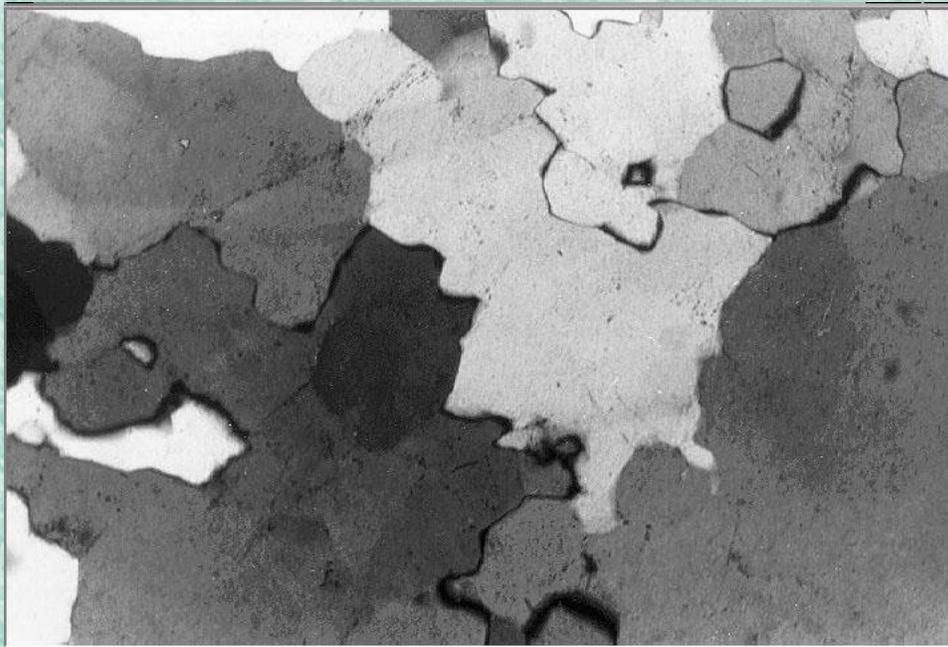
Поворот субзерна в ответ на миграцию дислокаций в стенках субзерен во время прогрессивной деформации может вызвать развитие высокоугловых границ зерен и, таким образом, привести к возникновению новых зерен.

Рекристаллизация путем миграции границ зерен: если два соседних зерна имеют различную плотность дислокаций, граница зерна может дать начало выпуклости внутри зерна с наибольшей плотностью дислокаций

(Fossen, 2011)



Миграция границ зерен при деформировании октахлорпропана. Движение выбранных маркерных частиц во времени между А и В относительно центральной частицы обозначено стрелками. Обратите внимание на перемещение границы UVW относительно маркеров. Шкала составляет 0,2 мм. (*no Means, 1983*).



Поликристаллический кварцевый агрегат с неправильными границами зерен, сформированный посредством миграции границ зерен (*Passchier, Trouw , 1998*)

Механизм деформации –
рекристаллизация

