

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 3

Лекция 3

Деформация простого сдвига (продолжение)

Напряженное состояние сплошной среды

Немного о терминологии

Для бесконечно малой деформации общий тензор деформации можно разделить на изотропную и девиаторную части.

Изотропная часть тензора деформации называется средней нормальной деформацией и представляет собой чистую **дилатацию** (изменение объема).

Девиаторная часть – это чисто (в смысле – только - НФ) **сдвиговая деформация**, деформация без изменения объема.

Любая невращательная деформация называется **чистой** деформацией.

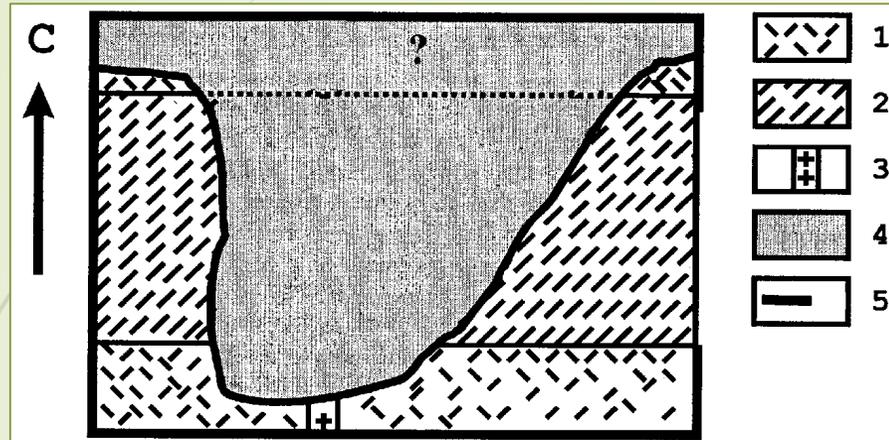
Состояние деформации, когда одна из главных деформаций равна нулю, называется плоской деформацией. Важное значение имеют два типа плоской деформации:

Первый тип плоской деформации - **чистый сдвиг** – это девиаторная деформация (т.е. такая, в которой $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$).

Другими словами, чистый сдвиг – это плоская деформация без изменения объема (на это указывает слово «сдвиг») и без вращения (на это указывает слово «чистый»).

Второй тип плоской деформации – **простой сдвиг**. Отличается от чистого сдвига только присутствием жесткого вращения (в плоскости деформации).

Задача 11



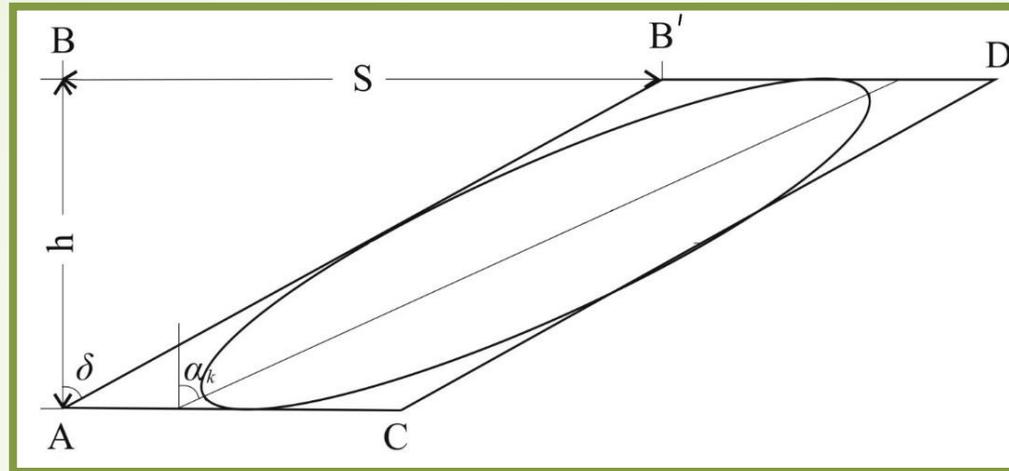
Дайка долеритов (3) скрыта под более молодыми отложениями (4) к северу от зоны широтного правостороннего сдвига (2).

В этой зоне первичные вулканиты (1), содержащие сферические пузырьки, приобрели упорядоченную текстуру (включения превратились в эллипсы, длинная ось которых ориентирована под углом, близким к 45°)

Найти продолжение этой дайки к северу от зоны сдвига.

(по Дж. Рэмзи)

Еще формулы



Еще три формулы, вывод которых достаточно сложен и поэтому здесь не приводится:

$$\operatorname{tg} 2\alpha_k = -\frac{2}{\operatorname{tg} \delta} \quad (4), \text{ откуда } 2\alpha_k = 180 - \operatorname{arctg} \frac{2}{\operatorname{tg} \delta}$$

$$k = \operatorname{tg} \alpha_k \quad (5) \quad \gamma = \operatorname{tg} \delta = k - \frac{1}{k} \quad (6)$$

Обратите внимание: все параметры связаны между собой!

Задача 12



Дано: $\alpha_0 = -30^\circ$, $l_0 = 4$ см., $\delta = 60^\circ$. Осуществляется деформация простого сдвига.

Найти: α , l (решение в графическом виде).

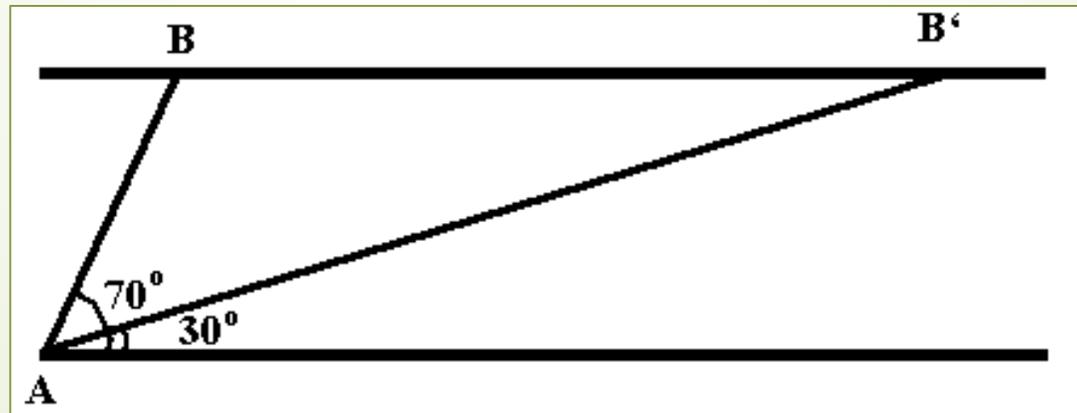
Примечание: угол α является отрицательным, если он отсчитывается от оси координат против часовой стрелки.

Задача 13



Дано: осуществляется деформация простого сдвига, отрезок АВ располагается под углом 70° к его направлению. После деформации угол между отрезком и направлением сдвига стал равен 30° .

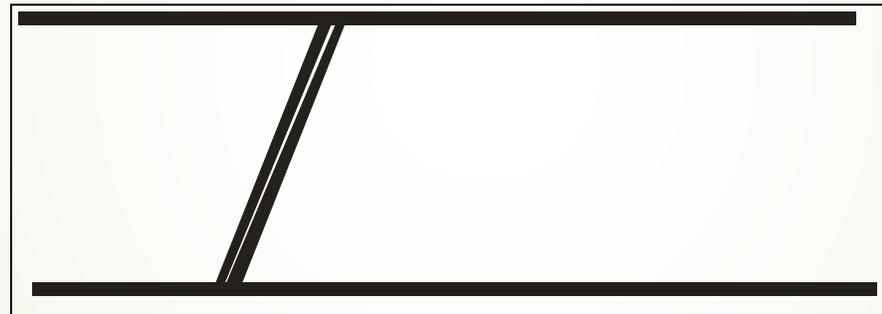
Найти: величину сдвига γ . Решить задачу графически и с помощью формул.



Задача 14

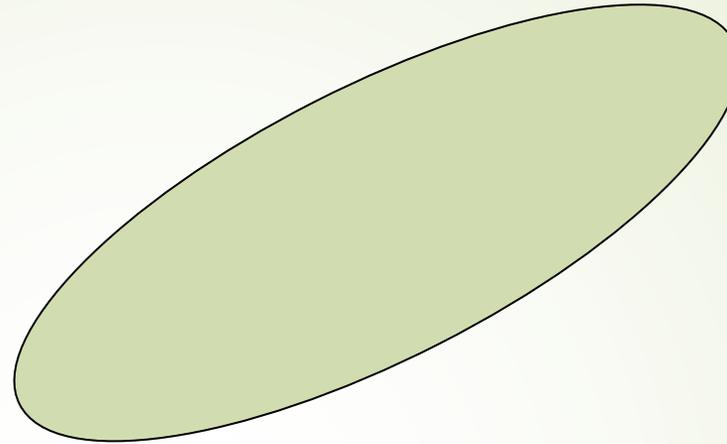
Дано: отрезок в зоне простого левого сдвига ориентирован под углом 75° к его **направлению**. Длина отрезка 5 см

Найти: длину и ориентировку отрезка после деформации сдвига ($\gamma=1,7$).



Решить эту задачу графически и с помощью формул

Задача 15

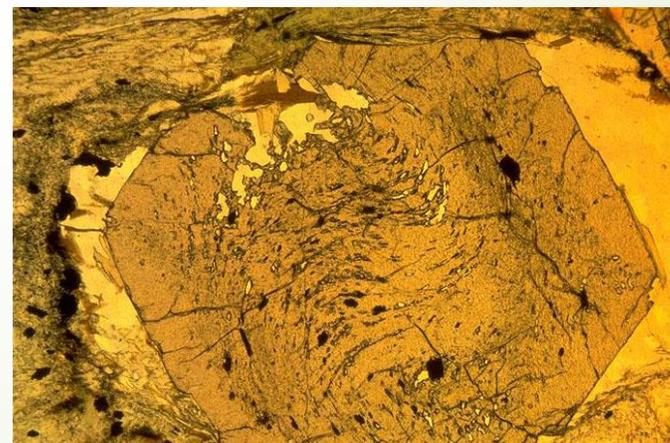
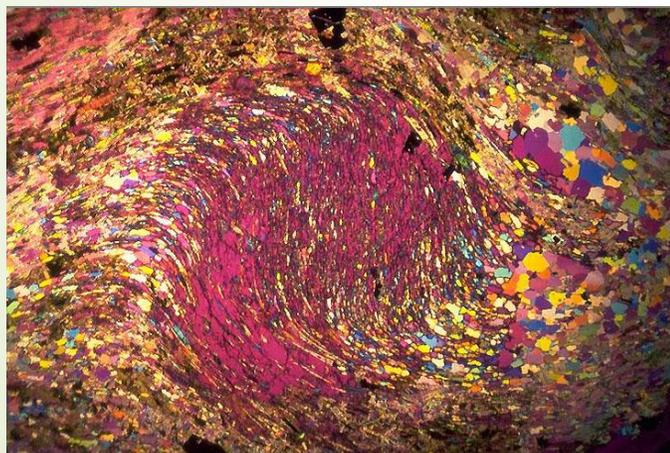


Дано: эллипс, возникший из круга в результате деформации **простого** сдвига.

Найти: направление сдвига (*оно не горизонтально! Это надо посчитать*), величину сдвига γ , коэффициент удлинения эллипса деформации k .

Вращение жестких тел в зоне простого сдвига

- ▶ Жесткое тело (т.е. тело с очень большой вязкостью) практически не деформируется, но в зоне сдвига оно будет вращаться.
- ▶ Примеры такого вращения нередко можно встретить в природе



Определите направление сдвига (правый или левый)

14-10

Синтектоническое вращение гранатового порфиробласта
в метапелитах (долина Гамбул, зона Занскар, Гималаи)

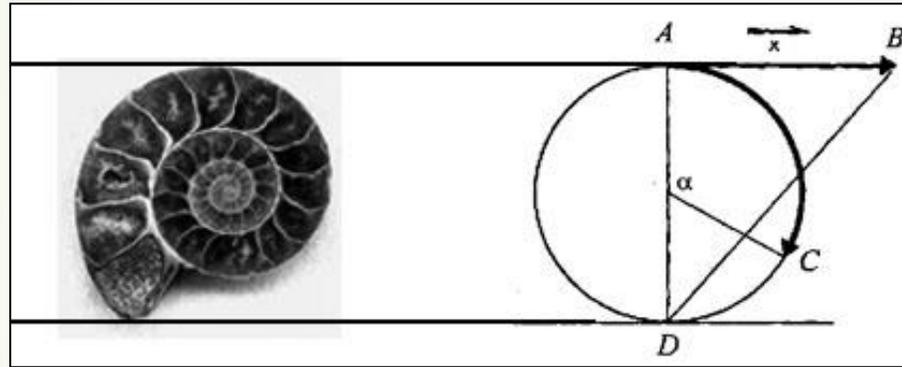


Фото: Pierre Dèzes

<http://comp1.geol.unibas.ch/~zansker/CHAPITRE4/page46.html#>

Вычисление величины сдвига, если мы знаем угол поворота включения

- ▶ На рисунке показана схема, где жесткое включение представляет собой, например, псевдоморфозу марказита по аммониту. Справа оно изображено схематично в виде жесткого круга.



- Если этот круг находится в зоне простого сдвига, то при отсутствии проскальзывания он поворачивается на угол α . Частица, принадлежащая поверхности самого включения и находящаяся в точке A , перемещается в точку C . Частица, находящаяся также в точке A , но вне включения, в процессе деформации сдвига перемещается в точку B , при этом дуга $AC = AB = x$. По определению, величина сдвига $\gamma = x/AD = x/d$, где $AD = d$ (d — диаметр круга).
Так как $x/\pi d = \alpha/2\pi$, то $x/d = \gamma = \alpha/2$ (πd — длина окружности; α выражена здесь в радианах).
- *Примечание: в окружности (360°) — 2π радиан, значит в 1° — $0,017453$ радиана*

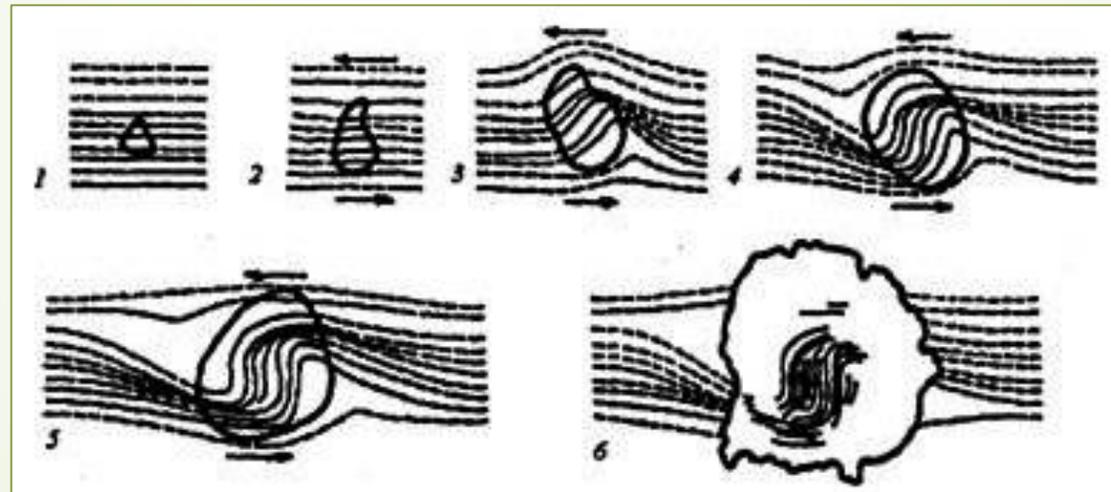
Задача 16

- ▶ Дано: в зоне правого простого сдвига находятся жесткое включение, представляющее собой псевдоморфозу марказита по аммониту; его вязкость на несколько порядков выше, чем вязкость матрикса.
- ▶ Изобразите результат деформации при $\gamma = 1,57$



Определение величины сдвига по структурам снежного кома

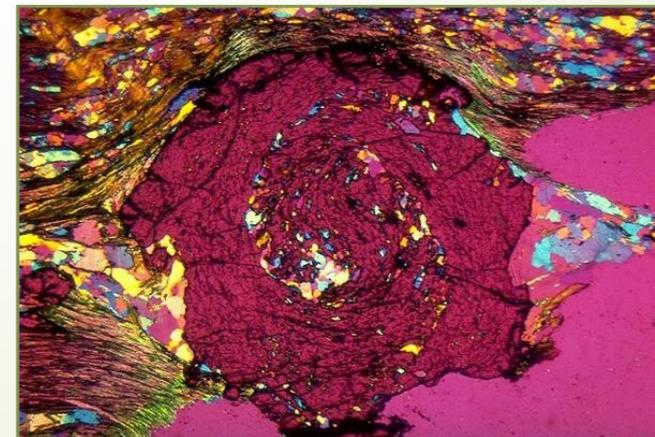
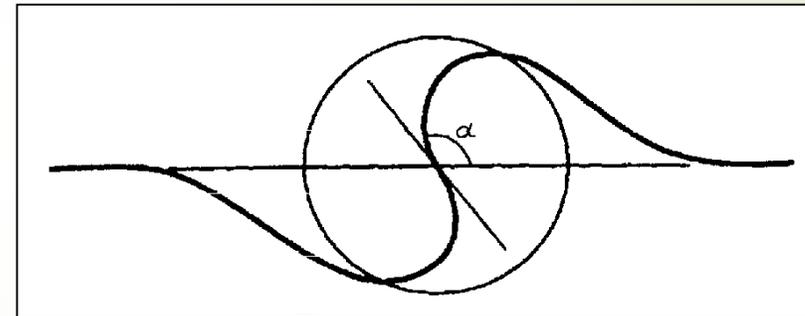
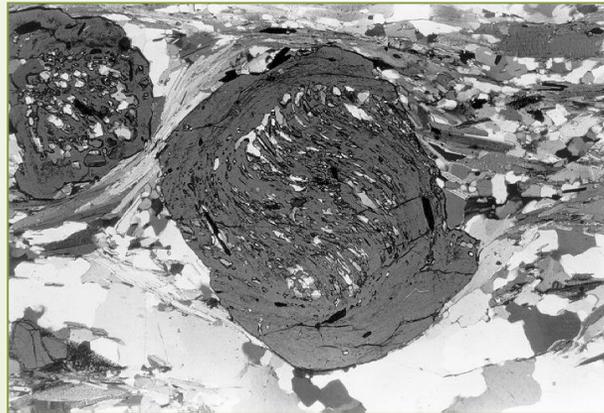
Вращение жестких включений одновременно с их ростом приводит к формированию **структуры снежного кома**, особенно часто наблюдаемой в гранатах. По этим структурам нетрудно определить направление сдвига, а также судить о его величине.



Как формируется структура снежного кома: вместе с вращением зерна происходит поворот захватываемых при росте зерна удлиненных элементов матрикса. На периферии зерна угол поворота будет минимальным, в центре – максимальным. Образуется структура двойной спирали

Угол поворота порфиробласта

- ▶ На практике в случае спиральных включений измеряют угол α между ориентировкой включений в центре порфиробласта и ориентировкой сланцеватости матрикса вне зоны влияния порфиробласта.



А этот случай сложнее



Задача 17

- ▶ Дано: зерно граната со структурой снежного кома.
- ▶ Определить направление сдвига, угол, на который повернулось зерно, и величину сдвига.





Напряженное состояние сплошной среды

О напряжениях

Напряжение – это нечто производное от силы.

Напомню из физики главные характеристики силы.

Сила регулируется тремя законами Ньютона:

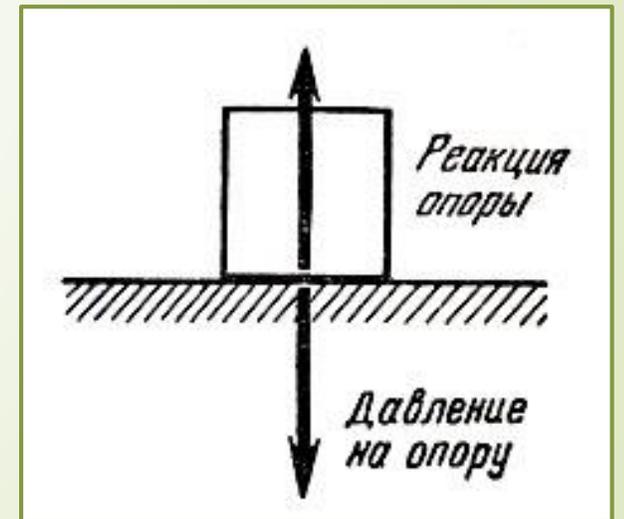
1. Без воздействия силы – покой или инерция
(равномерное прямолинейное движение).

2. При воздействии силы – ускорение: **$F = ma$**

3. Взаимодействие двух тел. Реакция опоры.

Равнодействующая сила равна 0.

Поступательного движения нет. Но это не значит, что в теле ничего не происходит.

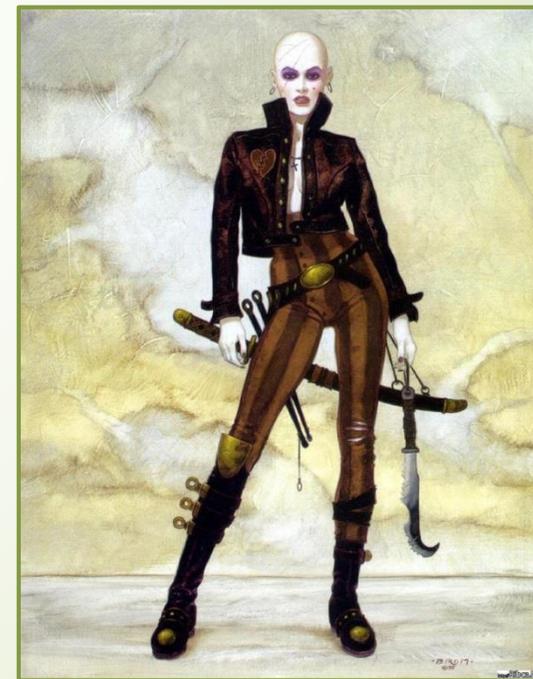


«Почему мы не проваливаемся СКВОЗЬ ПОЛ?» (Дж. Гордон)

- Итак, основной закон механики Ньютона гласит: действие равно противодействию по величине и противоположно ему по направлению. Это означает, что каждая сила должна быть сбалансирована точно такой же по величине силой противоположного направления. При этом природа сил не имеет никакого значения.

Предположим, я стою на полу, мой вес 56 кг. Следовательно, мои подошвы давят на пол с силой 56 кг, которая направлена вниз; это дело моих ступней. В то же самое время пол должен давить на мои подошвы с той же силой 56 кг, направленной вверх; эта сила исходит от пола.

В законе Ньютона совсем не обязательно сила связана лишь с каким-либо неподвижным грузом.
Пример автомобиля





Как груз давит на пол?

Природа внешних сил может быть самой разной.

Вес груза возникает из-за гравитационного воздействия Земли на массу груза (земное притяжение); в случае торможения движущейся нагрузки (будь то твердое тело, жидкость или газ) возникающие силы таковы, что вызывают необходимое замедление движущейся массы (второй закон Ньютона).

Кажется понятно, как груз давит на пол,

но как пол давит на груз?

Биологические аналогии. Биологические процессы и усталость.

Конструкционные материалы пассивны, так что они не "устают" в обычном смысле этого слова. Прежде чем начать сопротивляться внешним нагрузкам, в них должны возникнуть какие-то смещения, то есть, чтобы оказать какое-либо сопротивление, они должны в большей или меньшей степени поддаться нагрузке. Под смещением мы понимаем не перемещение тела как целого, без изменения его формы, а именно геометрические искажения самого тела, то есть тело в целом или отдельные его части становятся короче или длиннее вследствие растяжения или сжатия внутри самого тела (т.е. **тело деформируется**).

Смещения, будь они малыми или большими, создают силы сопротивления. Эти силы определяют жесткость твердого тела, его способность сопротивляться внешним нагрузкам. Другими словами, в твердом теле возникают именно такие смещения, которые как раз достаточны, чтобы уравновесить приложенные внешние нагрузки. Это происходит совершенно автоматически.

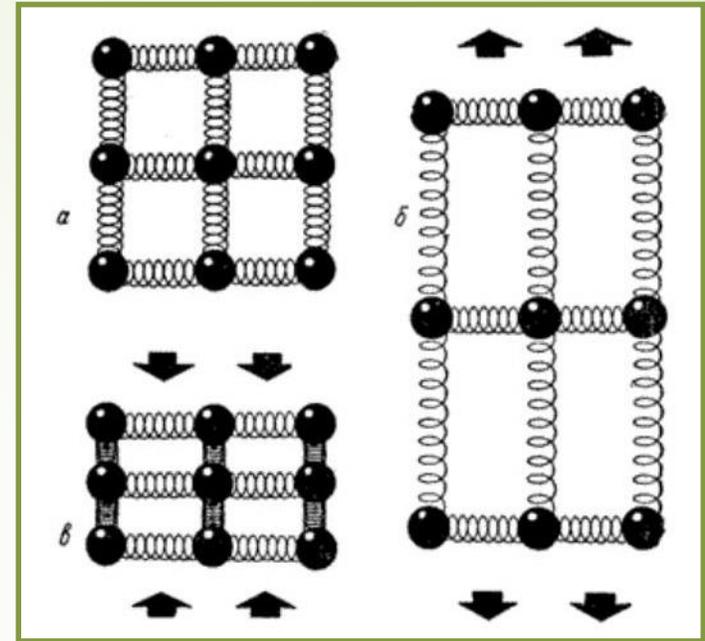
Как же возникают силы сопротивления?

В любом теле атомы химически связаны между собой. Эти связи условно можно представить в виде пружинок.

Когда твердое тело полностью свободно от механических нагрузок (что бывает, строго говоря, очень редко), химические связи, или пружины в нашей модели, находятся в нейтральном положении (а).

Любая попытка сблизить атомы (это мы называем сжатием) или оттянуть их друг от друга (что обычно называется растяжением) сопровождается небольшим укорочением (в) или удлинением (б) межатомных пружинок во всем объеме материала.

Тот факт, что расстояние между атомами действительно изменяется под нагрузкой, был многократно проверен путем постановки самых различных экспериментов. В этих экспериментах наблюдались изменения межатомных расстояний примерно до 1%.



Что такое напряжение

- ▶ Когда мы говорили о силах, то имели в виду полные величины сил, действующих на тело. Такой силой мог быть любой груз. Когда мы говорили о смещении под нагрузкой, то имели в виду полные смещения независимо от размеров объекта, будь он большим или малым. Однако все это не позволяет нам сравнивать большой объект под большой нагрузкой с малым объектом под меньшей нагрузкой.

Нужные нам величины называются **напряжением и деформацией**.

- ▶ **«Механическое напряжение - это мера внутренних сил, возникающих при деформации материала»** (Физический энциклопедический словарь).

Что же это за мера?

Напряжение - это нагрузка, отнесенная к единице площади, то есть

$$\sigma = F/S$$

- ▶ Величина напряжения измеряется в паскалях. Паскаль – давление, вызываемое силой в 1 Н (ньютон), равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м²
- ▶ Напряжение и давление – это одно и то же
- ▶ Растягивающее напряжение считается положительным, сжимающее - отрицательным



Каким образом человек, стоящий на полу, может быстро удвоить давление, производимое на пол?

Один ньютон – это такая сила, которая меняет скорость тела массой в 1 кг на 1 м/с за каждую секунду.

