

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 white stars.

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

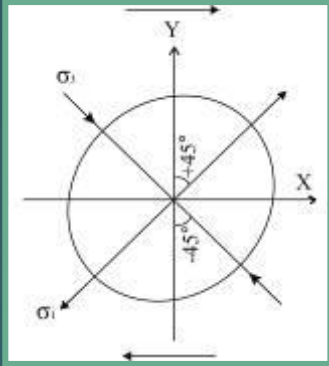
Лекция 7

Лекция 7

ОРИЕНТИРОВКА ТРЕЩИН В ПРОСТЫХ И СЛОЖНЫХ СДВИГОВЫХ
ОБСТАНОВКАХ

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Ориентировка трещин при деформации простого сдвига



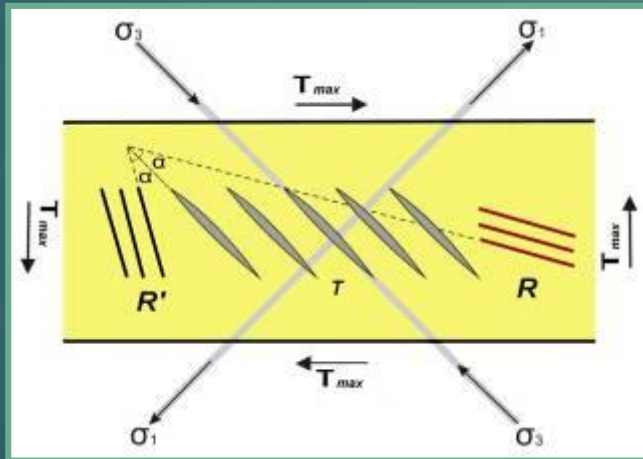
✓ В зонах сдвига формируются трещины отрыва и трещины скалывания.

✓ Все трещины располагаются **эшелонировано**.

✓ Трещины *отрыва* ориентированы под углом 45° к направлению сдвига.

✓ Трещины *скалывания* в зонах сдвига называются **сколами Риделя**. Направление σ_3 является биссектрисой острого угла между сопряженными поверхностями скалывания.

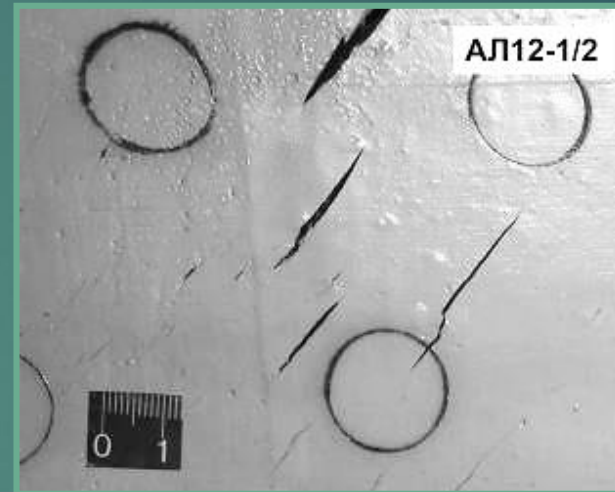
✓ Трещины, образующие небольшой угол с направлением сдвига, обозначаются R, а трещины, ориентированные под большим углом — R'



Образование систем трещин отрыва в условиях простого сдвига (эксперимент)



Э. Клоос (1955)



Лаборатория тектонофизики и геотектоники МГУ

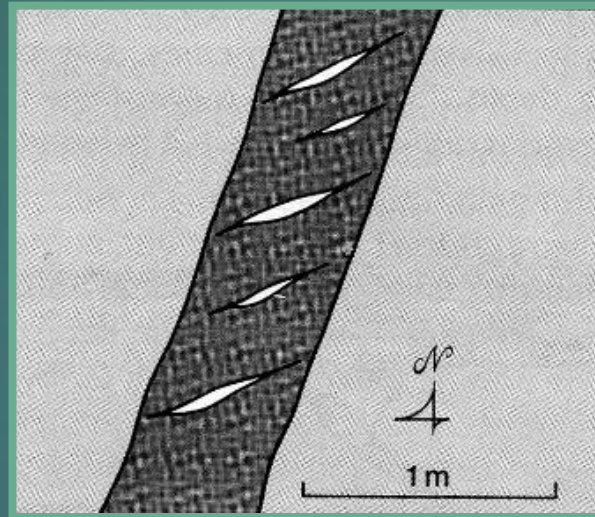
Ориентировка трещин отрыва в экспериментах

Они ориентированы в соответствии с расположением оси растягивающих напряжений, то есть под углом 45° к направлению сдвига

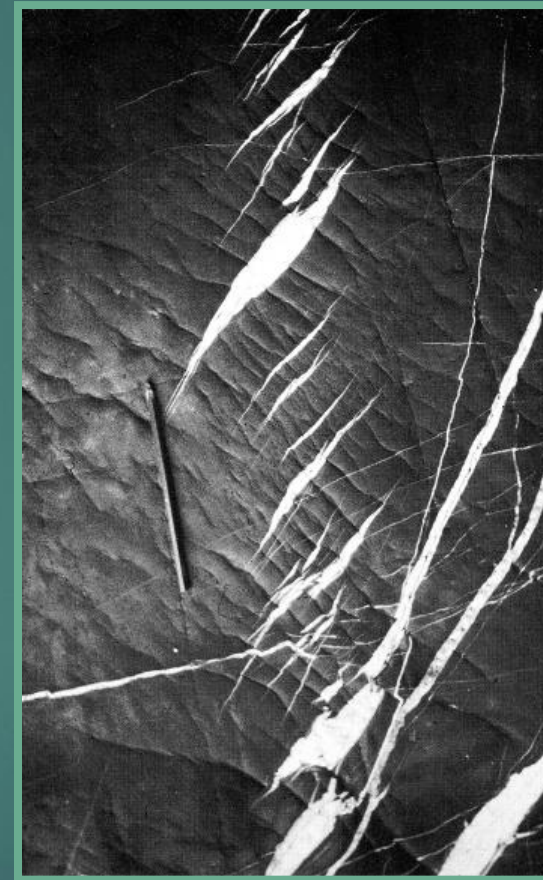
Трещины отрыва в зонах сдвига (природа)

Трещины заполнены минеральным веществом.

Расположение эшелонированное



Как по таким трещинам определить направление сдвига?



(Ramsay, Huber, 1987)

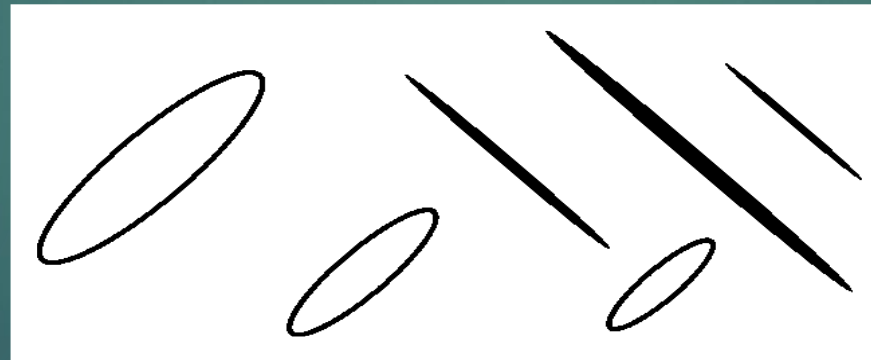
Задача 37



Дано: В зоне **простого сдвига** обнаружены

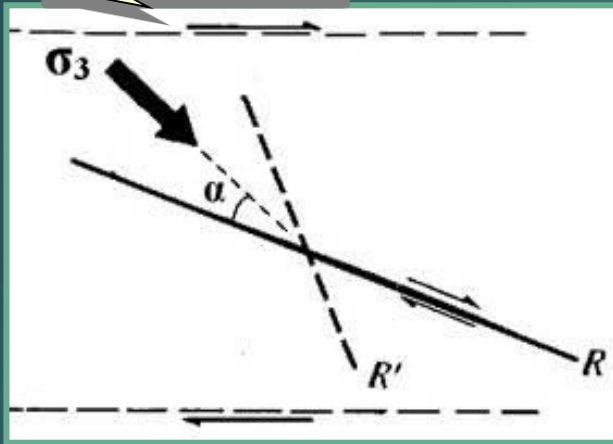
- а) эллиптические включения, имевшие до деформации сферическую форму (вязкость вмещающих пород и включений примерно одинакова);
- б) жилы с минеральным заполнением.

Определить, синхронно ли образование этих жил деформации сдвига (другими словами, возникли ли они в одном и том же поле напряжений).

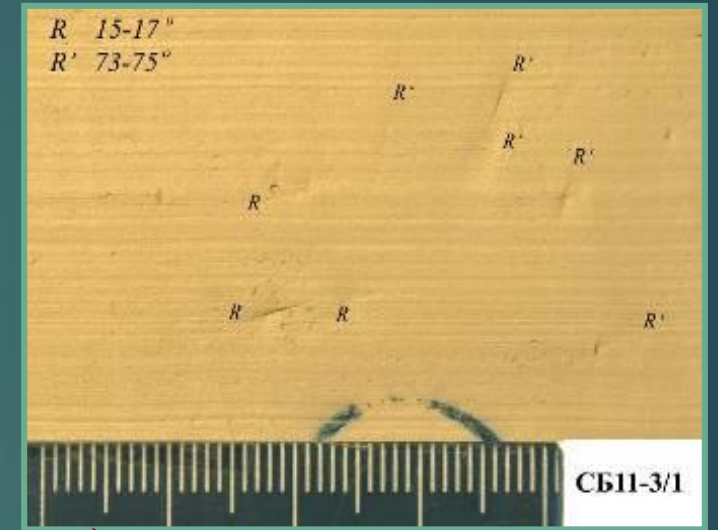


Ориентировка сколов Риделя по отношению к направлению сдвига

α – угол скалывания



Примем во внимание, что ось максимального сжатия ориентирована под углом 45° к направлению сдвига, а средний угол скалывания для горных пород равен 30° . Следовательно, **R-сколы должны быть ориентированы под углом $45-30=15^\circ$ и R'-сколы должны быть ориентированы под углом $45+30=75^\circ$ к направлению сдвига**

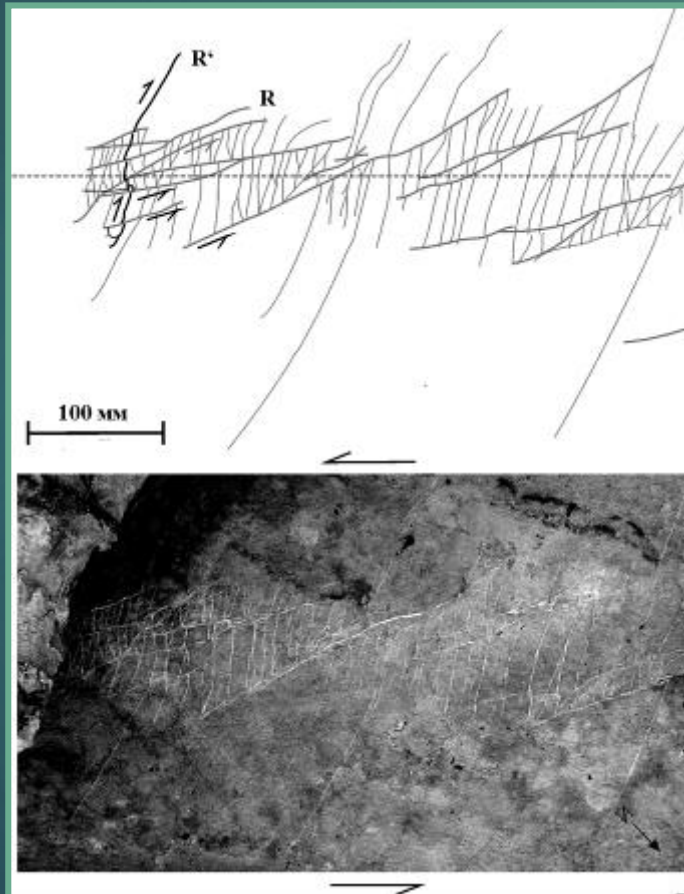


← Пример экспериментов по моделированию сдвигов на влажной глине в лаборатории тектонофизики и геотектоники МГУ

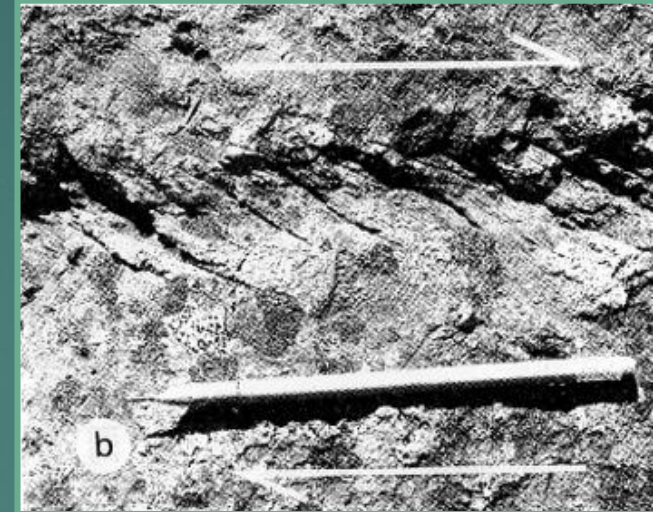
В экспериментах с эквивалентными материалами, даже в начале деформации, сколы R' часто ориентированы под углами, большими, чем 75° . Это связано тем, что сколы вращаются, даже будучи еще неявно выраженными. При этом, чем больше угол наклона отрезков к направлению сдвига, тем быстрее они поворачиваются.

Сколы Риделя в природе

Эти сколы всегда расположены эшелонировано (кулисообразно)



(Katz, 2004)

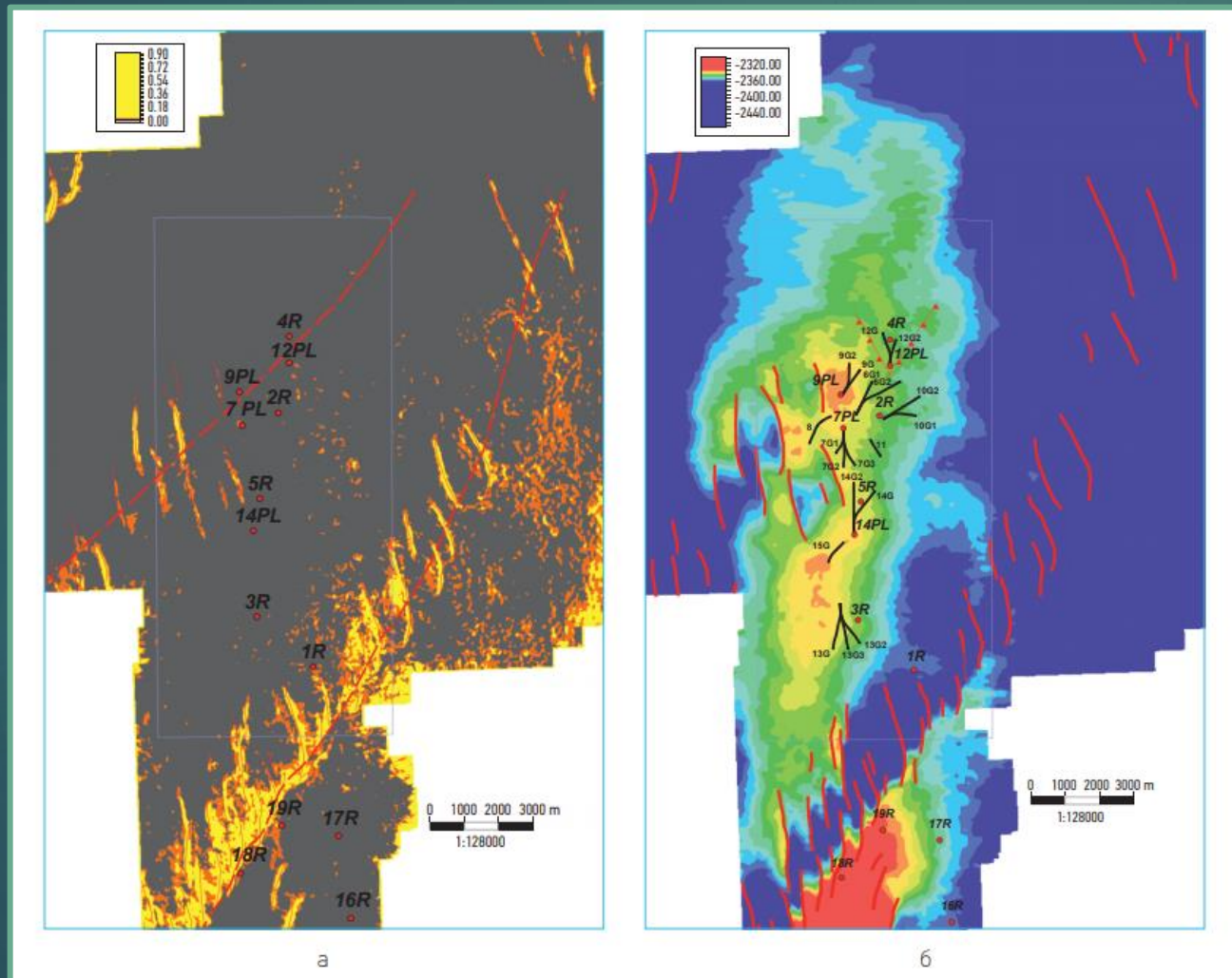


(McClay, 1989)



<http://www.krasfun.ru/2010/09/sdvig-zemnoj-kory/>

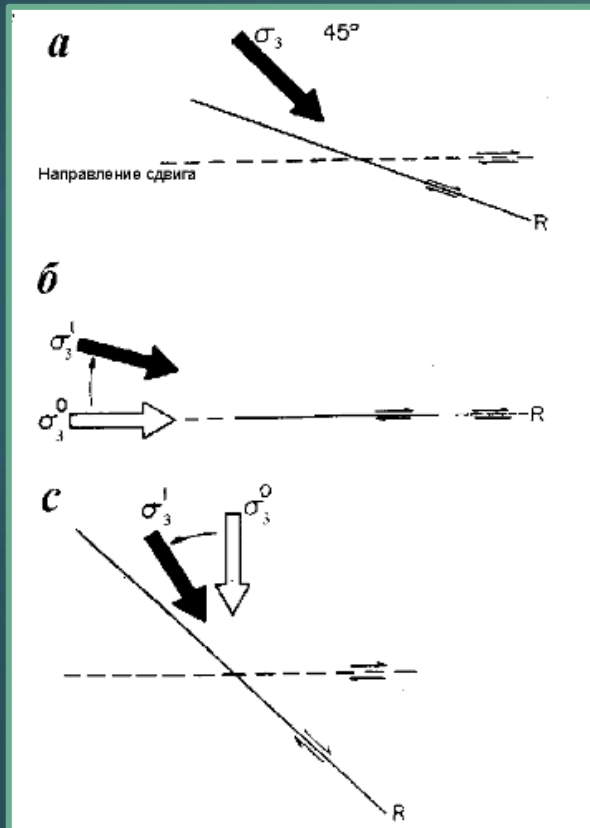
Еще один пример. Север Западной Сибири



(Андропов и др., 2021)

Ориентировка трещин в обстановках транстенсии и транспрессии

Ориентировка главных осей напряжений при транстенсии и транспрессии



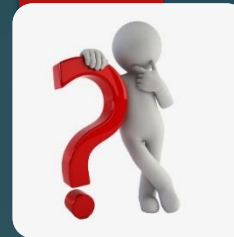
Транстенсия - сочетание простого сдвига с дополнительным растяжением поперек направления сдвига.

Транспрессия – сочетание простого сдвига с дополнительным сжатием поперек направления сдвига.

Изменение ориентировки оси максимального сжатия и, соответственно, ориентировки трещин Риделя в случае транстенсии (б) и транспрессии (с). Вверху (а) показана ситуация без дополнительного сжатия или растяжения

В каком интервале будет располагаться ось максимального сжатия при транстенсии? А при транспрессии?

Задача 38



Дано: зона простого сдвига и направление сдвига.

Найти: (а) ориентировку трещин отрыва. Изобразить на чертеже серию таких трещин, расположенных вдоль зоны сдвига.

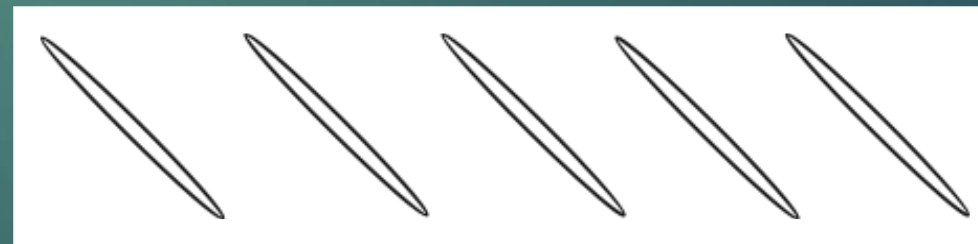
(б) ориентировку сколов Риделя R и R'. Показать их на чертеже



Задача 39

На рисунке показана серия лестничных жил, выполненных кальцитом.

Определить направление сдвига и объяснить решение.

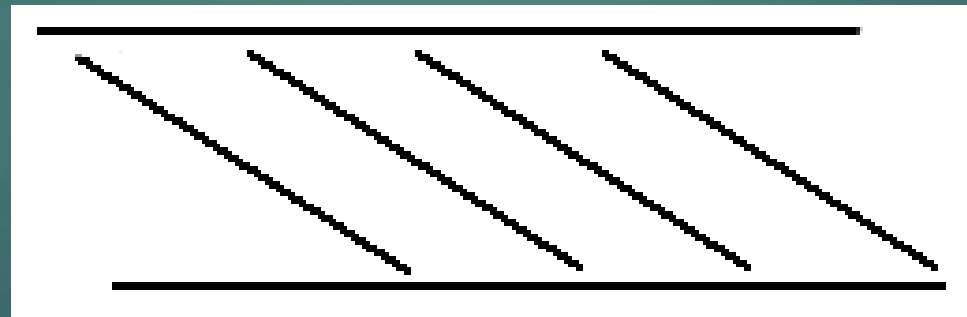


Задача 40



Дано: зона простого сдвига и ориентировка сколов Риделя (R) в ней. Угол скальвания 30° – средний для горных пород.

Найти ориентировку осей напряжений и определить характер напряженного состояния (это либо транстенсия – сочетание простого сдвига с растяжением перпендикулярно направлению сдвига, либо обычный простой сдвиг, либо транспрессия – сочетание простого сдвига со сжатием перпендикулярно направлению сдвига).



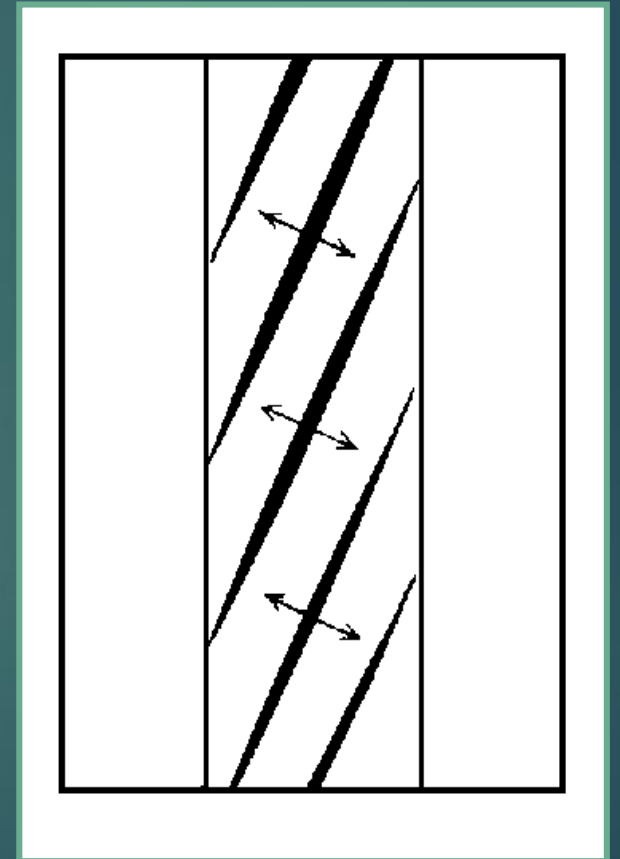
Задача 41



Дано: Система эшелонировано расположенных трещин, заполненных кварцем.

Найти: направление сдвига, ориентировку главных осей напряжений.

В условиях какого напряженного состояния сформировалась эта система: трансенсии (сочетание простого сдвига с растяжением перпендикулярно направлению сдвига), обычного простого сдвига или транспрессии (сочетание простого сдвига со сжатием перпендикулярно направлению сдвига)?





Деформационные свойства пород

Как ведут себя горные породы в земной коре?

УПРУГОСТЬ: НАПРИМЕР, СПОСОБНОСТЬ ПОРОД КОРЫ И МАНТИИ ПЕРЕДАВАТЬ СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ (СИЛЫ ДЕЙСТВУЮТ В ТЕЧЕНИЕ ОЧЕНЬ КОРОТКОГО ПРОМЕЖУТКА ВРЕМЕНИ)

ХРУПКОСТЬ: НАПРИМЕР, В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ КОРЫ ТРЕЩИНЫ И РАЗРЫВЫ, ПОДОБНЫЕ СТРУКТУРАМ, ПОЛУЧАЕМЫМ В ЛАБОРАТОРИИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ХРУПКОГО ДРОБЛЕНИЯ

ВЯЗКОЕ ТЕЧЕНИЕ В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ: НАПРИМЕР, ИЗОСТАЗИЯ, СКЛАДЧАТОСТЬ, ДЕФОРМАЦИЯ ТЕЛ, ПЕРВОНАЧАЛЬНАЯ ФОРМА КОТОРЫХ ИЗВЕСТНА

«Все течет!»
Гераклит Эфесский

БАЗАЛЬТОВЫЕ БЛОКИ ТЕКУТ?



Баальбекская терраса

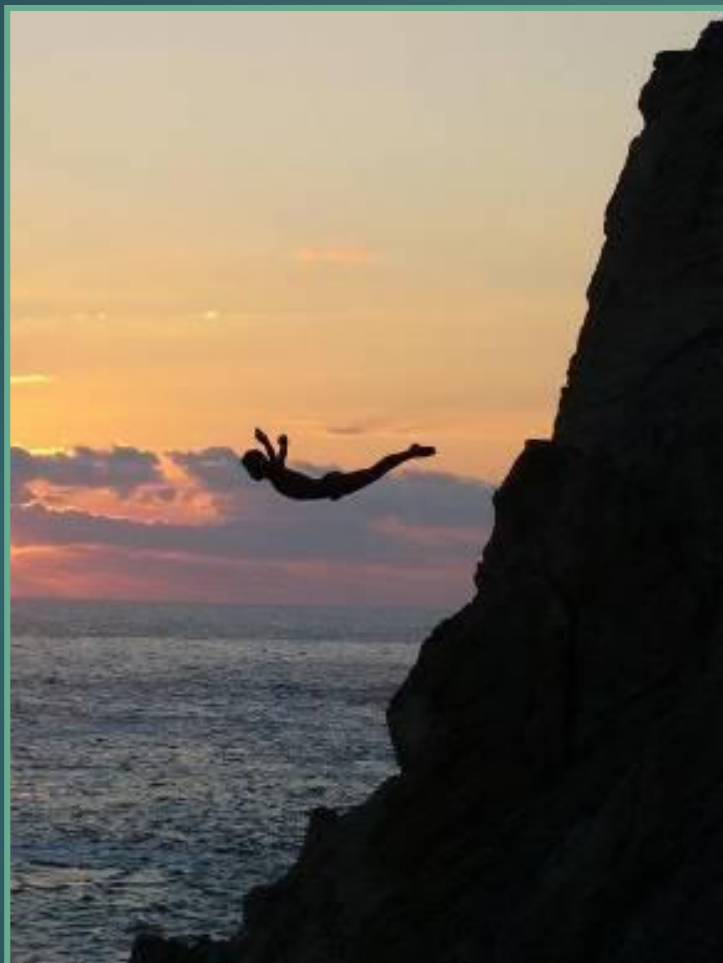
Баальбекские террасы

Баальбекские террасы уже были построены в **5 тысячелетии до н.э**



- ▶ Террасы выложены из громадных каменных блоков весом от **300** до **1000 тонн** (к примеру, средний вес каменных блоков в пирамиде **Хеопса 2,5** тонны), причем уложены они без какого-либо связывающего состава и настолько точно и аккуратно, что просунуть даже иголку между ними весьма проблематично.
- ▶ Крупнейшей террасой в Баальбеке является терраса на которой римляне построили храм своему верховному богу - Юпитеру. Храм Юпитера не дожил до наших дней
- ▶ Эта терраса представляет собой каменную полосу шириной около семи метров со стороны северного и южного фасада храма Юпитера в Баальбеке. Терраса состоит из плотно подогнанных гигантских каменных блоков, верхний ряд которых находится на высоте 8 метров.

ВОДА – ТВЕРДАЯ?



НА САМОМ ДЕЛЕ ВСЯКИЙ РЕАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ ОБЛАДАЕТ ВСЕМ НАБОРОМ СВОЙСТВ, ТОЛЬКО ПРОЯВЛЯЮТСЯ ОНИ ПО-РАЗНОМУ

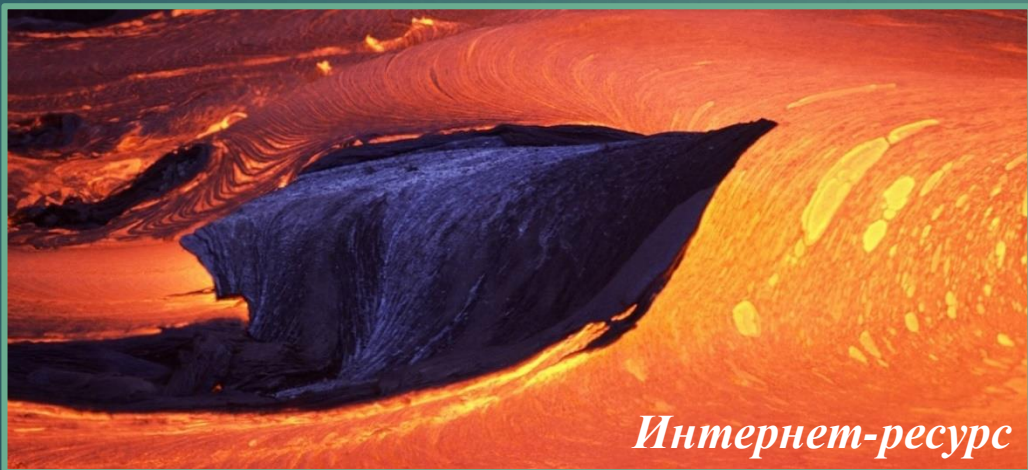


Как вы думаете,
отчего это зависит?

*(Эксперимент
Joschka Röth, 2020)*



Интернет-ресурс



Интернет-ресурс



(Hudleston, Treagus, 2010)

Немного о реологии

- ▶ Реология изучает механические свойства материалов. Термин произошел от греческого слова rheo – течь.
- ▶ Как могут течь твердые вещества? Не только вода течет, но и нефть, сироп, каучук, асфальт, лед, стекло и горные породы.
- ▶ Течение сиропа можно наблюдать за минуты, каучука – за первые часы, льда – за месяцы и годы.
- ▶ Может ли течь стекло? Как и при каких условиях текут горные породы?
- ▶ Когда горные породы текут, они постепенно суммируют деформацию, подобно медленно текущему глетчеру или патоке, без образования разрывов или других нарушений сплошности.

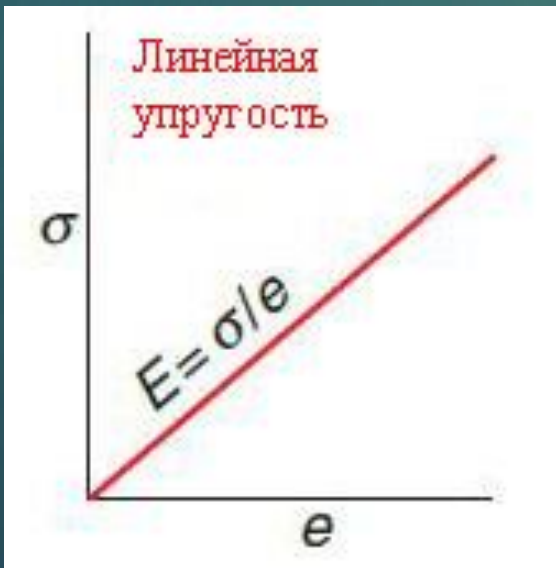
Реология (Rheology) , или механика сплошной среды, имеет дело с течением горных пород, в то время как механика горных пород (Rock Mechanics) в первую очередь имеет дело с тем, каким образом горные породы отвечают на напряжения – хрупкими трещинами и разрывами

Рассмотрим простые и идеализированные представления механики сплошной среды

Имеются три фундаментальные пути реакции материалов на напряжения. Это:

- Упругая деформация
- Вязкая деформация
- Пластическая деформация

В горных породах может также осуществляться хрупкая деформация и катакластическое течение, но это не входит в поле рассмотрения механики сплошной среды



Упругие материалы

- Прямо пропорциональная зависимость между деформациями и напряжениями
- Мгновенная реакция на напряжения
- Обратимая деформация

Существуют материалы с нелинейной упругостью, но мы их рассматривать не будем

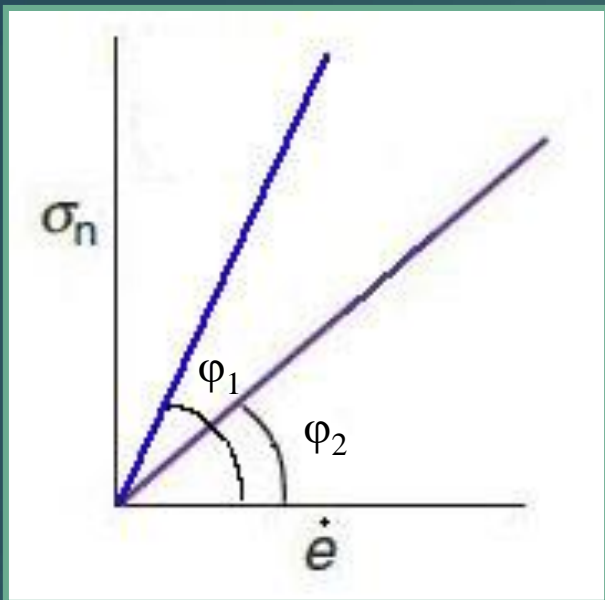
Вязкие материалы (жидкости)

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad \sigma = 2\eta \dot{\epsilon}$$

Материалы, которые деформируются согласно этому уравнению, называются **НЬЮТОНОВСКИМИ ВЯЗКИМИ ЖИДКОСТЯМИ**

$$\operatorname{tg}\varphi = 2\eta$$

Чем больше вязкость, тем больше угол наклона прямой на графике



Обратите внимание, это график зависимости напряжение – скорость деформации

- Линейные соотношения напряжение – скорость деформации
- Напряжение зависит от скорости деформации
- Замедленный ответ на напряжение
- Необратимая деформация

Вязкая деформация предполагает зависимость напряжений от скорости деформации: повышение напряжений приводит к увеличению скорости течения, или более быстрому накоплению деформации

Вязкая деформация – деформация, зависящая от времени

Вязкая деформация = вязкое течение

Материалы, которые ведут себя как вязкие жидкости: патока, теплый асфальт. На примере асфальта видно, что **температура** – важнейший фактор, который рассматривается при изучении вязкой деформации.

Среди горных пород вязким поведением обладают магма, соль, флюидонасыщенный ил при сверхвысоком давлении.

Еще один важный фактор текучего поведения горных пород – **время**.

Имеются доказательства того, что при длительной нагрузке горные породы ведут себя подобно жидкостям с очень высокой вязкостью.

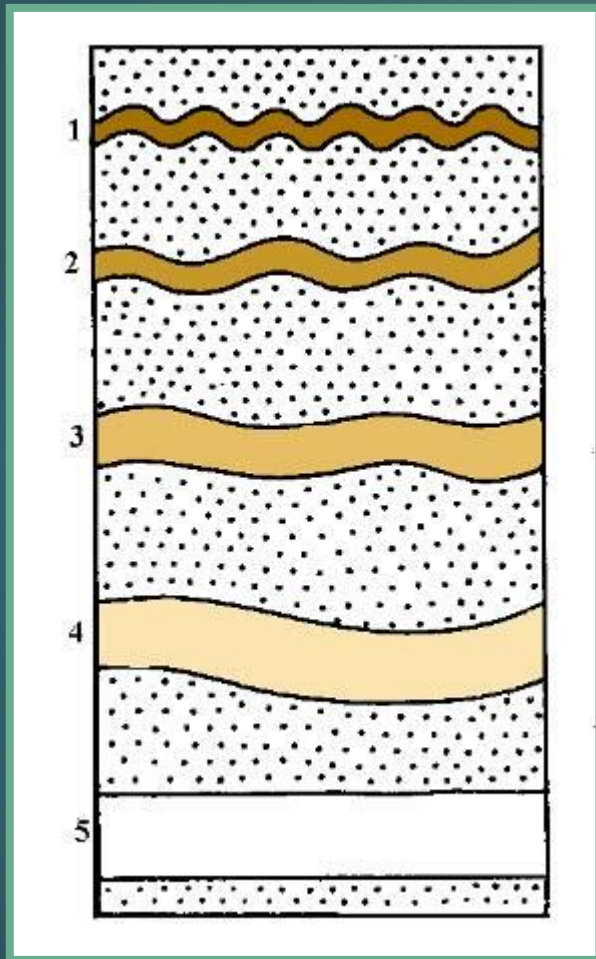


Крым. Бодрак. Время деформации 1 час



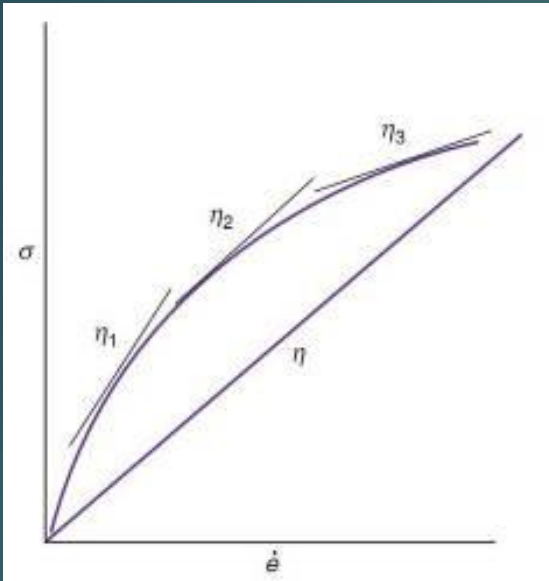
Сочи. Наджиго. Время деформации сотни тысяч лет

Рассмотрим слоистые пачки горных пород.
При их деформации большую роль играет их относительная вязкость. Более вязкие
слои часто называют компетентными, а менее вязкие - некомпетентными



Эксперимент Рамберга

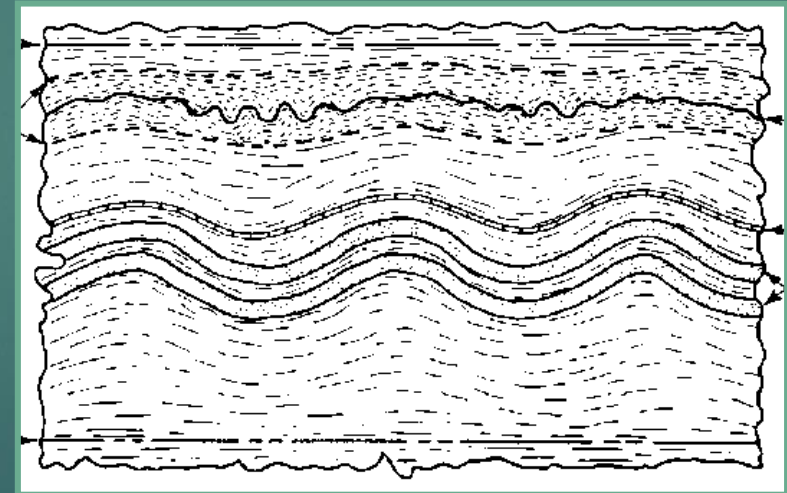
Горные породы обычно демонстрируют нелинейно-вязкое поведение



Линейная и нелинейная вязкость на диаграмме напряжение-скорость деформации. Наклон прямой отражает вязкость. Кривая имеет постепенно изменяющийся наклон, который называют **эффективной вязкостью**. Подобного типа диаграммы получены путем экспериментов с нагретыми горными породами

(Fossen, 2011)

Однако вязкость неоднородных объемов горных пород - это не то же самое, что вязкость материалов, которые принято считать сплошной средой. Например, пачка слоев деформируется не так, как слагающие эти слои породы. В этом случае также прибегают к понятию **эффективной вязкости**, но в более широком смысле



Пластичные материалы

Термин *пластичность* используется здесь в феноменологическом смысле для обозначения текучего поведения, т.е для остаточных деформаций, развивающихся при напряжениях **выше предела текучести (упругости) в кратковременных экспериментах**

Идеально пластичные тела:

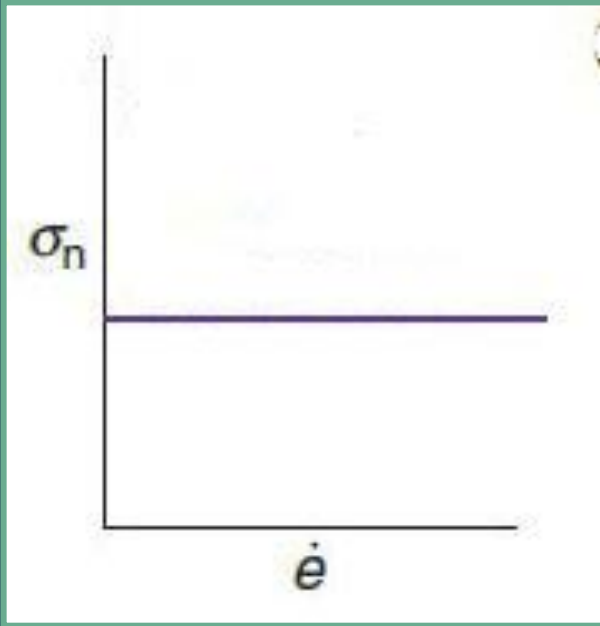
Упругая реакция при напряжениях, не переходящих за предел упругости.

За пределом упругости их деформация стабилизируется и они непрерывно текут.

Раз начавшись, пластическое течение в идеальном случае продолжается без разрыва сплошности материала до тех пор, пока на него действует деформирующее напряжение.



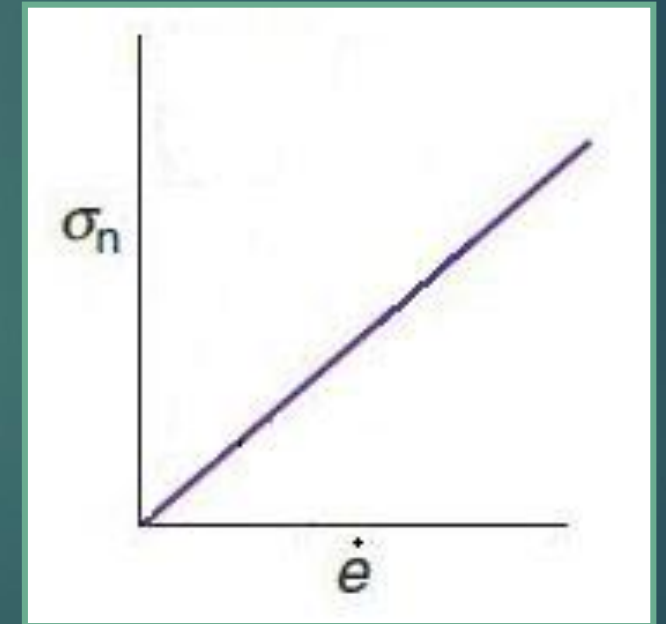
**Пластическое течение =
пластическая деформация**



А вот как выглядит пластическая деформация на диаграмме напряжение – скорость деформации.
Для сравнения ниже приведена диаграмма для вязкого тела.

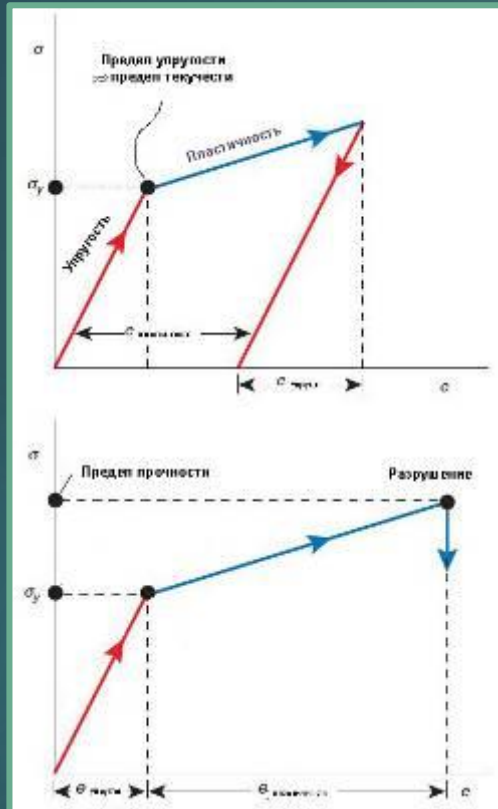
Пластическая деформация

- Пластическая деформация – это деформация при постоянном напряжении, как только будет превышен предел упругости (текучести)
- Напряжение постоянно и **не считается со скоростью деформации**
- Деформация необратима



Вязкое поведение тела

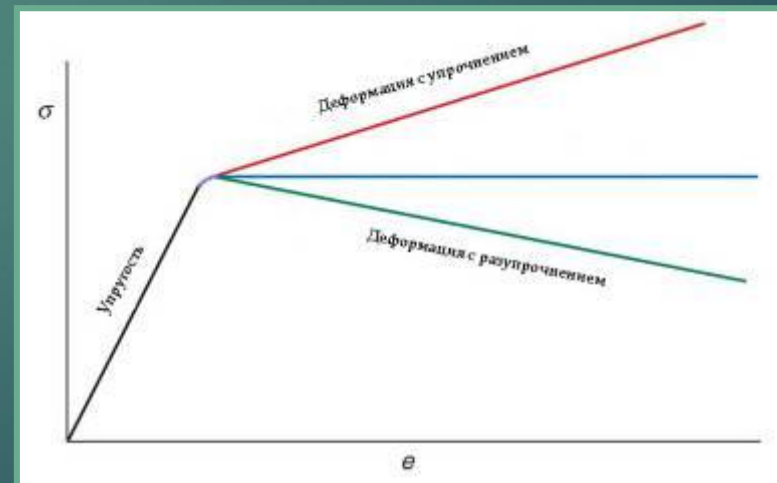
Диаграммы напряжение-деформация для упруго-пластического поведения тела



У некоторых материалов предел упругости четко маркируется увеличением деформации без соответствующего роста напряжения. Для горных пород более типичен такой график зависимости деформации от напряжения, когда кривая поднимается и за пределом упругости, но значительно положе, чем в упругой области (деформация с упрочнением). В некоторых ситуациях наблюдается деформация с разупрочнением.

(а) Упругая деформация сменяется пластической при превышении предела упругости. Если снять напряжение, упругая часть деформации уменьшается до нуля, а пластическая, или необратимая, деформация остается.

(б) В этой ситуации напряжение возрастает до того значения, когда начинается хрупкое разрушение



(Fossen, 2011)

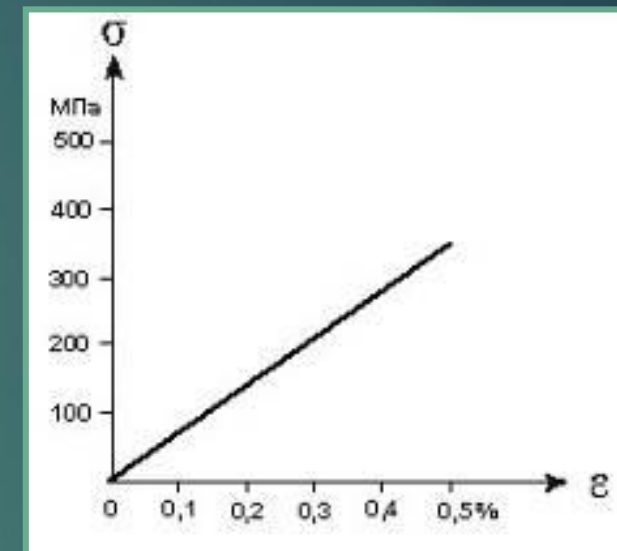
Задачи и примеры



Задача 42

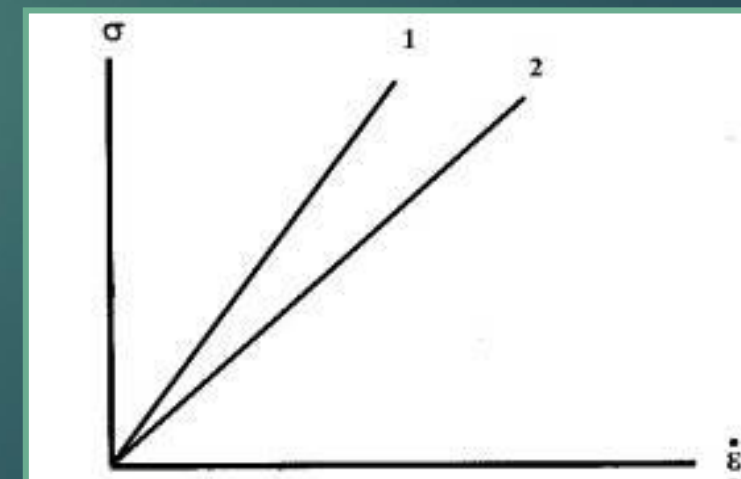
Дано: график зависимости деформации от напряжения.

Найти: модуль Юнга.



Задача 43

У какого из тел, поведение которых в координатах σ , $\dot{\epsilon}$ изображено на рисунке, вязкость больше?





Задача 44

Нарисуйте кривую деформирования для пластического течения твердого тела в координатах σ , ε

Задача 45

Постройте график зависимости скорости **пластической** деформации тела от величины напряжения при достижении напряжением предела упругости

Задача 46

Покажите на графике в соответствующих координатах такое свойство, как ползучесть

Зависимость деформационных свойств горных пород от условий деформирования

Различные типы механического поведения горных пород и их физическая и геологическая интерпретация

Исследования проводились по нескольким направлениям:

- ТЕОРИЯ ДЕФОРМАЦИИ, РАЗРАБОТАННАЯ ФИЗИКАМИ
- ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД И МИНЕРАЛОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУРЫ, ВСЕСТОРОННЕГО ДАВЛЕНИЯ И СКОРОСТИ НАГРУЗКИ
- АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ МАТЕРИАЛАХ
- ПОЛЕВЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Главные механизмы образования остаточной деформации (микроскопический уровень)

- КАТАКЛАСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ (ДРОБЛЕНИЕ И СКОЛЬЖЕНИЕ С ТРЕНИЕМ)
- ВНУТРИКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ
- ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ И РОСТ ЗЕРЕН

Эти механизмы действуют совместно в различных сочетаниях

Механическое поведение горных пород изменяется в широких пределах в зависимости от:

- *Давления*
- *Температуры*
- *Активности флюидов*
- *Времени*

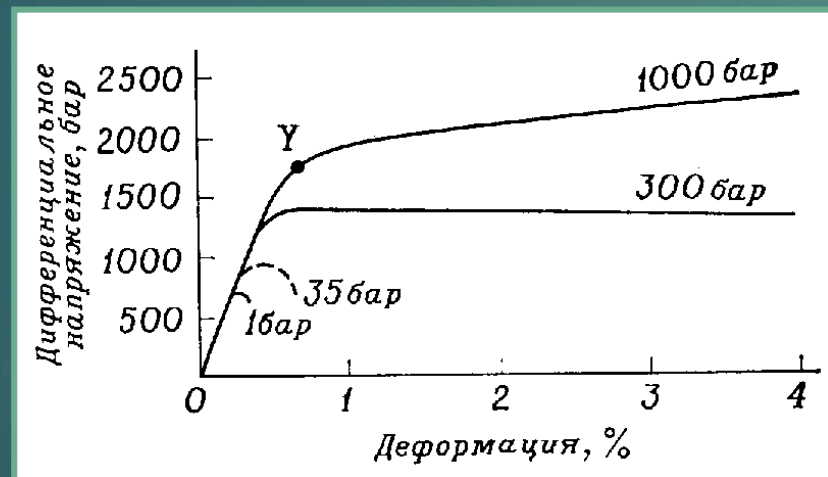
Влияние физических условий на механические свойства пород

Всестороннее давление

Давление зависит от глубины залегания $P = \rho g z$.

Например, литостатическое давление в основании континентальной коры, имеющей толщину 35 км, составляет 1000 МПа или 10 кбар

Давления, достигающие этой величины, могут быть получены экспериментально. Широко известны эксперименты по деформации мрамора.



- А. 1 бар – атмосферное давление. Хрупкое дробление.
- Б. 35 бар. Трещины скалывания.
- В. 300 бар. Сосредоточение деформации в ограниченной зоне, расположенной под углом к оси нагрузки.
- Г. 1000 бар. Однородная деформация (течение)

(Paterson, 1958)

Как изменяются параметры деформации?

1 бар = 10^5 Па

ВЫВОДЫ

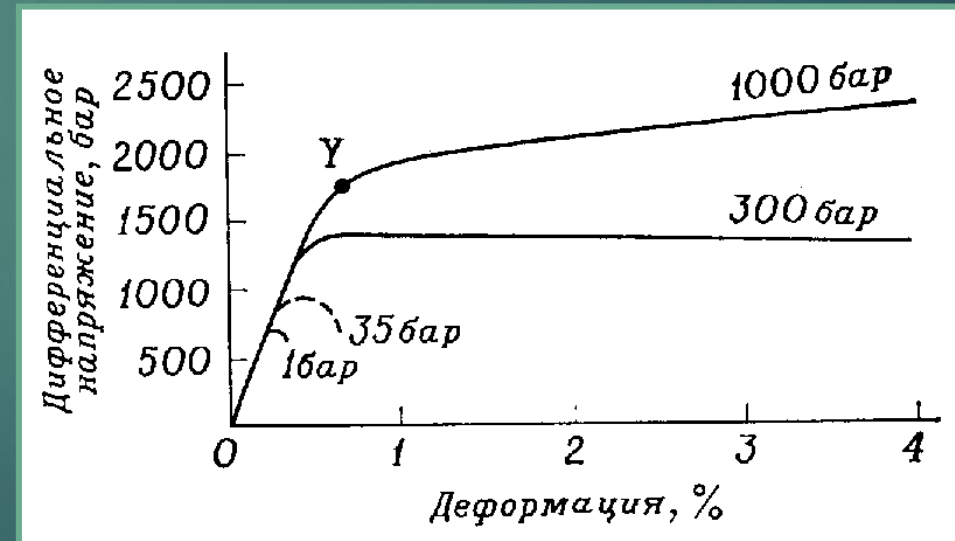
Во всех четырех опытах деформация привела в конечном счете к разрушению образца, но величина остаточной деформации, предшествующей разрыву (мера текучести), увеличивается по мере роста всестороннего давления.

Можно выделить три главных типа поведения горных пород при деформации: хрупкое, переходное между хрупким и текучим и текучее поведение (связное течение), об этом уже говорилось ранее. Во всех горных породах повышение всестороннего давления способствует переходу от хрупкого поведения к текучему.

У каждой горной породы при данном всестороннем давлении существует предел прочности и предел текучести или упругости (напряжение, при котором начинается пластическое течение).

При возрастании всестороннего давления предел прочности приближается к пределу текучести и превосходит его.

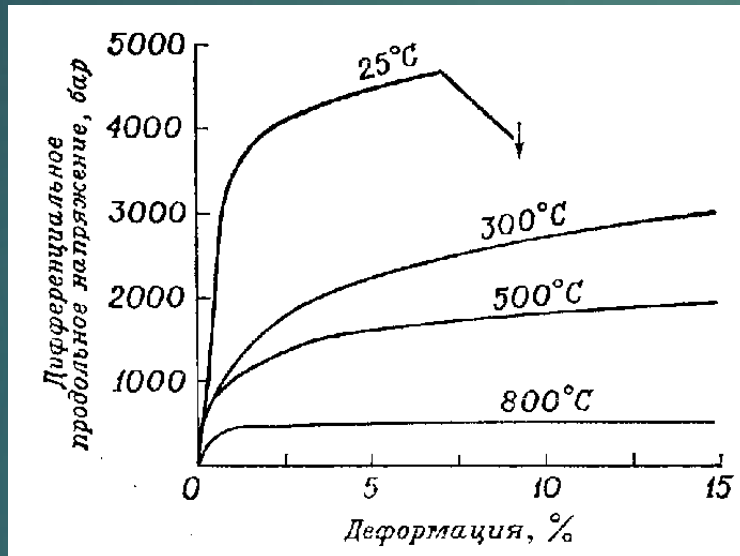
Верхняя кривая демонстрирует деформационное упрочнение



Температура

Температура в земной коре зависит как от глубины, так и от других причин. Температура в основании коры мощностью 30 км может составлять 400-650°.

Выполнено множество экспериментов по деформации образцов горных пород в условиях высоких давлений и температур

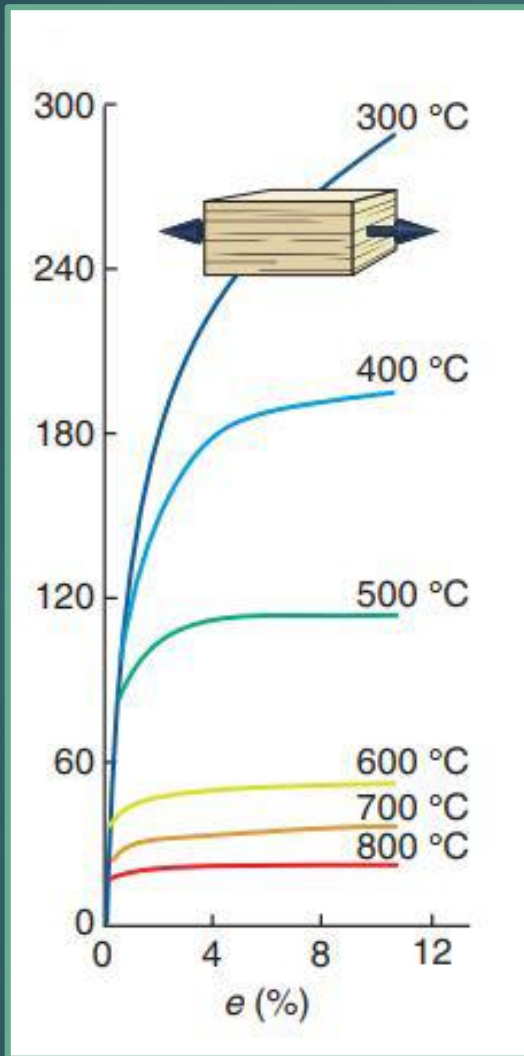


При повышении температуры предел текучести (предел упругости) понижается, интервал текучего поведения расширяется, а величина деформационного упрочнения уменьшается.

Влияние различных температур на характер диаграмм деформации мрамора для случая растяжения при всестороннем давлении 5 кбар (500 МПа). (Griggs et al., 1960)

Для разных пород диаграммы деформации в экспериментах различались. Однако выяснилось, что во всех поликристаллических агрегатах воздействие температуры при любом постоянном высоком давлении приводит к понижению предела текучести, препятствует образованию трещин и усиливает текучесть

Еще одна диаграмма



Эксперименты проводились при разной температуре

Кривые зависимости между напряжениями и деформацией для юльского мрамора в условиях растяжения (Heard and Raleigh, 1972).

По оси ординат – дифференциальное напряжение в меганаскалях

Присутствие жидкой фазы

Большинство горных пород содержит жидкую фазу

Физико-химический эффект влияния флюидов на прочность

Метаморфизм: происходит взаимодействие между твердой и жидкой фазами, следовательно изменяются механические свойства пород.

Изменение прочности:

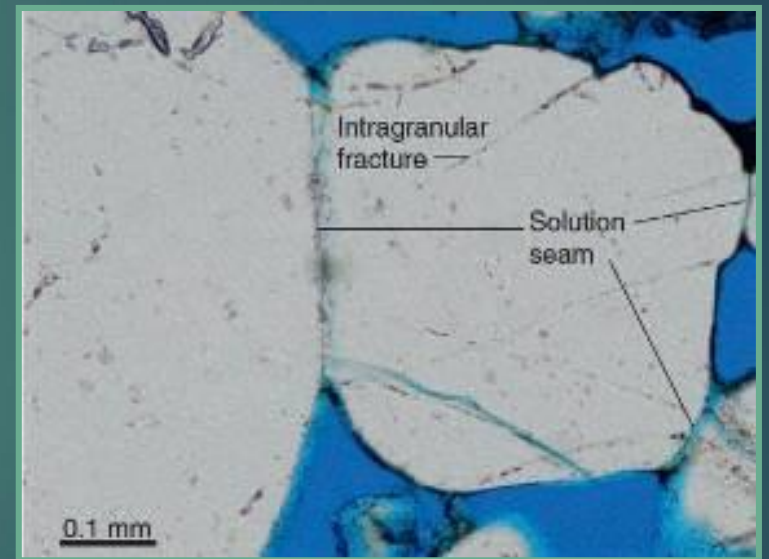
- растворение сильно напряженных частей зерен и рост их в другом месте
- рост новых фаз, стабильных при данных метаморфических условиях

Эксперименты:

В присутствии воды кварц и другие очень прочные силикаты при определенных сочетаниях температуры и давления становятся очень слабыми и текучими (гидролитическое ослабление)

Эффект Ребиндера:

Происходит адсорбция поровой воды на внутренних поверхностях пор, что приводит к уменьшению свободной энергии на границах фаз. Уменьшение поверхностной энергии приводит к понижению прочности.



Механический эффект влияния флюидов на прочность

Появление поровой жидкой фазы, находящейся под высоким давлением.

Бурение показало, что давление поровых жидкостей даже на сравнительно малых глубинах иногда сильно превосходит равновесное (гидростатическое).

Причины этого.

Следствия:

При повышенном давлении поровых жидкостей давление между твердыми зернами не соответствует литостатическому, а понижено на величину, зависящую от порового давления.

$P_e = P - P_f$, где P_e – эффективное давление. P_f – поровое (флюидное) давление.

Эксперименты показали:

Возвращение к явлениям скалывания в породе, которая при этих же температуре и давлении нормально должна быть текучей

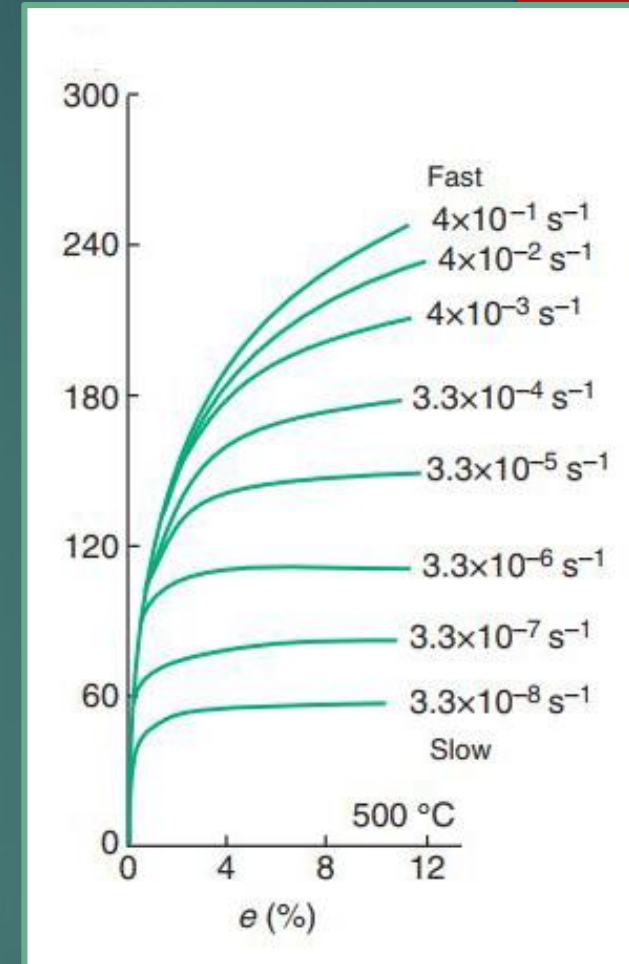
Длительность негидростатической нагрузки

Скорость деформации в эксперименте $\text{min } 10^{-8} \text{ c}^{-1}$ (т.е. 100% за примерно 3 года). В природе длительность, например, складкообразования - сотни тысяч и миллионы лет.

Эксперименты показали:

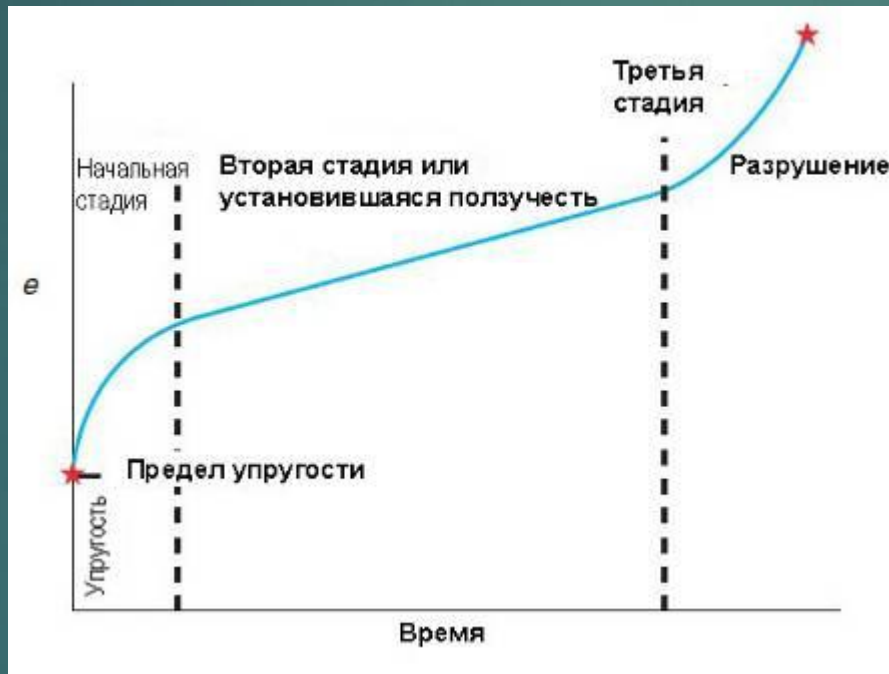
воздействие пониженной скорости деформации проявляется в понижении предела текучести и возрастании роли пластического течения.

При более низких скоростях деформации в интервале $400\text{-}500^\circ$ деформационное упрочнение практически исчезает и достигается состояние устойчивого медленного течения при постоянном напряжении



Кривые зависимости между напряжениями и деформацией для юльского мрамора при 500 C для различной скорости деформации (Heard and Raleigh, 1972). По оси ординат – дифференциальное напряжение в мегапаскалях

Понижение скорости деформации и повышение температуры оказывают сходное действие на поведение пород. Скорость «залечивания» нарушений примерно равна скорости их накопления. Достигается устойчивое состояние медленного вязкого течения (при постоянном напряжении ниже предела текучести). Это ползучесть или крип (creep)



В природе большая часть проявлений ползучести относятся к установившейся стадии

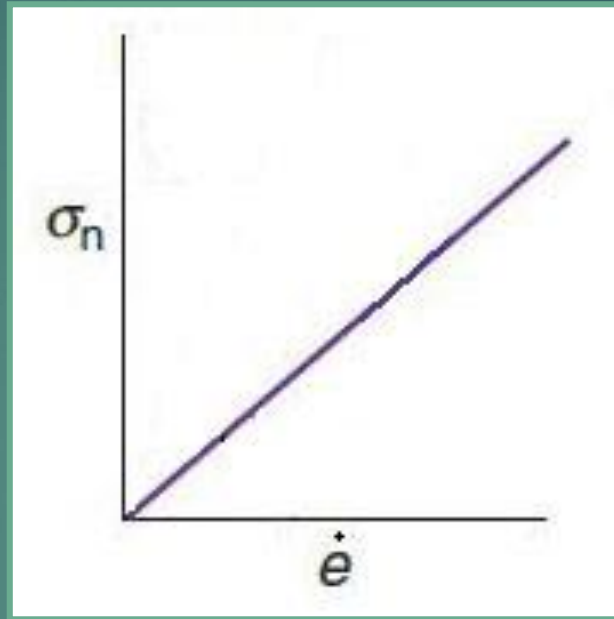
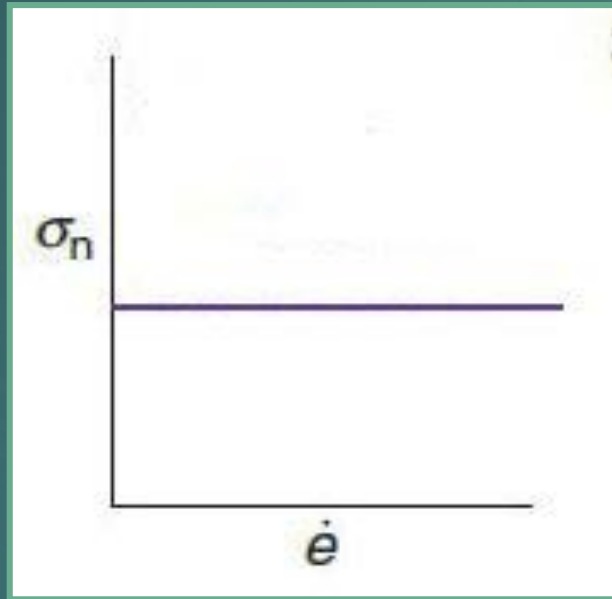
Типичная диаграмма зависимости деформации от времени для ползучести при постоянном напряжении

Изменение деформационных свойств горных пород в зависимости от различных условий

Возрастание (→) или убывание (←) величины деформационных свойств горных пород и толщ при возрастании значений «внешних» параметров

	Предел упругости, σ_e	Предел прочности, σ_s	«Диапазон текучести», $\sigma_s - \sigma_e$	Вязкость, η
Длительность процесса, t	←	←	→	?
Равномерное всестороннее давление, p	→	→	→	→
Флюидное давление, p_f	←	←	→	←
Температура, T	←	←	→	←

Вопрос



Даны два графика в координатах напряжение – скорость деформации. Какой из них характеризует вязкое течение, а какой – пластическое?

Задача 47

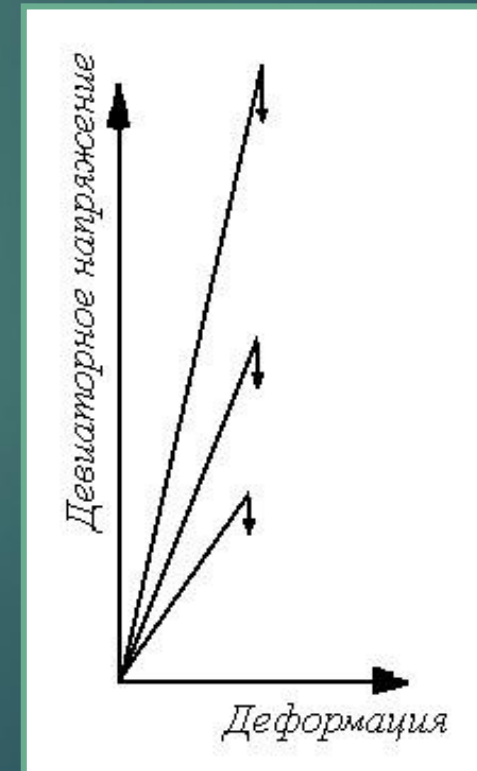
Изобразите с помощью серии кривых в координатах “напряжение-скорость деформации” зависимость вязкости горных пород от температуры.

Задача 48

Изобразите с помощью серии кривых в координатах напряжение -деформация зависимость предела текучести от температуры.

Задача 49

На рисунке приведены диаграммы деформирования и хрупкого разрушения тела (скалывания) при различных величинах всестороннего давления. укажите, какие кривые соответствуют большим величинам всестороннего давления, а какие – меньшим и **почему**.





Все течет...