

Геологический факультет МГУ  
Кафедра динамической геологии  
Лаборатория тектонофизики и  
геотектоники

# Тектонофизика

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

Лекция 8

# ЛЕКЦИЯ 8

Влияние силы тяжести  
на тектонические деформации

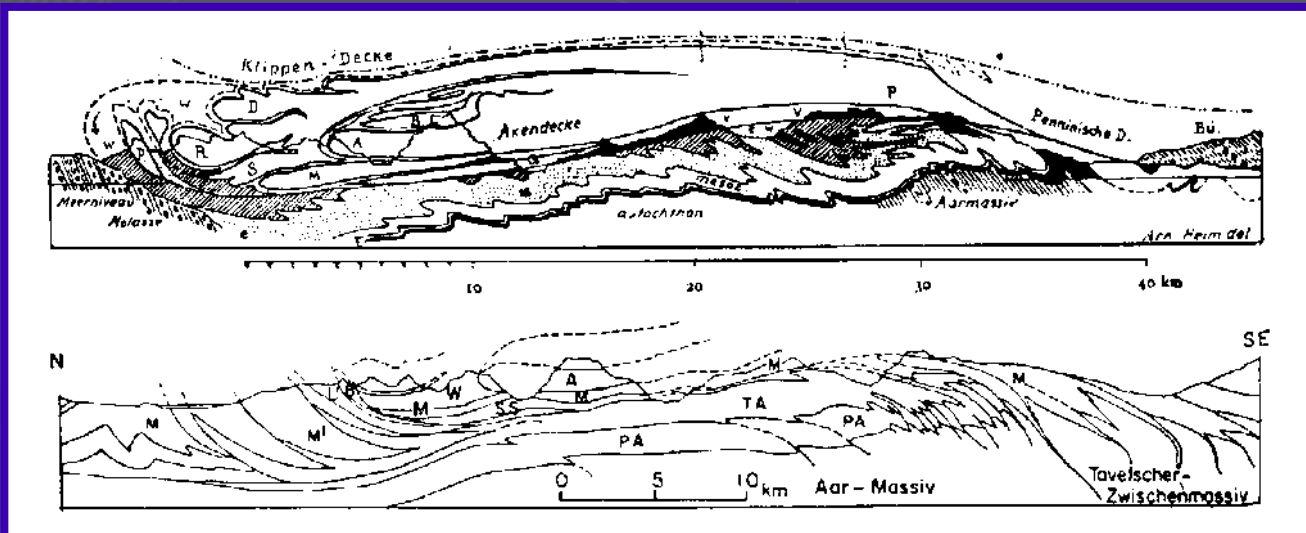


# Парадокс влияния силы тяжести

Эта сила вертикальна, но ее эффект заключается в горизонтальных перемещениях тел. Например, кирпич на абсолютно горизонтальном льду неподвижен, а на слегка наклонном движется почти по горизонтали.

Первое проявление силы тяжести – перемещение тел любых размеров вниз по склону. Подробно формирование деформационных структур в этой ситуации мы с вами рассмотрим во второй части курса.

Гравитационные покровы (шарьяжи) (?), подводные оползни - слампы, олистостромы, обломочные частицы разных размеров – это ряд по мере уменьшения размеров перемещаемых тел. А суть одна – переместить эти тела на более низкий гипсометрический уровень.

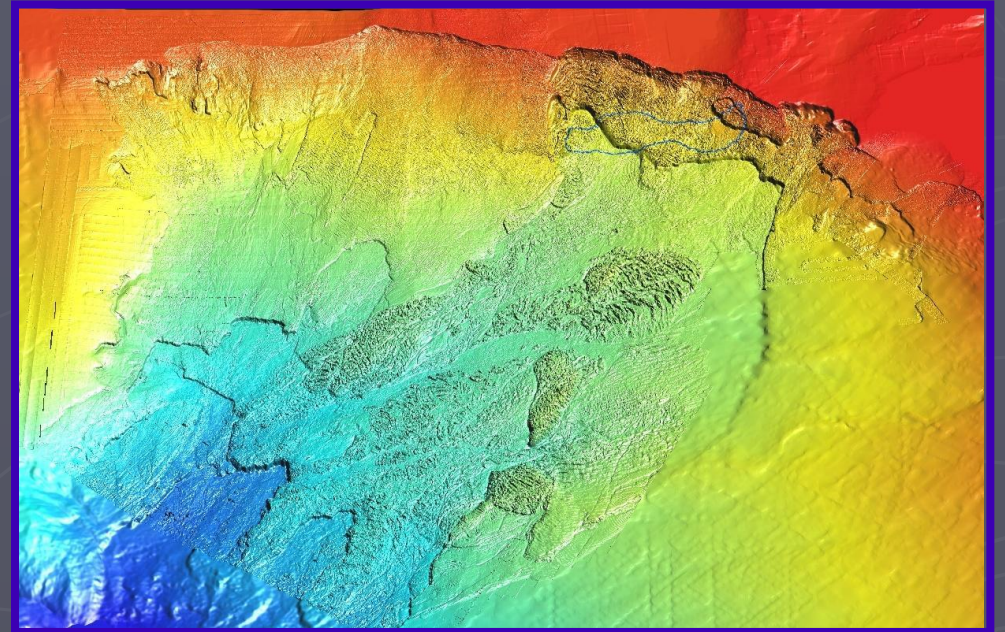


Схематические разрезы Альп Гларуса.  
Из Руттена, 1972.  
Покровы трактуются как гравитационные

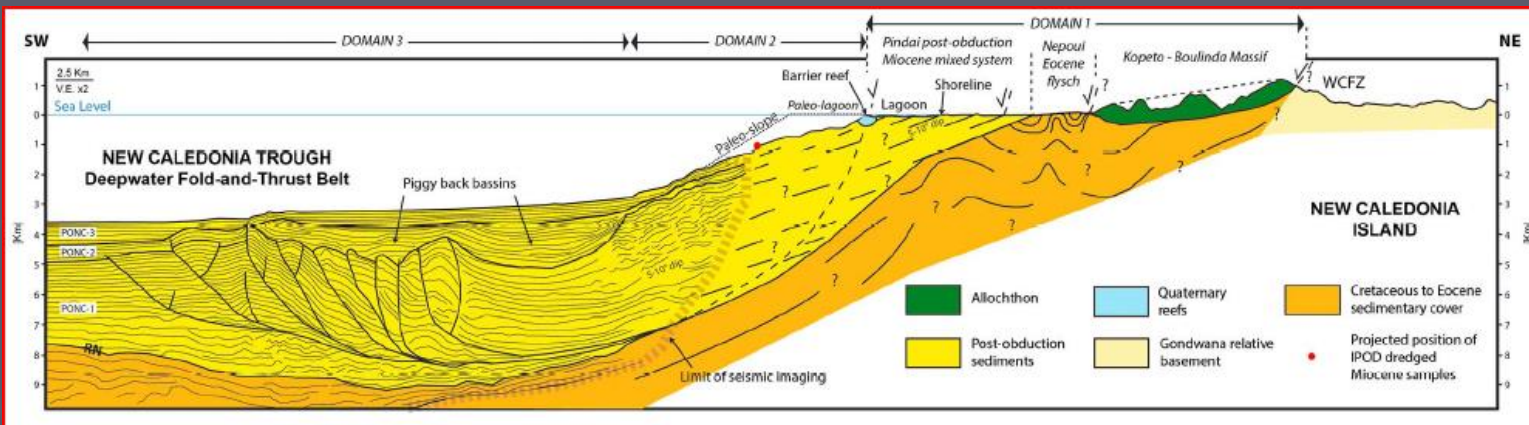


Крупный оползень в Китае  
15 ноября 2020  
Автор: Global Look Press

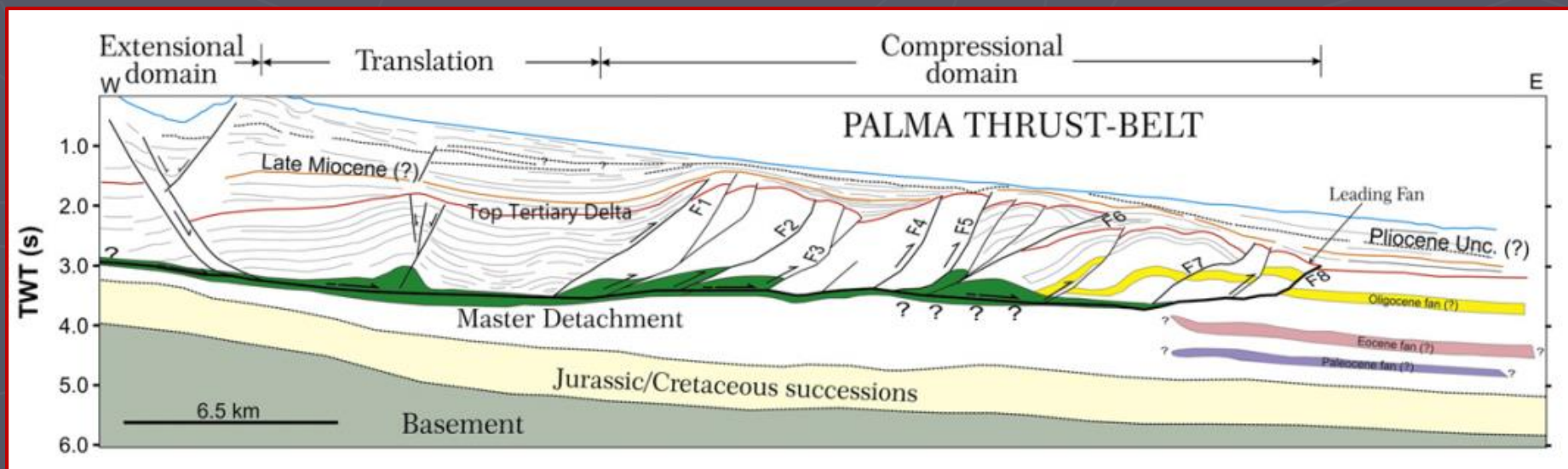
Топография дна с крупным оползневым  
потокм Сторегга на пассивной  
континентальной окраине Норвегии.  
(Kvalstad et al., 2005)



Еще один пример проявления пассивной силы тяжести – *подводные fold thrust belts* (это огромные подводные оползни, или слампы)



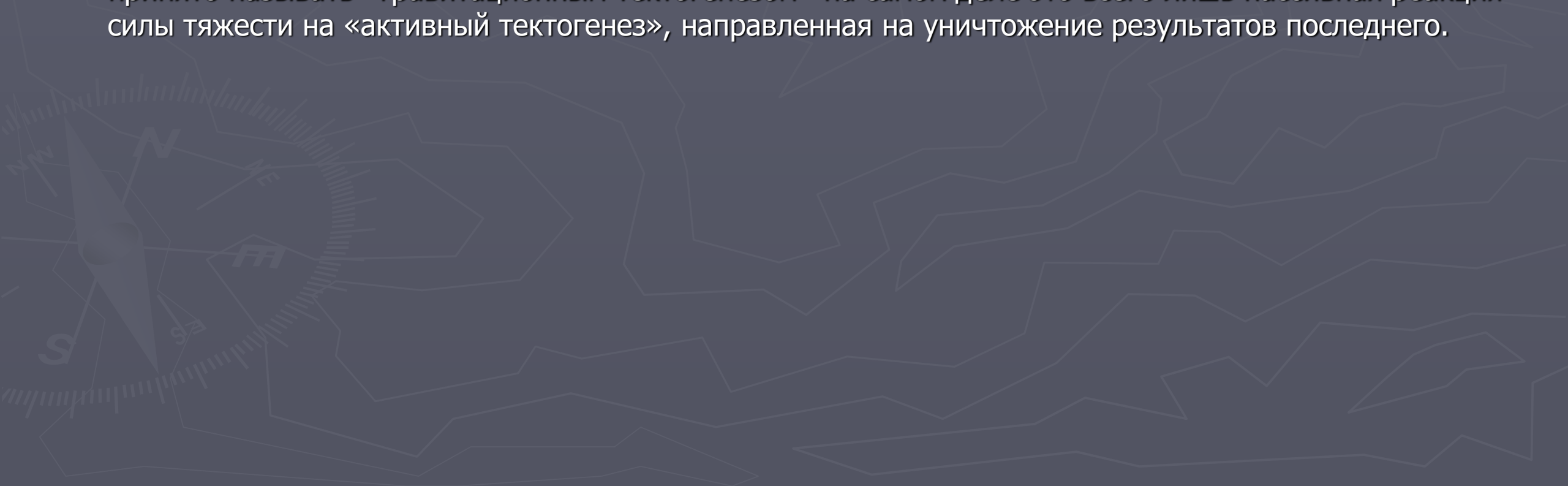
*Новая Каледония (Collot et al., 2017)*



*Побережье Мозамбика (Mahanjane, Franke, 2014)*

# Сила тяжести как пассивный фактор тектогенеза

- ▶ В рассмотренных случаях имеет место нивелирование рельефа земной поверхности путем перемещения масс из области поднятия в область сопредельной впадины.
- ▶ Несмотря на то, что формирование покровов Гельветского типа и других подобных структур было принято называть «гравитационным тектогенезом» на самом деле это всего лишь пассивная реакция силы тяжести на «активный тектогенез», направленная на уничтожение результатов последнего.



# Сила тяжести как активный фактор тектогенеза

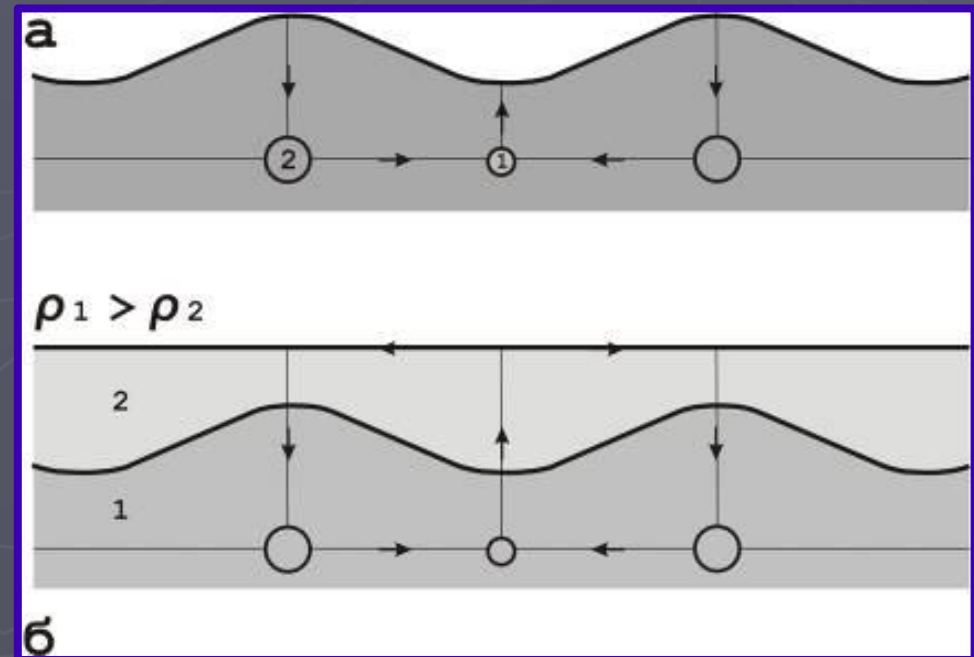
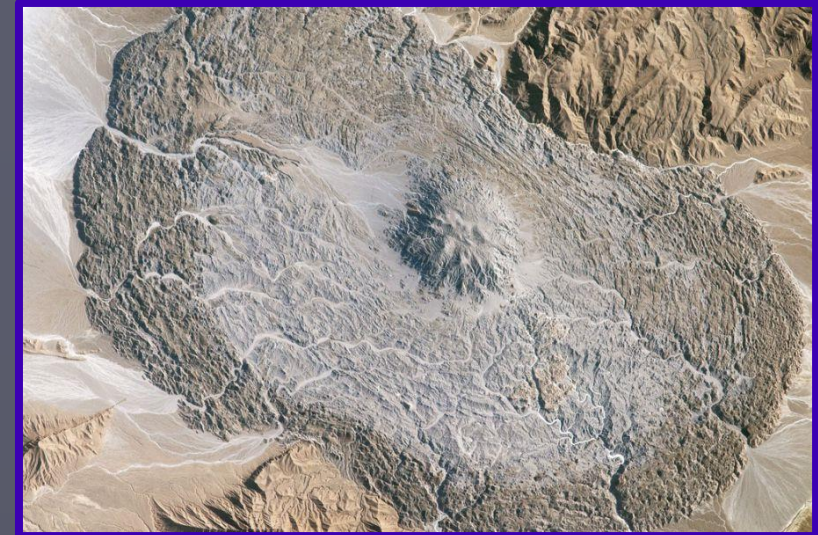
## Локальная инверсия плотности

Одним из наиболее очевидных проявлений силы тяжести является процесс формирования соляных куполов и диапиров.

Примем во внимание:

из физики известно, что жидкость перетекает из области повышенного в область пониженного давления. Однако важно, чтобы эти области находились на одном и том же **горизонтальном** уровне.

В обоих случаях, показанных на рисунке, имеет место тенденция к выполаживанию.



**Исходное идеальное состояние:** горизонтальное залегание толщ. Границы между ними абсолютно ровные. Литостатическое давление не изменяется по латерали.

А)

**Исходное реальное состояние:** неустойчивое равновесие. Разное литостатическое давление из-за неровностей на границе толщ. Зарождение купола

Б)

**Дальнейшее развитие процесса:** лавинообразное увеличение разности литостатического давления и скорости тектонического течения. Образование карнизов.

В)

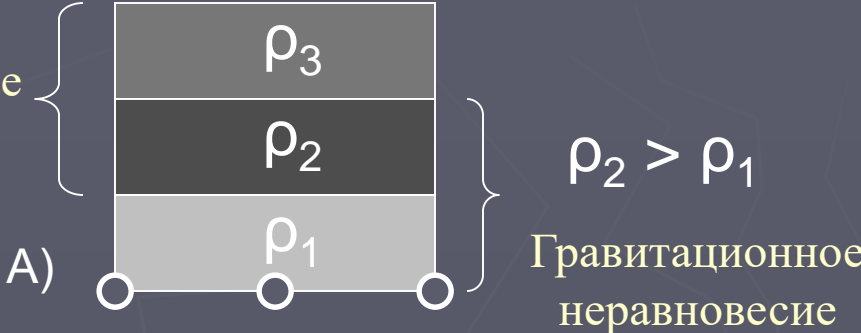
**Рассмотрим следующую ситуацию:**

$$\rho_2 > \rho_1 > \rho_3$$

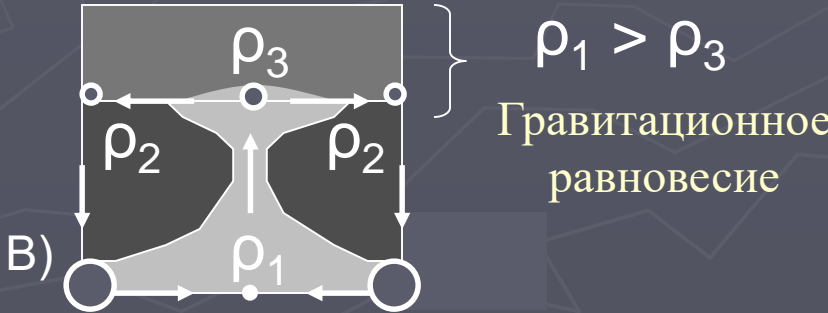
$$\rho_2 \gg \rho_3$$

○ → Литостатическое давление

Гравитационное равновесие



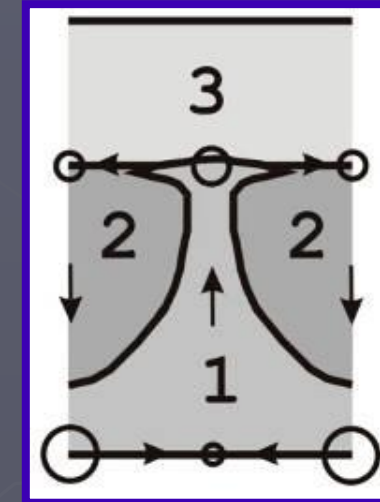
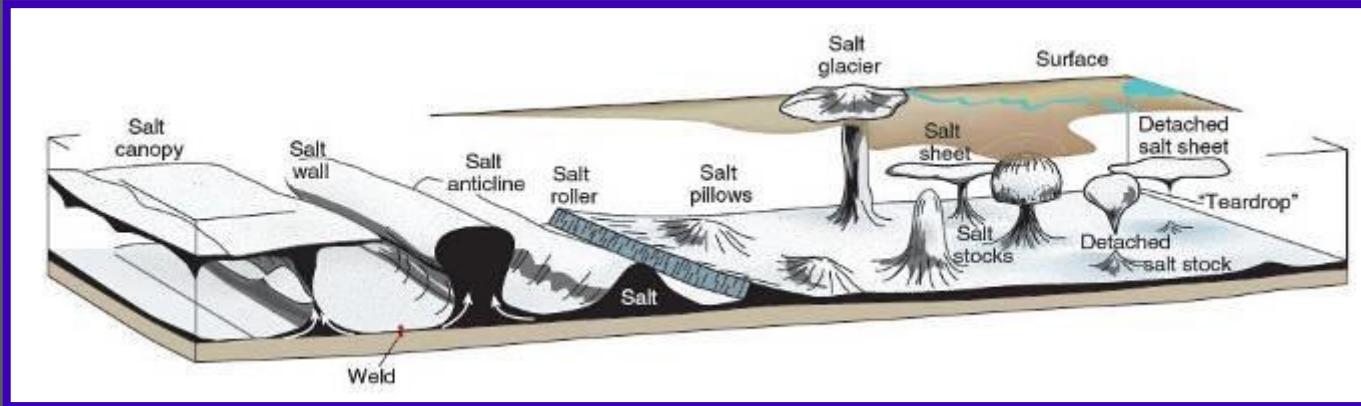
**Ведущая сила этого процесса – сила тяжести**



*Относительное давление отражено величиной кружков*



# Структуры, сформированные толщами соли



Различные типы соляных структур, их название и геометрия.  
(Fossen, 2011)



Соляной купол в Загросе на границе  
Ирака и Ирана.  
<https://ru.wikipedia.org/wiki>

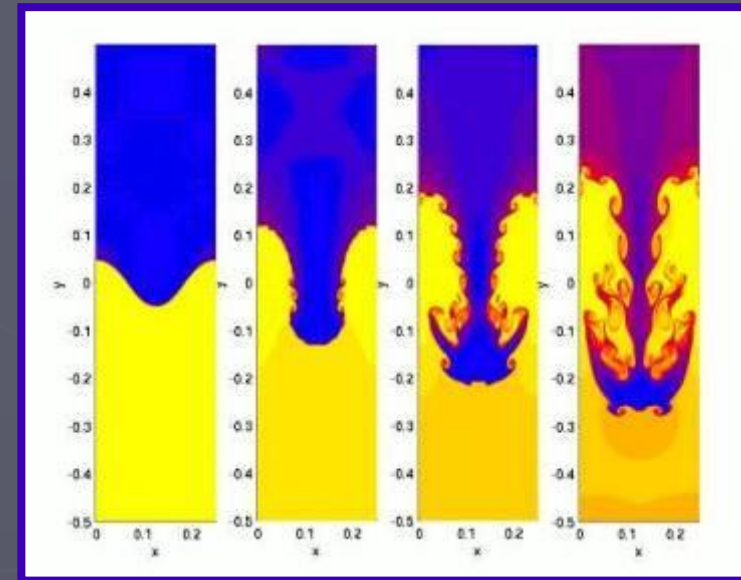
$2,2 \text{ г/см}^3$  (соленосная толща)  $\approx \rho_1 < \rho_2 \approx 2,5 \text{ г/см}^3$  (нижняя  
терригенная толща).

Лавинный процесс: из-за разности давлений растёт поднятие и углубляются впадины, что ещё больше увеличивает разность давлений).

$2,2 \text{ г/см}^3 \approx \rho_1 > \rho_3 \approx 2,0 \text{ г/см}^3$   
(верхняя терригенная толща).

Дальше поднятие не растёт (теперь в его верхней части повышенное давление) и расползается в виде «козырьков»

Кроме соли могут всплывать разжиженные глины, магма и т.п. Материал с малой плотностью поднимается вверх благодаря силе плавучести. Математически эти структуры можно описать через явление **неустойчивости Рэля — Тейлора**, которая имеет место на границе между двумя толщами разной плотности.



Простейший случай неустойчивости Рэля — Тейлора — неустойчивость поверхности раздела жидкостей либо газов с различными плотностями в поле тяготения, когда слой более плотной среды лежит в неустойчивом равновесии на слое менее плотной. Если в начальном состоянии плоскость раздела перпендикулярна вектору силы тяжести, то любое возмущение поверхности раздела будет расти с течением времени, так как участки более плотной среды, оказавшиеся ниже плоскости раздела, начинают «тонуть» в менее плотной среде, а участки менее плотной среды, оказавшиеся выше плоскости раздела, начинают «всплывать» в более плотной среде. Такое взаимное проникновение ведет к уменьшению потенциальной энергии системы, которая достигает минимума, когда слои полностью меняются местами, то есть система достигает устойчивого равновесия.



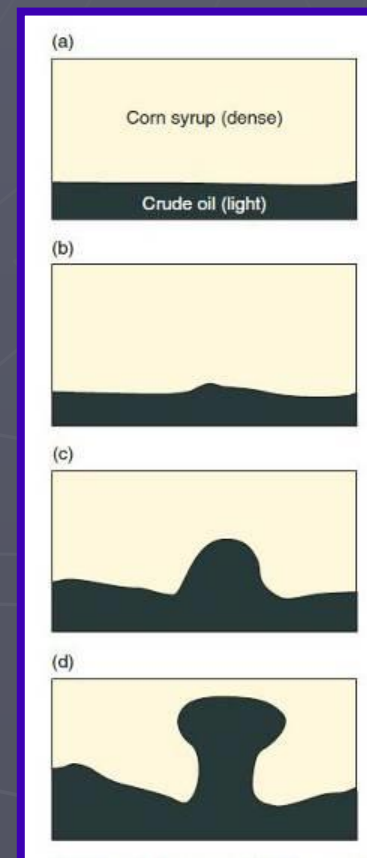


Соляные структуры в Dasht-e Kavir, Иран. Видна округлая форма диапиров (Fossen, 2011)

*Экспериментальное подтверждение формирования соляных куполов вследствие инверсии плотности и всплывания более легкого материала. Последовательные стадии роста поднятия нефти (черное) в сиропе.*

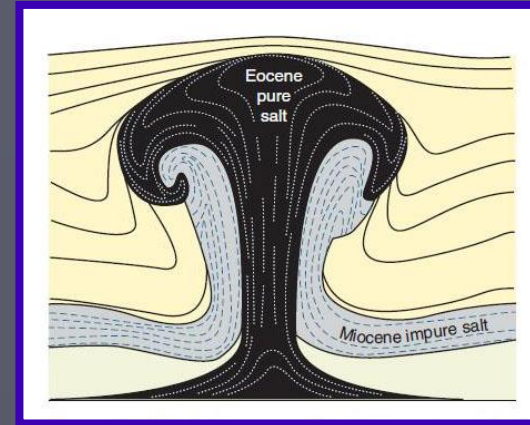
*Схематическая зарисовка опыта Нетлтона, 1934 (из Fossen, 2011)*

Это сейчас всеми признано, что более или менее цилиндрические тела соли, протыкающие осадочные слои во многих регионах земного шара, внедрены силой всплывания, вызванной разностью плотностей. Это было высказано Аррениусом еще в 1912 г. относительно куполов Германии, однако получило преобладающее признание только после 1930 г.

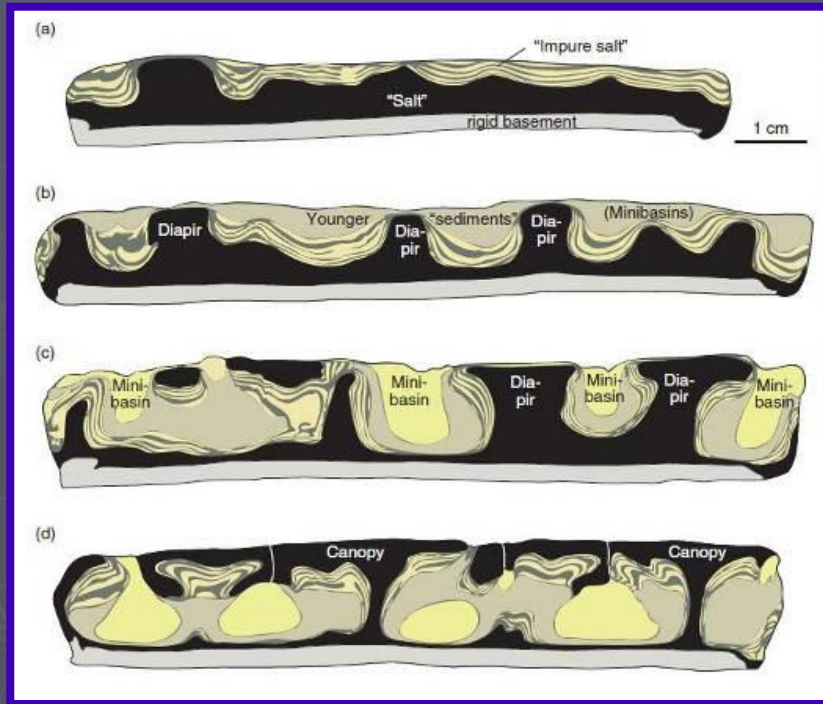


# Экспериментальное подтверждение формирования диапировых структур вследствие всплывания легкого материала

Опыты Х. Рамберга в центрифуге



Соляные структуры в Dasht-e Kavir, Иран  
(из Fossen, 2011)



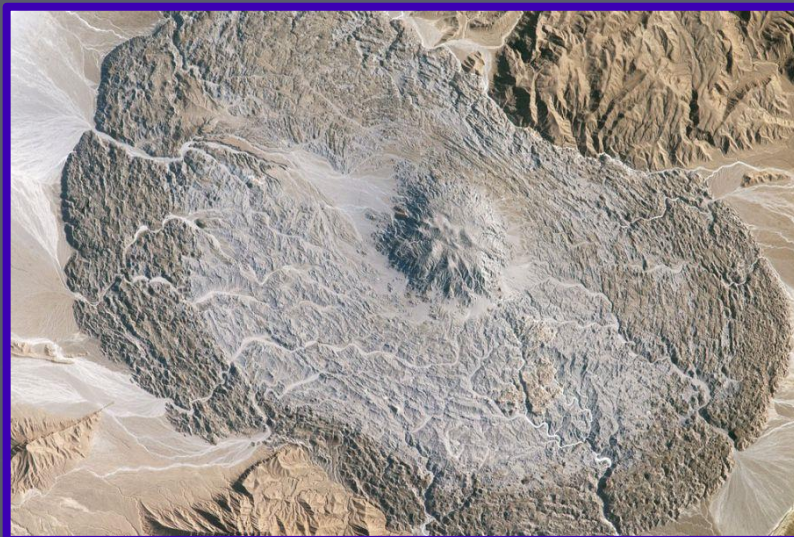
(по Х. Рамбергу, из Fossen, 2011)



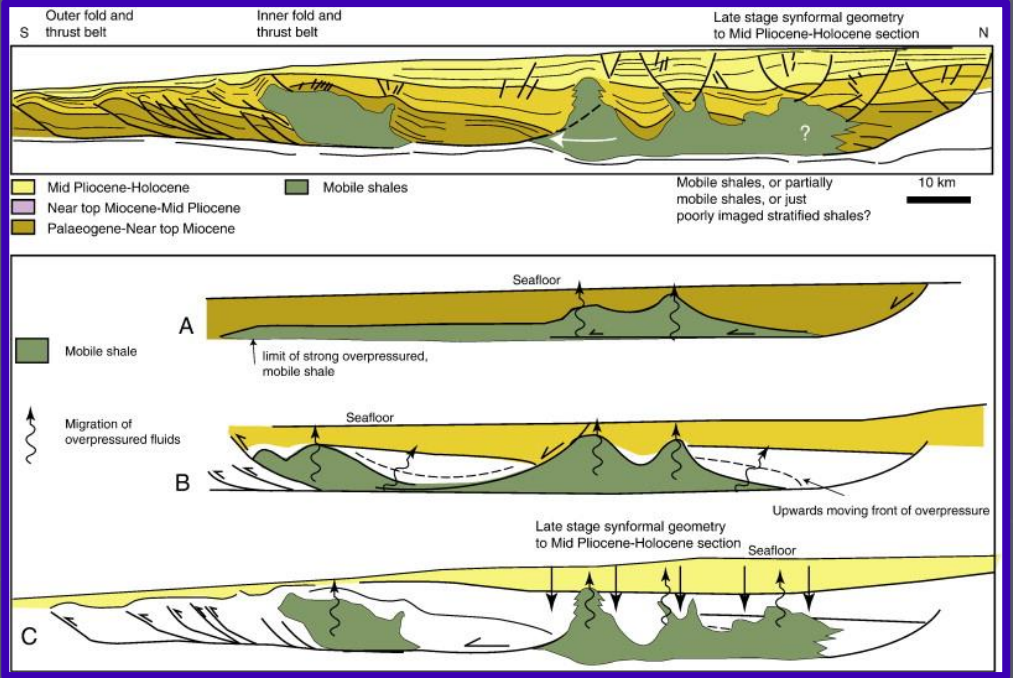
Центрифугированная модель купола из силикона со смятыми и складки и разорванными слоями модельной глины; купол прорвал слоистую толщу грунтовки контрастной расцветки.

(Рамберг, 1970)

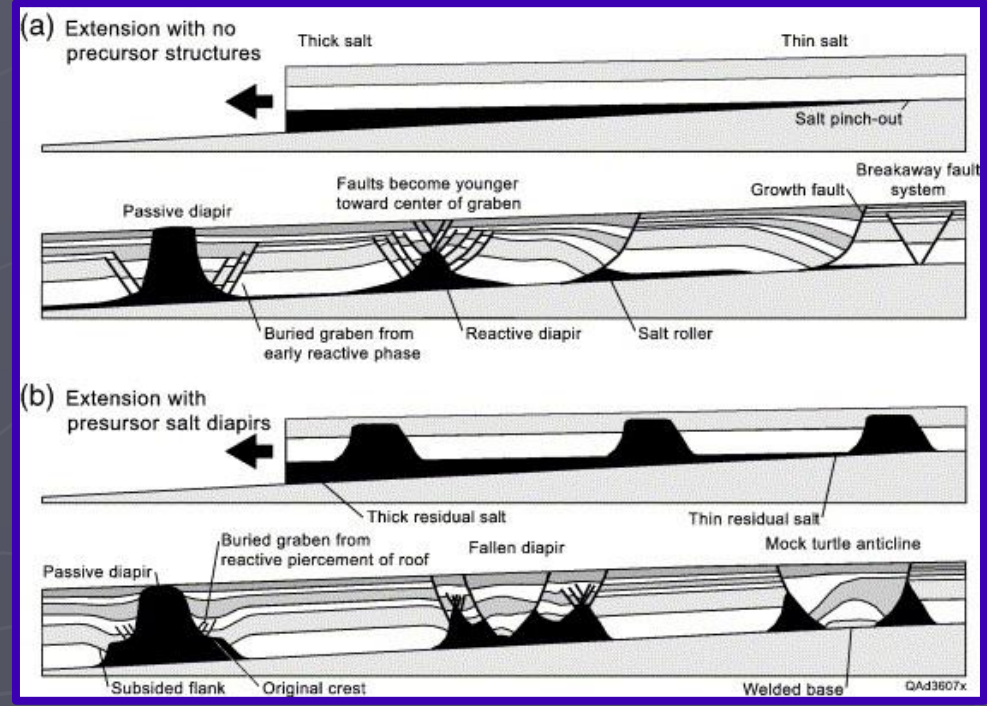
# Горы Загрос, Иран



# Совместное проявление активной и пассивной силы тяжести



(Hudec, Jackson, 2007)



# Региональная инверсия плотности

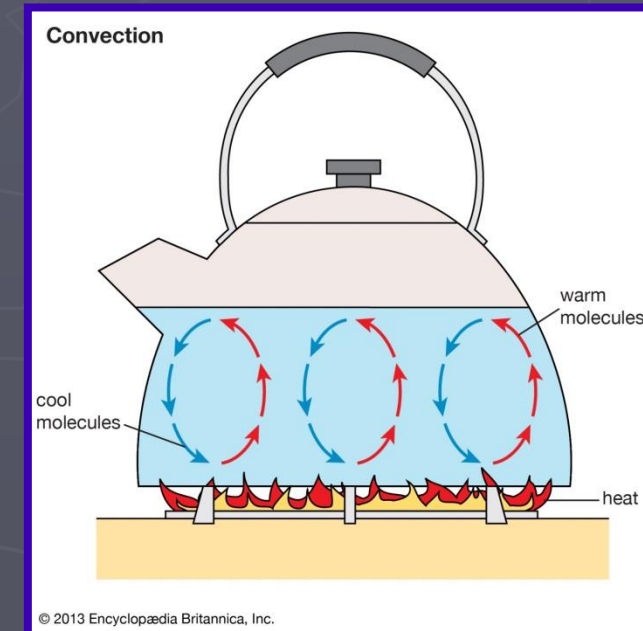
Выше были рассмотрены примеры **локальной** инверсии плотности.

Структуры регионального масштаба возникают при проникновении в осадочную толщу **теплового импульса из мантии.**

## Следствия прогрева:

Простое нагревание - породы как таковые немного расширяются и тем самым их плотность становится меньше. Но обычно в них сохраняются *флюиды* (еще с момента осадконакопления), которые расширяются гораздо значительнее самих пород. Таким образом, толщи с нагретыми флюидами становятся существенно менее плотными, чем «холодные».

Это приводит к возникновению инверсии плотности в осадочной толще, так как нижняя ее часть становится легче верхней (то же происходит при подогреве снизу воды в чайнике).



## Нагревание приводит к региональному метаморфизму.

При увеличении степени метаморфизма происходит прогрессивная потеря воды, находящейся в различном виде в минералах.

Характерная реакция:



*Метаморфическая реакция дегидратации осадочной толщи,*



*Пример метаморфической реакции дегидратации. Возрастание объема на 10%*

Дополнительное увеличение объема легкой нагретой воды в породах (а такая вода не уходит сразу) приводит к еще большей разности плотностей.

В результате нижняя, более легкая часть толщи "всплывает", а более тяжелая погружается.

В процессе этих взаимных перемещений в слоистых толщах может возникнуть складчатость



# УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОНВЕКЦИИ



## *Критерий устойчивости Рэля*

Великий английский физик  
Дж.У. Рэлей (1842-1919)

## Подогрев снизу вызывает в слое или толще состояние инверсии плотности

Однако, как это выяснил еще в начале 20-го века великий английский физик Дж. У. Рэлей, не всякая инверсия плотности влечет за собой конвекцию в этом слое или толще. Существует обобщенный показатель, открытый этим ученым и названный впоследствии в его честь числом Рэля:

$$R = \frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot \frac{g h^3}{\nu X}$$

*Критерий (число) Рэля для толщи, подогреваемой снизу и потенциально способной к конвекции.*

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

*Определение кинематической вязкости слоя или толщи.*

$$X = \frac{\chi}{\rho c}$$

*Определение температуропроводности слоя или толщи.*

В числителе критерия Рэля фигурируют параметры, способствующие конвекции, а в знаменателе – параметры, препятствующие конвекции

$$R = \frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot \frac{g h^3}{\nu X}$$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho}$$

- относительная разность плотностей в кровле и подошве горизонтального слоя, подогреваемого снизу. Это отношение выражает степень инверсии плотности и зависит от разности температур в подошве и кровле слоя и коэффициента объемного теплового расширения вещества слоя.

**$g$**  - ускорение силы тяжести. Разность литостатических давлений на одном горизонтальном уровне в разных местах является «движущей силой» конвективного процесса. Но само литостатическое давление определяется по формуле  $p = \rho gh$ , в которую входит множитель  $g$ . Чем выше ускорение силы тяжести  $g$ , тем выше литостатическое давление, а тем самым выше и разность литостатических давлений.

**$h^3$**  – мощность горизонтального слоя. Будучи в третьей степени, этот показатель отражает объем конвектирующей массы вещества и указывает на то, что в поле тяжести большие массы вещества с большей вероятностью могут быть вовлечены в процесс конвекции, чем малые массы.

**$\nu$**  - кинематическая вязкость вещества слоя - частное от деления «обычной» вязкости на плотность этого вещества  $\nu = \eta / \rho$ . Отражает сопротивление вещества относительным перемещениям его элементарных объемов.

$$R = \frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot \frac{g h^3}{\nu X}$$

$X$  представляет собой дробь:  
 $\chi$  (строчная) обозначает теплопроводность,  
а  $c$  - удельную теплоемкость вещества.

$$X = \frac{\chi}{\rho c}$$

Увеличение теплопроводности  $\chi$  уменьшает вероятность возникновения конвекции.

Напротив, увеличение удельной теплоемкости  $c$  а вместе с ней и теплоемкости единицы объема ( $\rho c$ ) увеличивает такую вероятность.

В параметре  $X$  как бы отражается конкуренция двух основных механизмов передачи тепла – кондуктивного (посредством теплопроводности) и конвективного.

Чем выше теплопроводность  $\chi$  вещества слоя, тем больше плотность кондуктивного теплового потока, тем меньше необходимости в другом – конвективном - способе передачи тепла. Зато чем выше теплоемкость единицы объема  $\rho c$  вещества слоя, тем большее количество тепла может быть перенесено этой единицей объема при ее конвективном перемещении, тем выше вероятность возникновения конвекции.

# Числа Рэлея

Существует 1-е критическое число Рэлея  $R_1 \sim 10^3$ , оно безразмерно.

Если  $R < R_1$ , то конвекция не возникает, а вот при  $R > R_1$  конвекция начинается.

Есть существенная разница между «всплыванием» соляных диапиров (сейчас это называется «*химической конвекцией*», т.к. инверсия плотности обусловлена разницей плотности разных веществ, в нашем случае осадочных пород и соли) и *тепловой конвекцией*, обусловленной лишь разницей температур в подошве и кровле слоя или толщи. В первом случае выступ соли сохраняет свою плотность.

Во втором случае выступ с повышенной температурой (и пониженной плотностью) попадает в область более низких температур, и его плотность увеличивается, так что его дальнейший подъем становится проблематичным. Число Рэлея как раз и устанавливает критический порог.

Помимо 1-го критического числа Рэлея  $R_1 \sim 10^3$ , существует 2-е критическое число  $R_2 \sim 10^4$ .

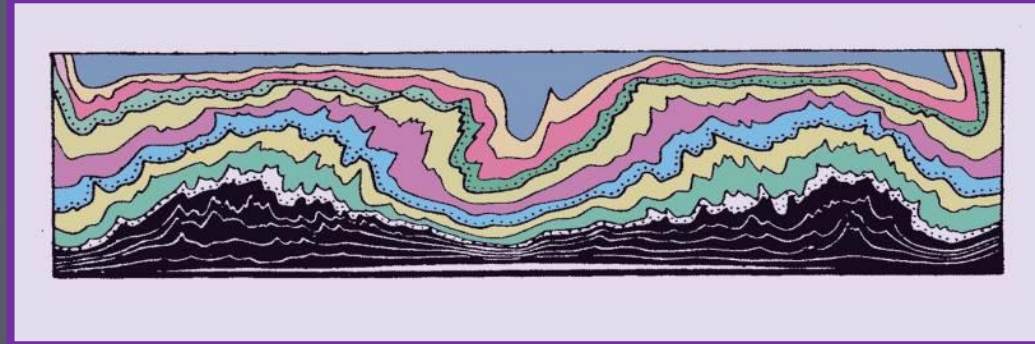
При  $R_1 < R < R_2$  конвекция происходит в форме вытянутых по горизонтали линейных валов.

Возникающая при этом складчатость – также **линейная**, что характерно для большинства складчатых областей.

$$R_1 < R < R_2$$
$$R_1 \sim 10^3; R_2 \sim 10^4.$$

# Линейная форма конвекции

Имитация инверсии плотности  
с помощью теплового импульса  
(Гончаров, Горелов, 1975)



Эквивалентный материал: сплав канифоли с машинным маслом

Техника изготовления образцов: охлаждение, дробление, засыпка тонкими слоями, уплотнение под прессом, слабое нагревание

Способ реализации теплового импульса: прибор с проводящей нижней стенкой (дном) и теплоизолирующими остальными стенками помещался в термокамеру.

Изучение результатов: охлаждение и разрезание образца

**Результат опыта:** В модельных образцах формируется складчатость, линейная в плане (была подобрана такая разность температур в подошве и кровле образца – около  $5^\circ$  - чтобы было лишь слегка превышено первое число Рэлея  $R_1$ ). Крупные структурные формы осложняются мелкими складками

# Купольная форма конвекции

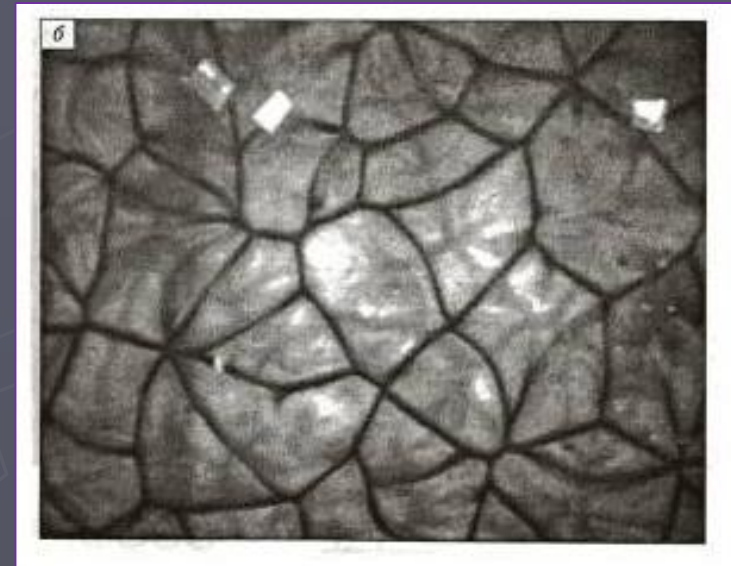
При  $R > R_2$  конвекция происходит в форме куполов.

$$R = \frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot \frac{g h^3}{\nu X}$$

В критерии Рэлея в числителе фигурирует степень инверсии плотности, прямо пропорциональная вертикальному градиенту температуры.

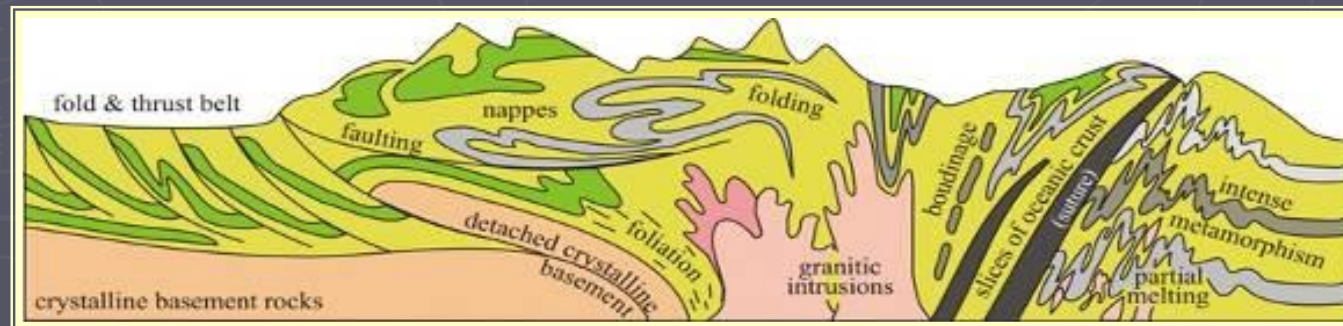
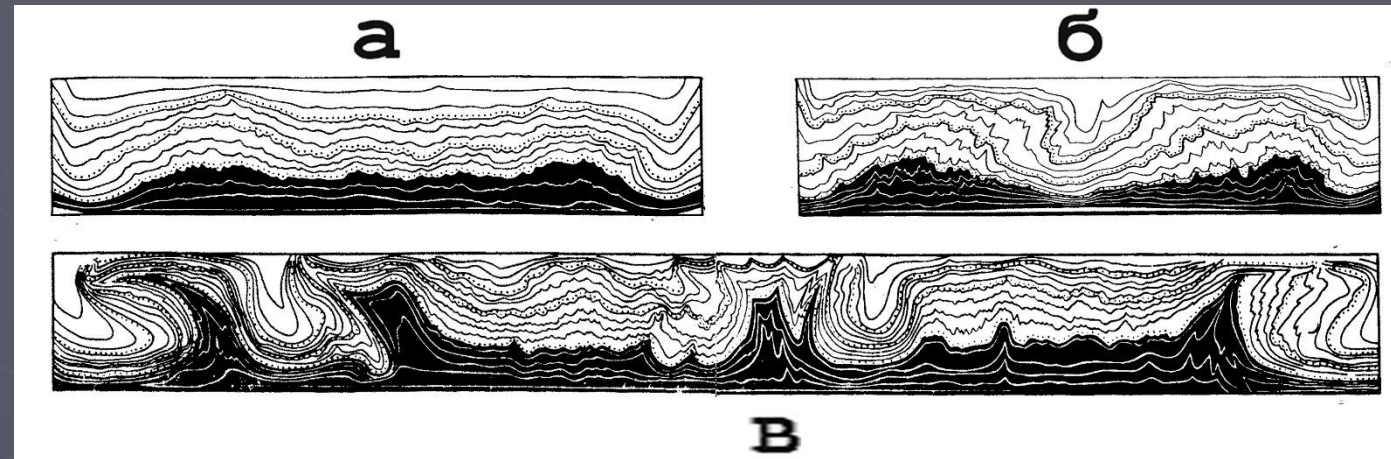
Поэтому при умеренных значениях градиента температуры и при умеренной степени регионального метаморфизма  $R < R_2$  и мы наблюдаем **линейную** складчатость.

А при повышенных значениях температуры, т.е. при повышенной степени метаморфизма,  $R > R_2$ , и мы часто наблюдаем гнейсовые или гранито-гнейсовые купола, а также более крупные **изометричные** структуры.



Ячейки Бенара, возникающие при тепловой конвекции в горизонтальном слое жидкости, подогреваемом снизу (эксперимент А.Г. Кирдяшкина и А.А. Кирдяшкина).

# Возможно, тепловая конвекция в земной коре играет заметную роль в формировании структуры складчатых сооружений



Вверху – результат по воспроизведению тепловой конвекции  
В Лаборатории тектонофизики МГУ (М.А. Гончаров, Ю.М. Горелов).  
Внизу – обобщенная модель складчатого сооружения.



# Более сложные случаи конвекции

Форма конвективных ячеек зависит не только от числа Рэлея, но и от расположения источника нагрева.

Существует тепловая конвекция **двух рангов**

Это было подтверждено экспериментально (А.Г. Кирдяшкин, 1989).

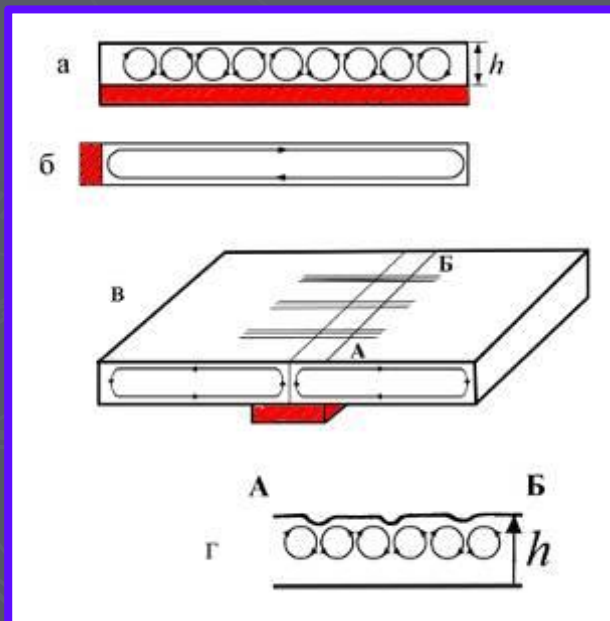
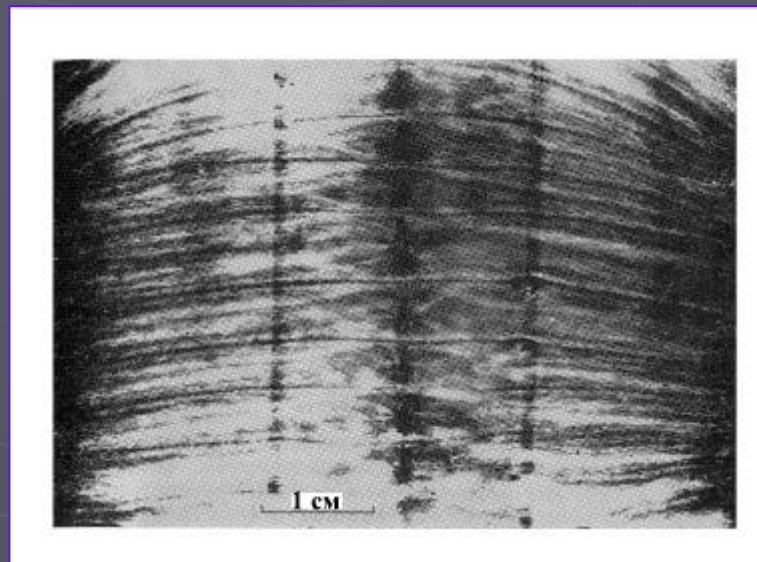


Схема опытов



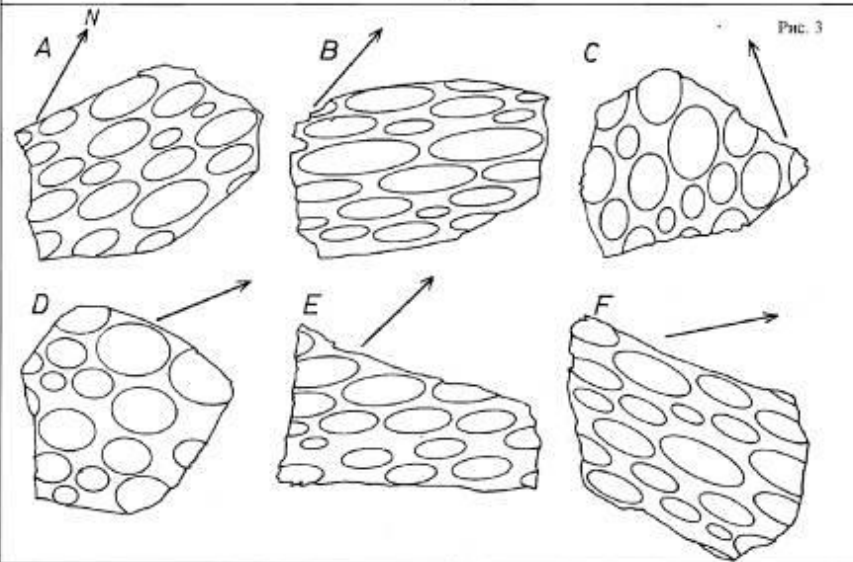
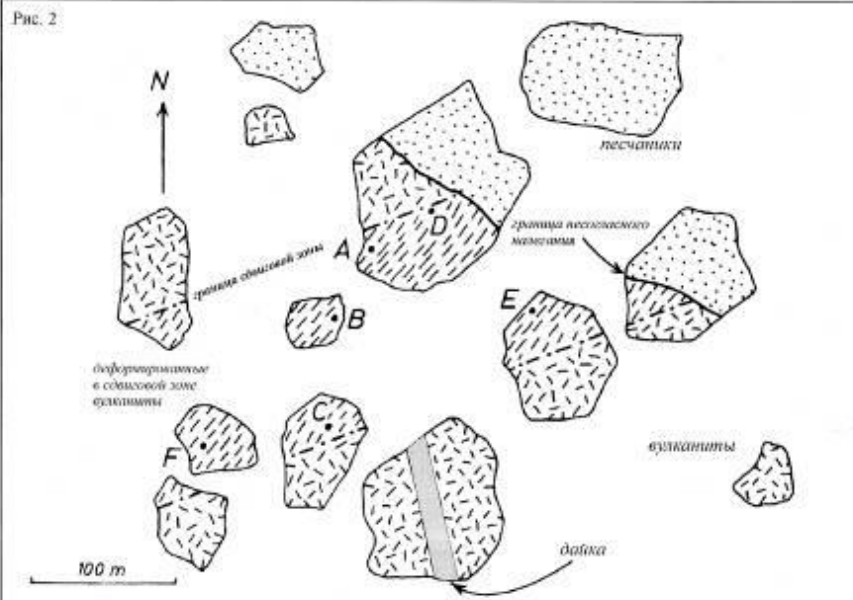
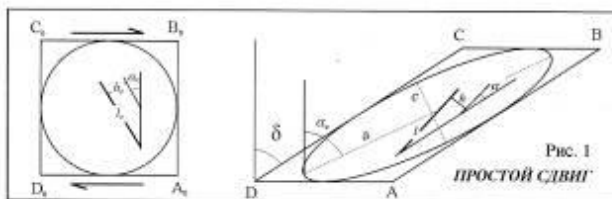
Вид сверху на физическую модель, схематично показанную на рис. в

# Задача 50

Обсудить на лекции,  
Решить дома.  
Прислать решение



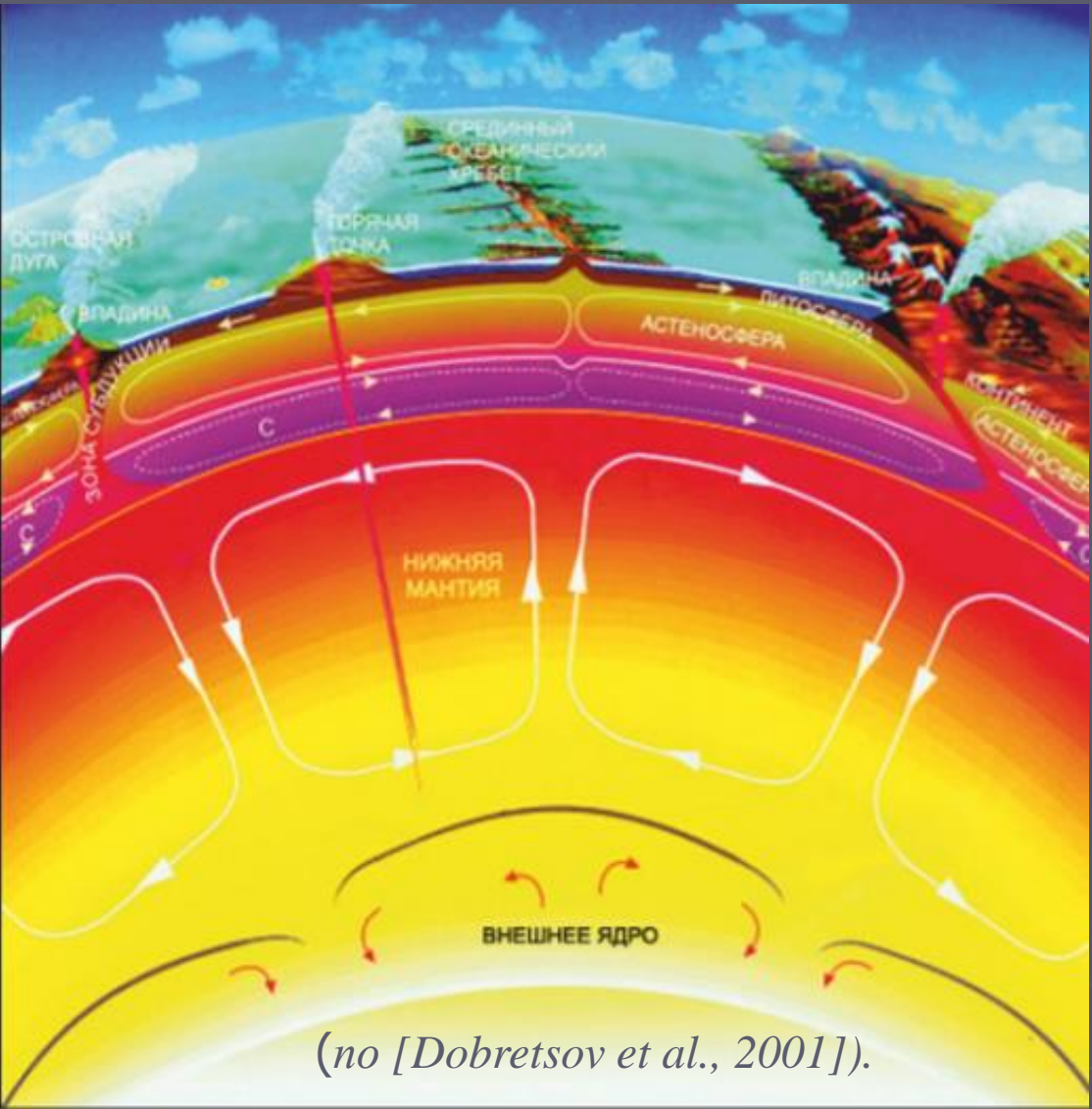
В сдвиговой зоне (рис. 2) собраны образцы вулканитов, в которых зафиксированы эллипсоидальные пустоты (рис. 3). Как показали наблюдения, вне сдвиговой зоны эти объекты имеют правильную сферическую форму. Определить направление и амплитуду сдвига, показав продолжение дайки в сдвиговой зоне и к северу от нее (рис. 2).



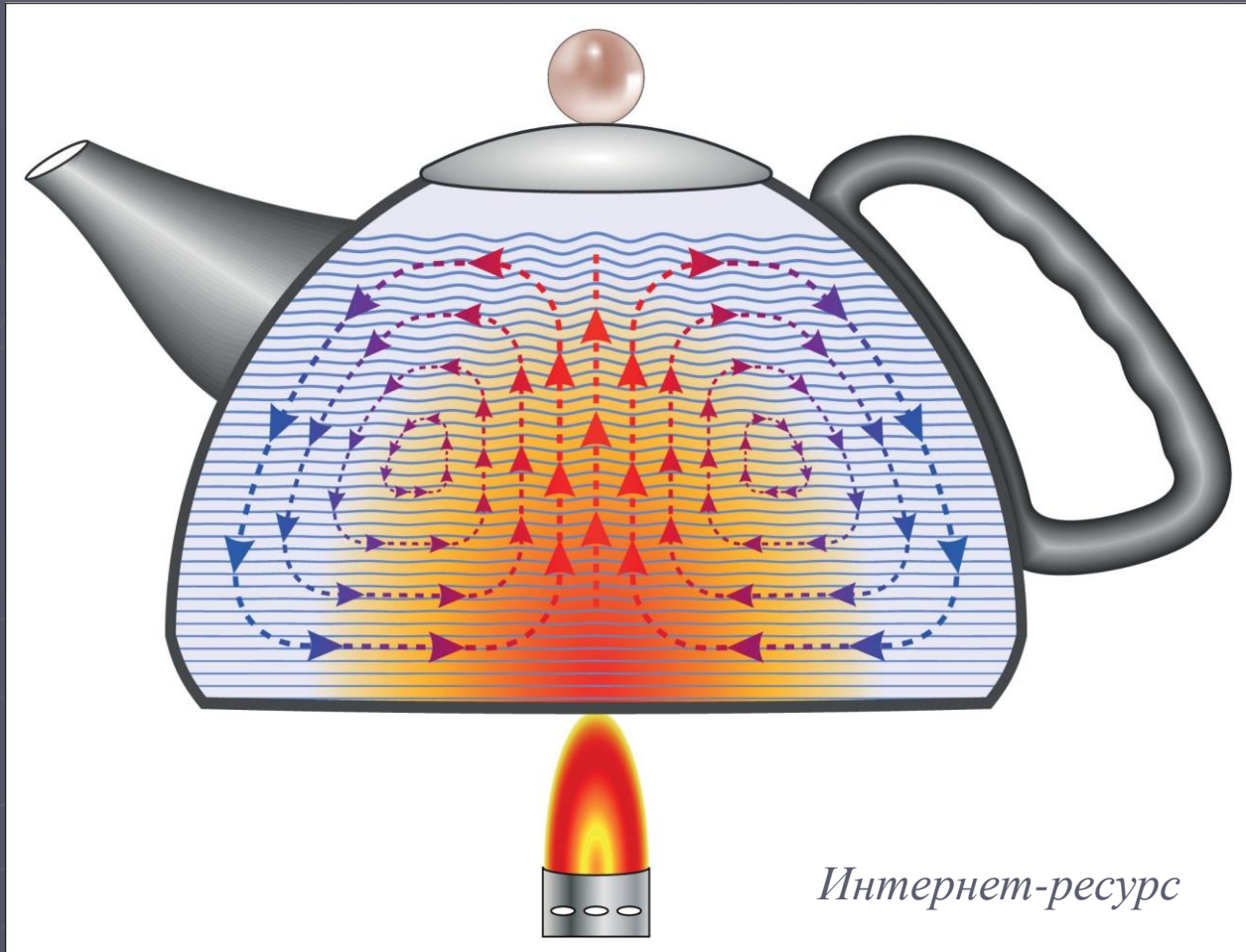
В сдвиговой зоне (рис.2) собраны образцы вулканитов, в которых зафиксированы эллипсоидальные пустоты (рис.3). как показали наблюдения, вне сдвиговой зоны эти объекты имеют правильную сферическую форму. Определить направление и амплитуду сдвига, показав продолжение дайки в сдвиговой зоне и к северу от нее.

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

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



(no [Dobretsov et al., 2001]).



Интернет-ресурс