

Экспериментальная тектоника

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

Лекция 5

**Влияние силы тяжести
на тектонические деформации:
Моделирование структур, связанных с
процессами гравитации**

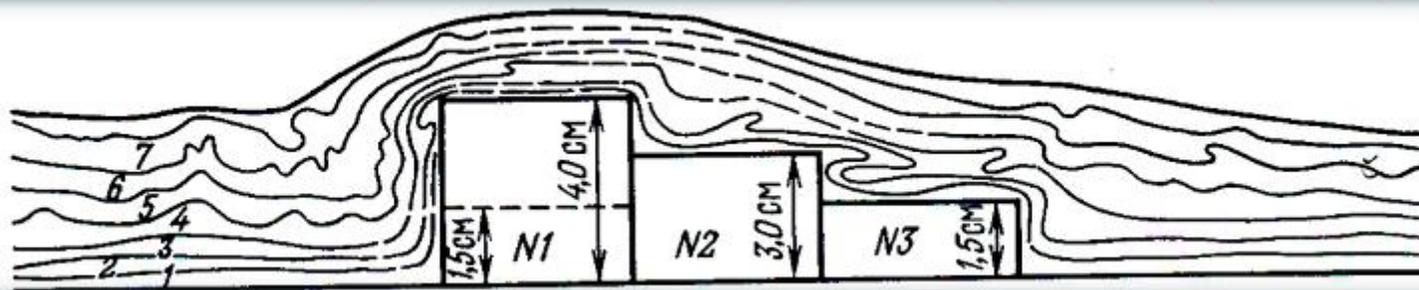
Парадокс влияния силы тяжести. Эта сила вертикальна, но ее эффект заключается в горизонтальных перемещениях тел. Например, кирпич на абсолютно горизонтальном льду неподвижен, а на слегка наклонном движется почти по горизонтали.

Первое проявление силы тяжести –
перемещение тел любых размеров вниз по склону.

Эксперименты, учитывающие гравитационный фактор

Гипотеза гравитационного сползания слоистых толщ по склонам тектонических поднятий, созданных глубинными процессами (Рейер, 1892-1894)

Воспроизведение гравитационной складчатости с помощью различных штампов

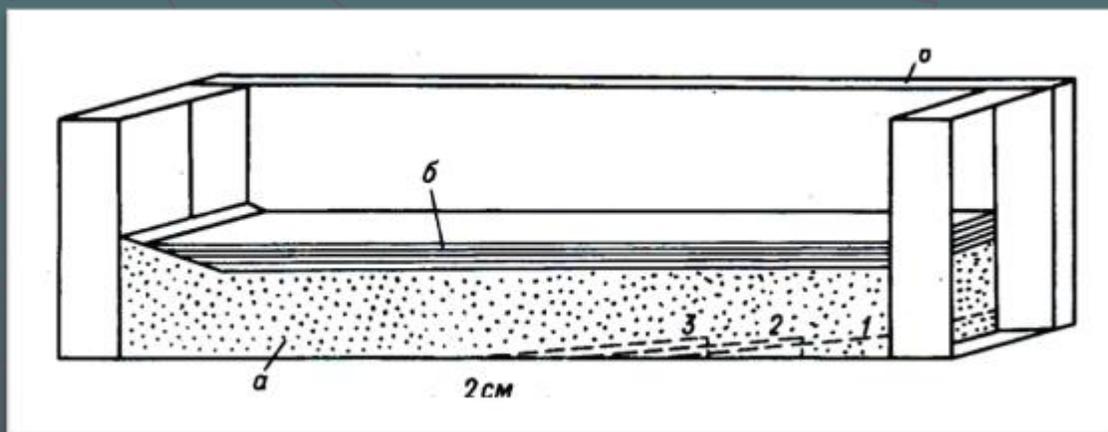


Складчатость, возникающая при течении слоистой толщи (канифоль с машинным маслом и глинистые промазки) по склонам поднятий, образованных жесткими штампами (Лебедева, 1966)

Под действием силы тяжести слоистая «толща» растекалась над штампами и сгруживалась на некотором удалении от них, сминаясь в складки. Если соседние штампы поднимались на разную высоту, то складки каскадом спускались по этим ступеням.

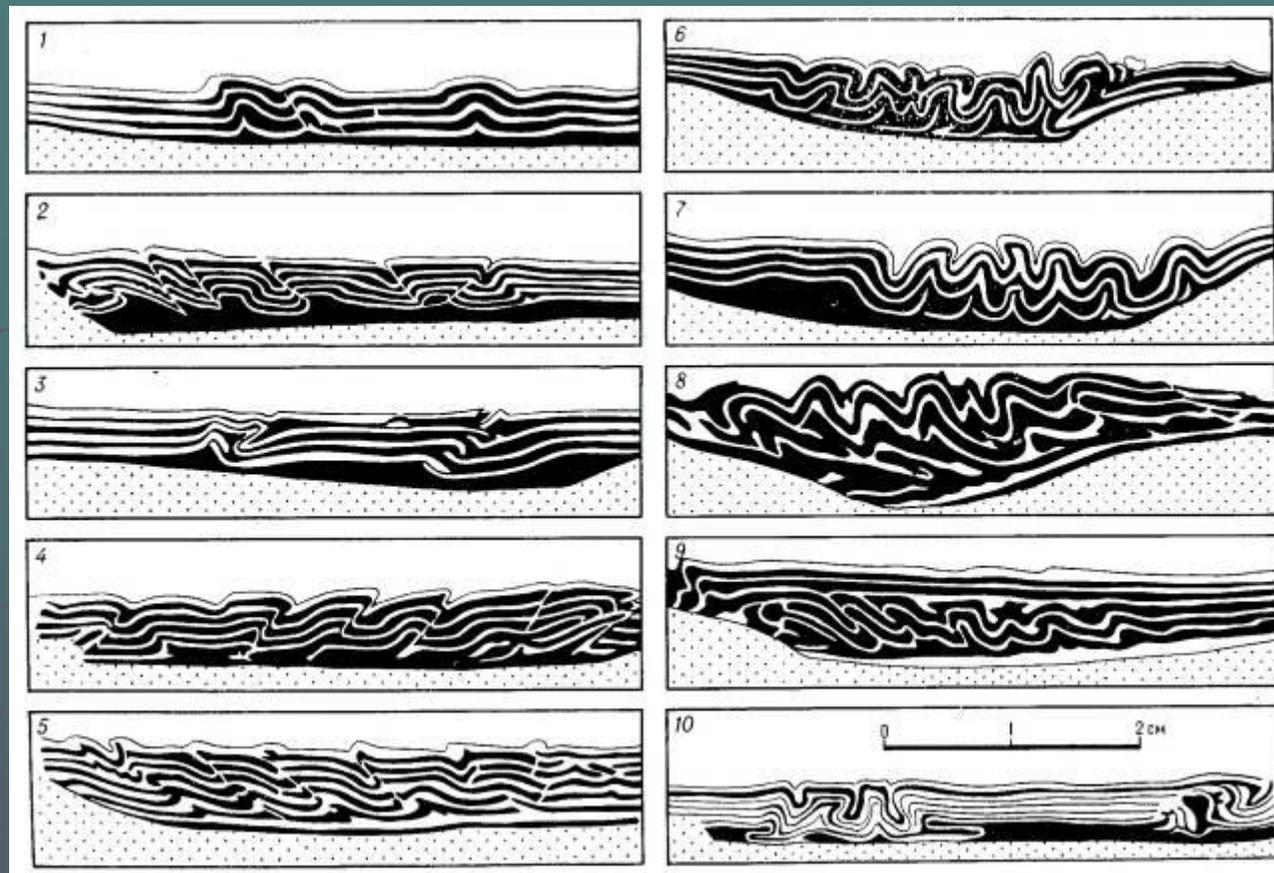
Гипотеза:– «орогеническая волна», распространяющаяся из центра геосинклинальной области к ее периферии
(Ж. Обуэн, 60-е годы прошлого века)

Эксперименты по воспроизведению гравитационной складчатости В.Г. Гутермана



«Фундамент» – пластилин.
«Чехол» – чередование более и менее вязких слоев (порошок целлюлозы, глина, смесь геля с графитом и целлюлозой; вазелин с маслом, гель с сахаром)

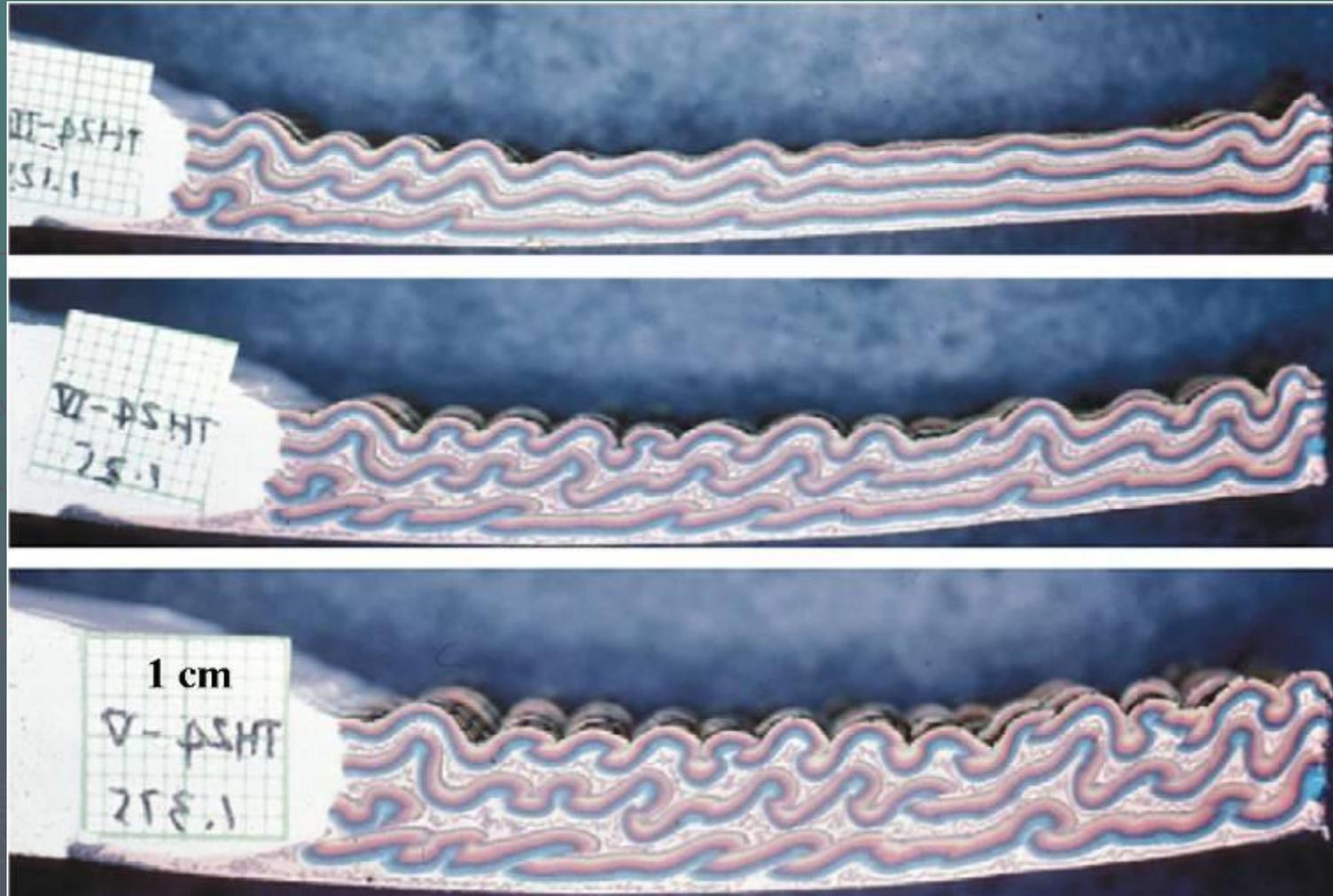
Для «усиления» поля тяжести была использована центрифуга
В основание модели постепенно вставлялись клинья, вызывавшие постепенное расширение зоны приподнятой поверхности образцов
(Гутерман, 1987)



(Гутерман, 1987)

Во всех эксперимента подобного рода не удавалось воспроизвести характерную особенность складчатых областей – наиболее интенсивную складчатость в центральной части таких областей

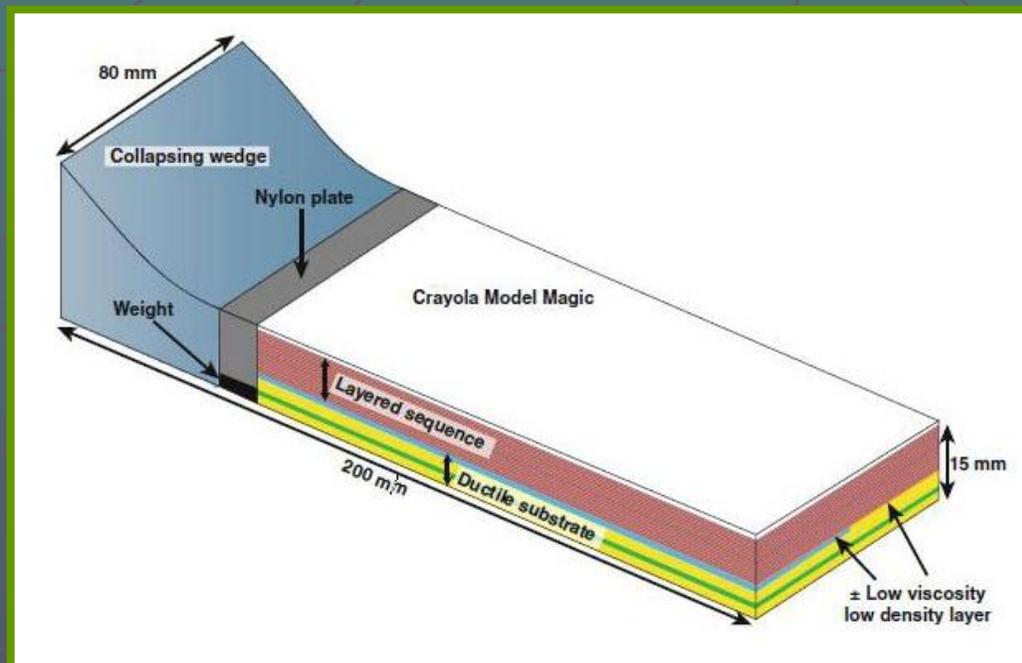
Сходные эксперименты, но в большой центрифуге



(Liu S., Dixon J.M., 1990)

Деформации, вызванные орогенным коллапсом. Моделирование в центрифуге

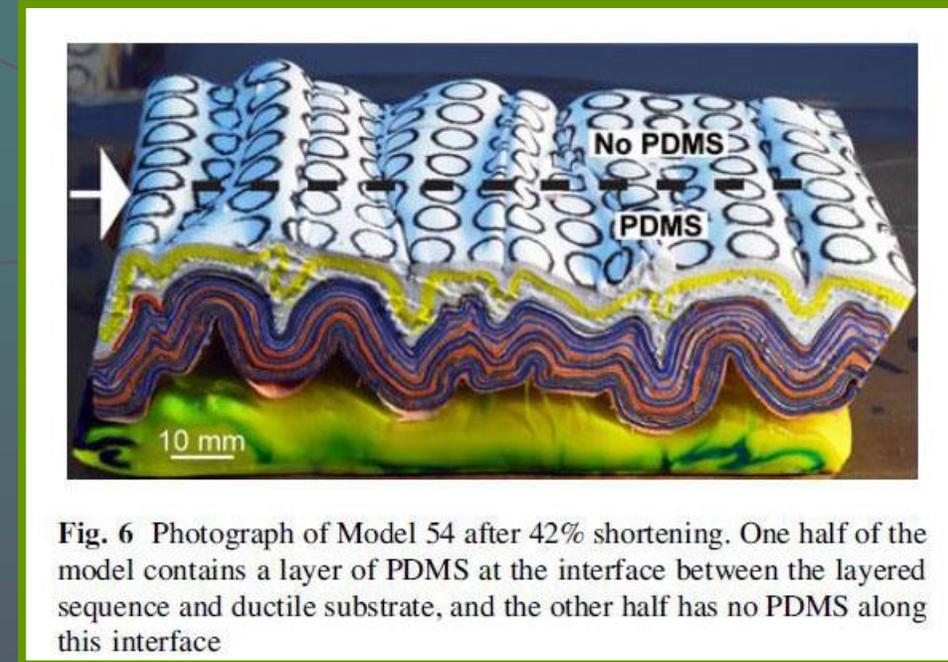
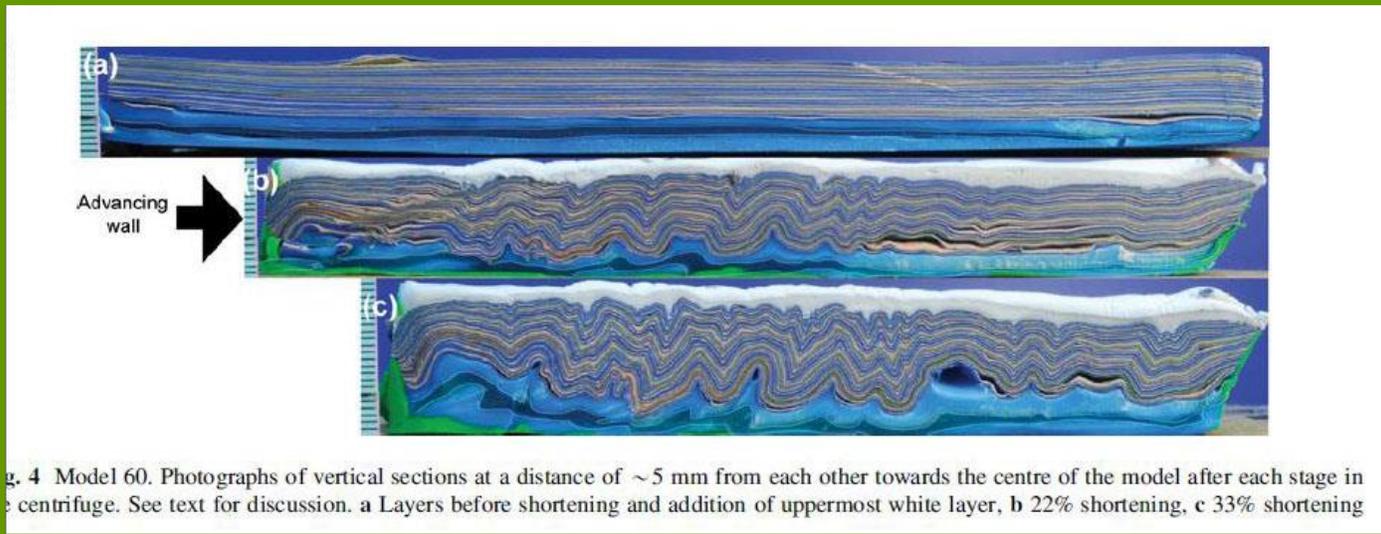
Слоистый образец помещен на основание с повышенной текучестью. Изучались стиль и строение активной складчатости чехла во время укорочения, параллельного слоям.



Конструкция аналоговой модели и ее вид до деформации. Клин, испытывающий коллапс, состоит из Dow Corning 3179 увеличивающейся в объеме смеси. Он передает усилие нейлоновой пластине с утяжелением внизу, которая используется для осуществления укорочения модели в центрифуге. Дополнительно маловязкий и плотный слой полидиметилсилоксана (PDMS) помещен на стыке слоистого чехла и текучего основания.

Результаты экспериментов на примере двух моделей

Движущая стенка.
В природе стенок нет.



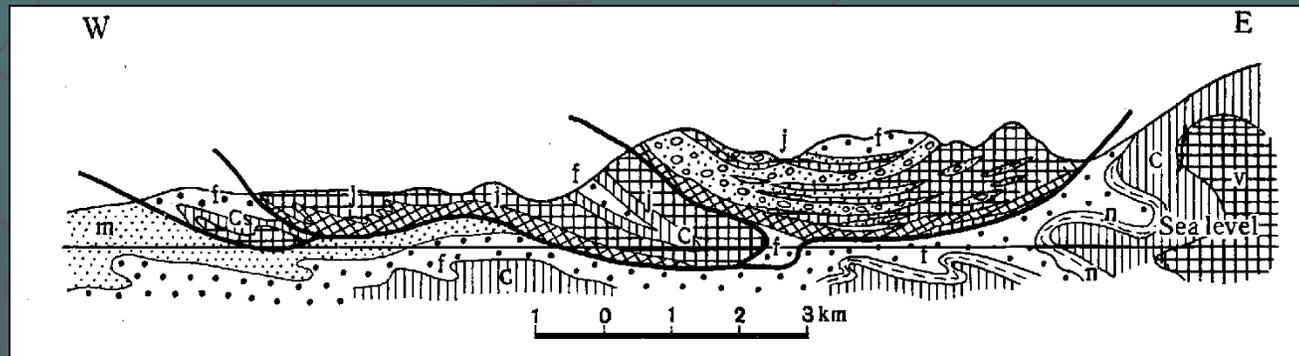
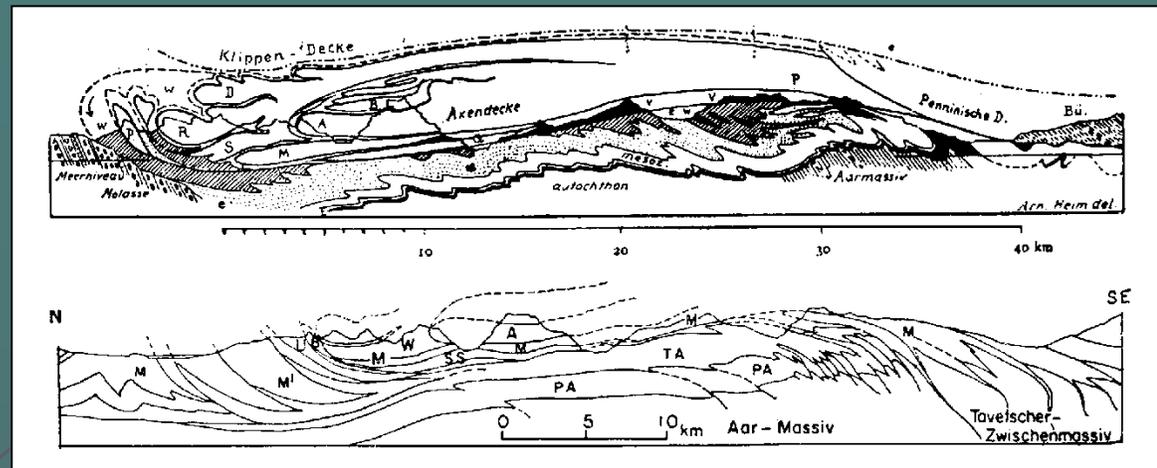
Гравитационные покровы



Схематические разрезы
Альп Гларуса.

Из Руттена, 1972.

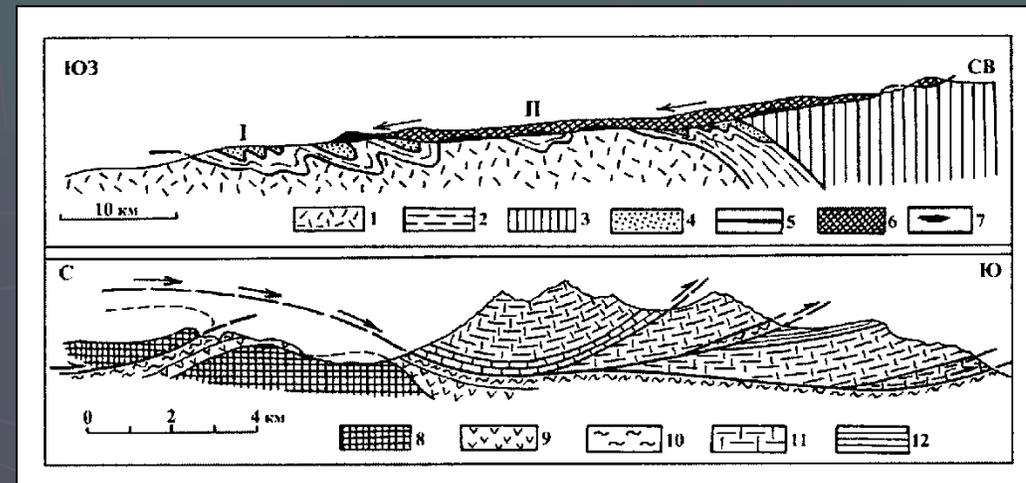
Покровы трактуются
как гравитационные



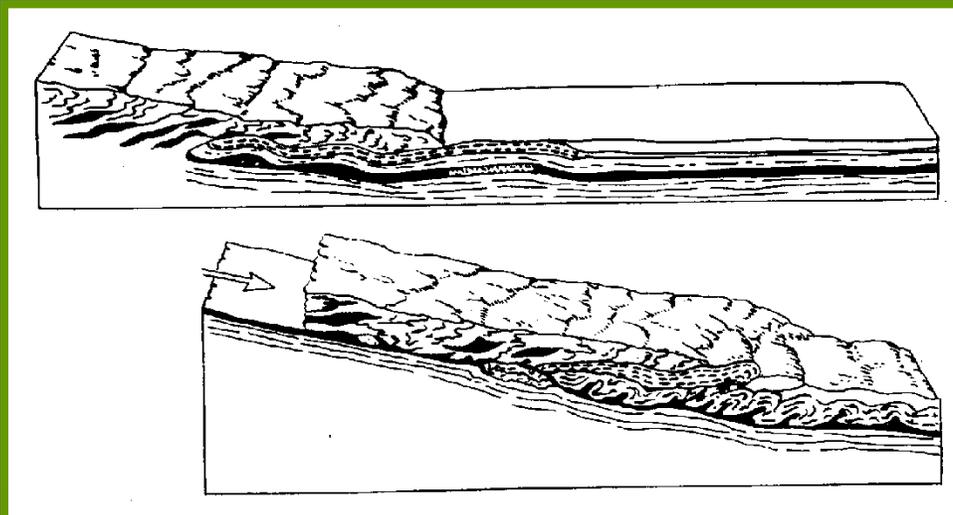
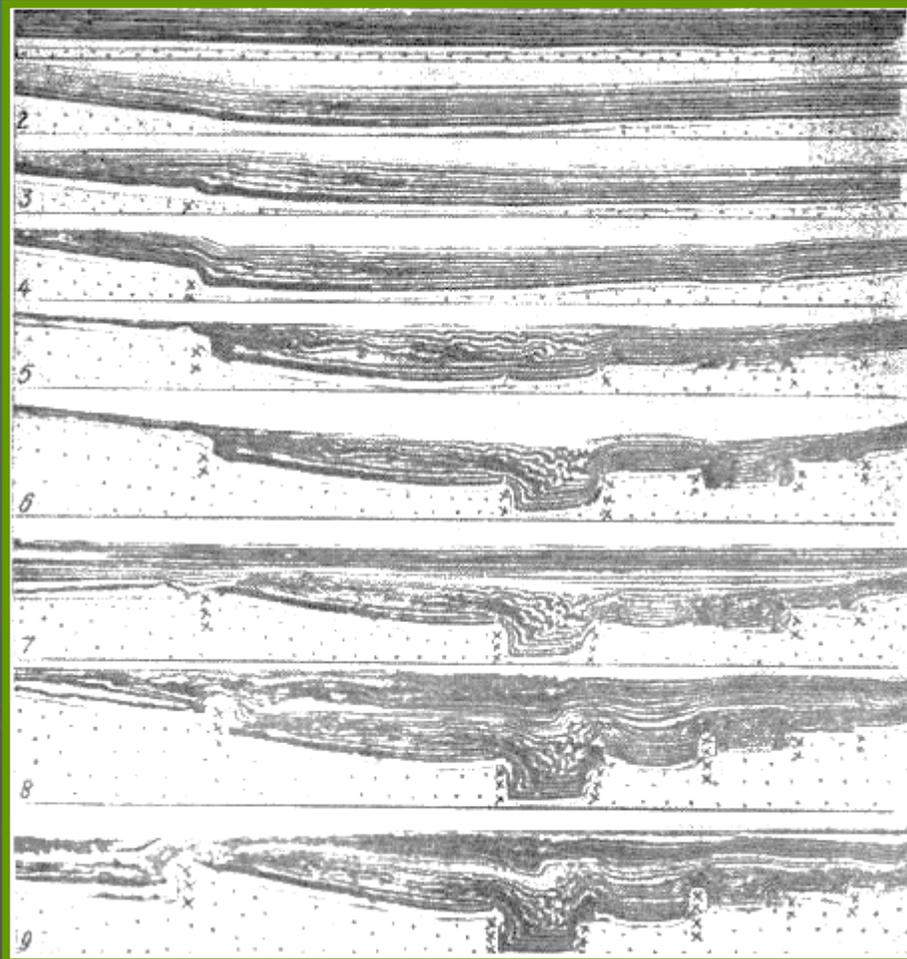
Гравитационный надвиг
во внешней зоне Савойских
Альп. *Белюсов, 1968*

Гравитационные шарьяжи:
а – Амбрюне-Юбей во Французских
Альпах, б – Гринья в Южных
Альпах Ломбардии.

Из Хаин, Ломизе, 2005



Схематическое представление
о гравитационной тектонике
на поперечном разрезе Апеннин.
Из Спенсера, 1981



Аналоговое моделирование гравитационных покровов

Эксперименты В.Г. Гутермана.
За основу взято представление
о складчатости таврической серии
Крыма. *(Гутерман, 1993)*

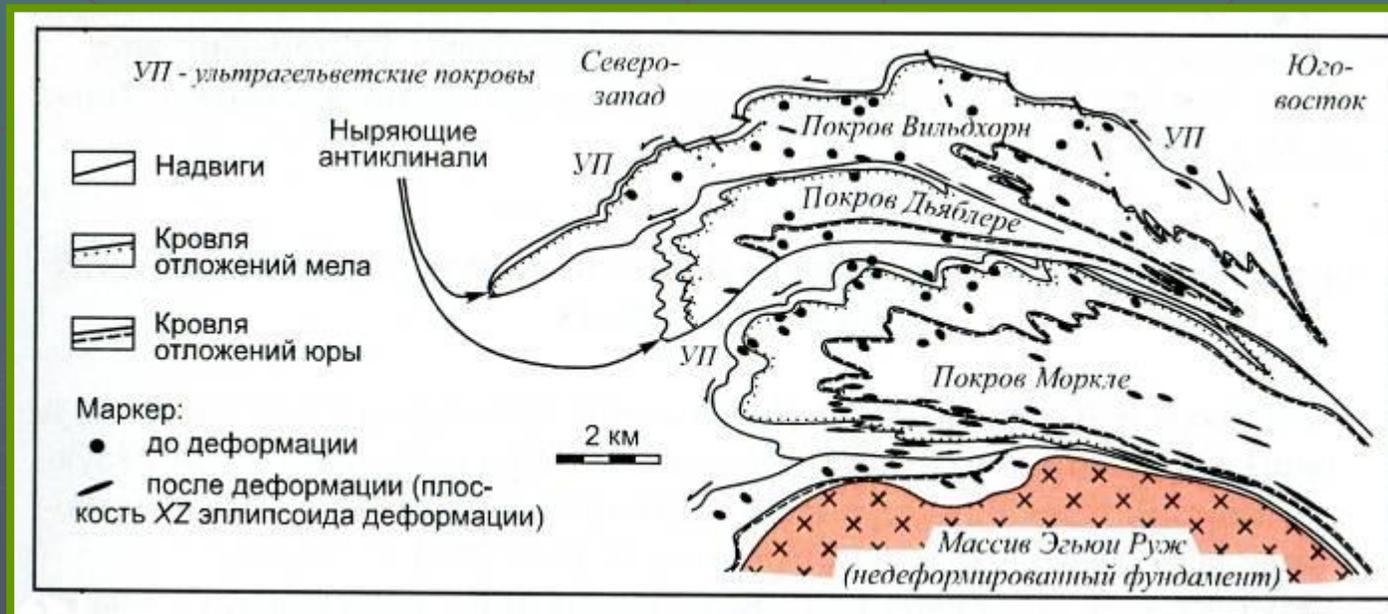
Формирование склона, с которого соскальзывают покровы, связывали с вертикальными движениями земной коры, которые могли быть обусловлены, например, космическим фактором (Харман). А Ван Беммелен предполагал подъем коры вследствие физико-химических преобразований в мантии.

Существовала и такая точка зрения (Хизен и Дрейк), что гравитационный потенциал в процессе скольжения создается благодаря подводному континентальному склону, с которого происходило общее оползание всей неконсолидированной массы и возникали мутьевые потоки.

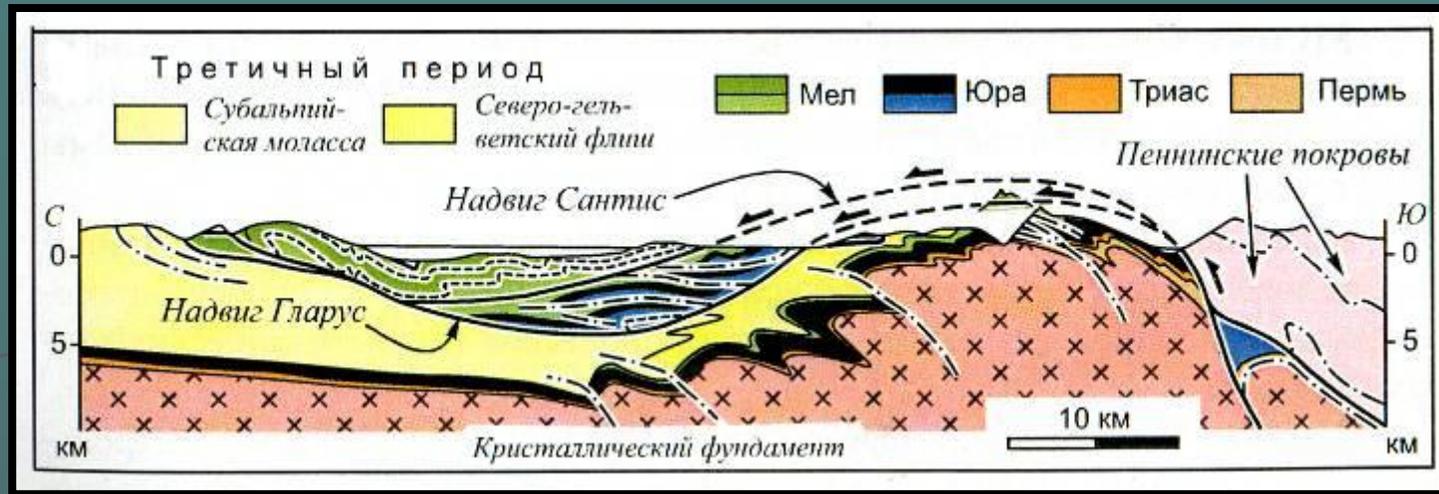
Могли ли формироваться огромные покровы с помощью такого механизма – это вопрос, а вот что существует складчатость подводного оползания – это факт.

Еще немного о «гравитационных» покровах

- ▶ В 1980-х гг. для Гельветских покровов были получены данные о геометрии складок, значительном увеличении деформации от верха покрова к его подошве и ориентировке эллипсоида конечной деформации (показано на рис.) В ансамбле Гельветских покровов был выявлен температурный градиент: пластические деформации в подошве ансамбля протекали при температуре 380°C , а в верхней части ансамбля — 180°C .



Разрез через Гельветские покровы *no Ramsay, 1981*



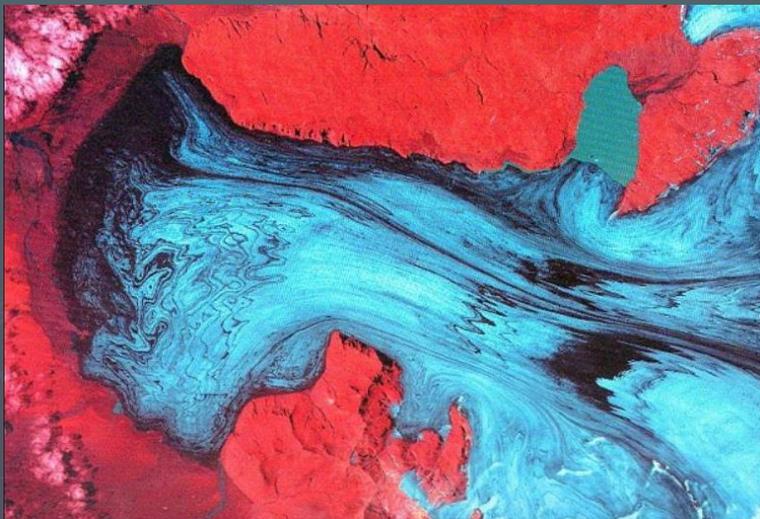
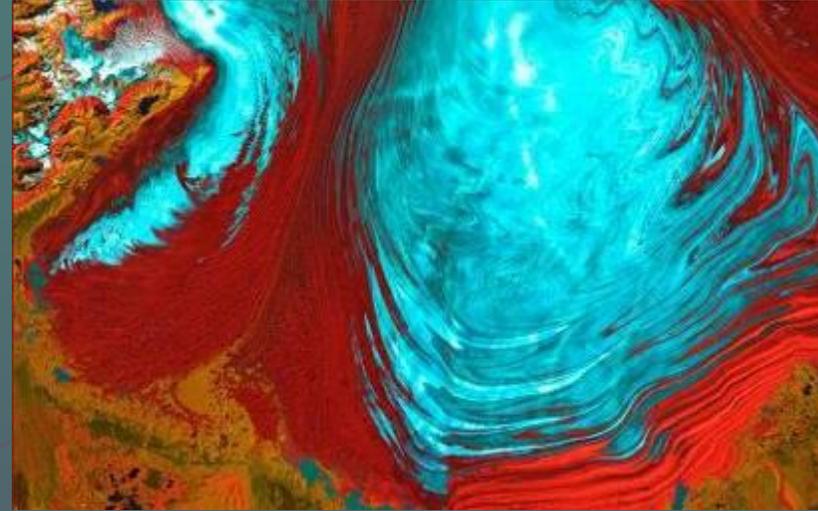
Разрез через Гельветские покровы по *Pfifner, 2005*

В настоящее время Гельветские покровы рассматриваются как компоненты крупной и сложно построенной шарьяжной пластины, которая сформировалась вследствие выдавливания осадочных комплексов из корневой зоны и перемещением к северу на расстояние первые десятки километров.

Это напоминает две ветви конвективной ячейки

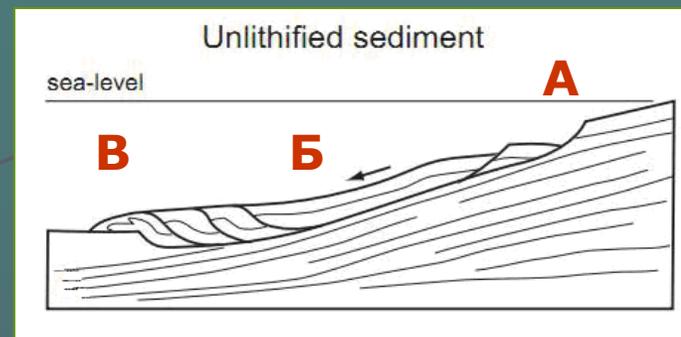
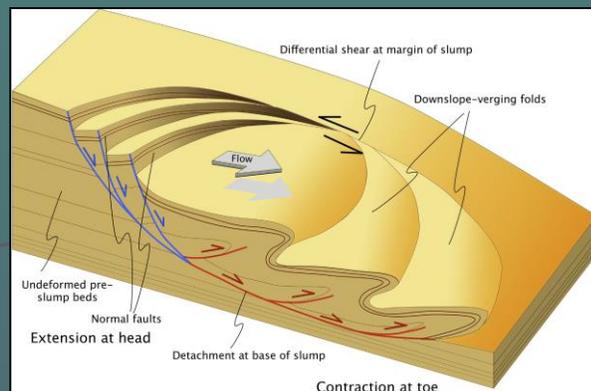
В экспериментах с гравитационным сползанием по склонам не было получено структур, сходных с природными складчатыми зонами (за исключением, отчасти, опытов В.Г. Гутермана)

А вот здесь гравитационное скольжение реально осуществляется.
По склону ползут рыхлые породы и глетчерный лед.
Это происходит на суше. Существует оползание и с подводных склонов



Интернет-ресурс

Слампы: схема и природный пример



Слампы в поперечном разрезе. Схема.

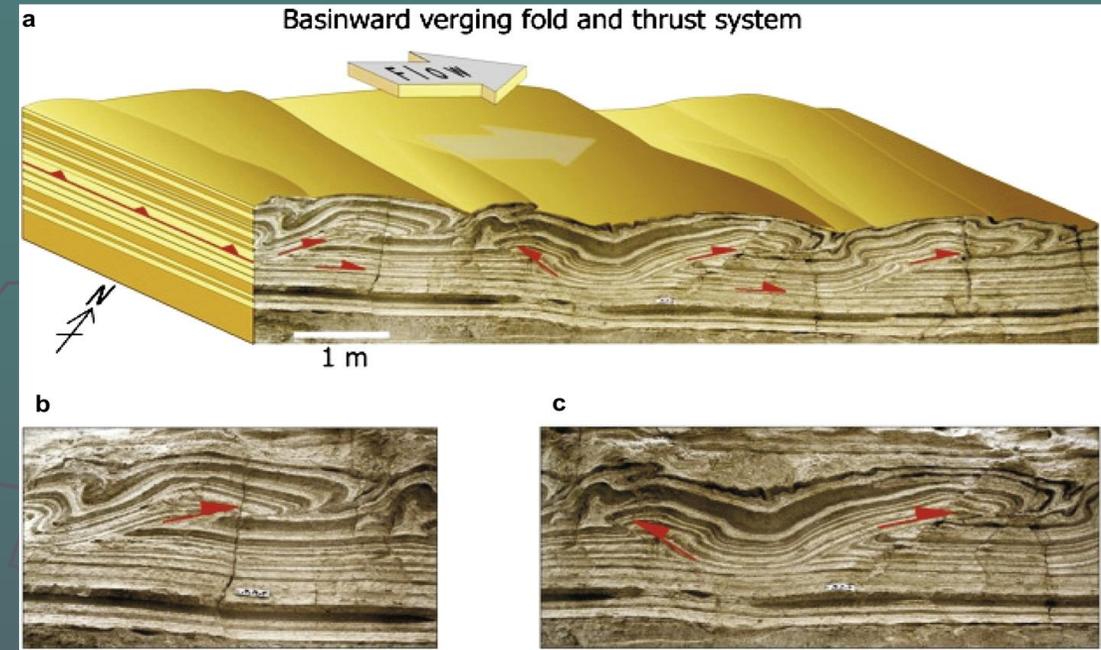
А – зона растяжения. Б – зона сочетания горизонтального сжатия с горизонтальным сдвигом в горизонтальной плоскости (скашиванием). Скашивание преобладает. В – зона сочетания горизонтального сжатия со скашиванием. Сжатие преобладает



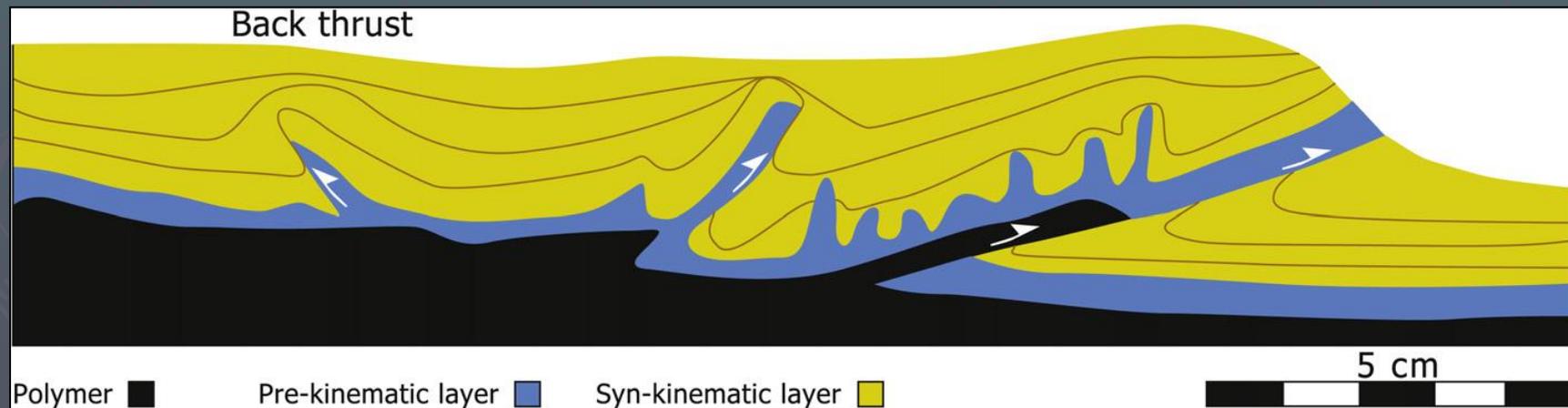
Природные складки в нижней части слампа.
Мертвое море

по (Alsop, Marco, 2011, 2013)

Аналоговое моделирование сламповой складчатости

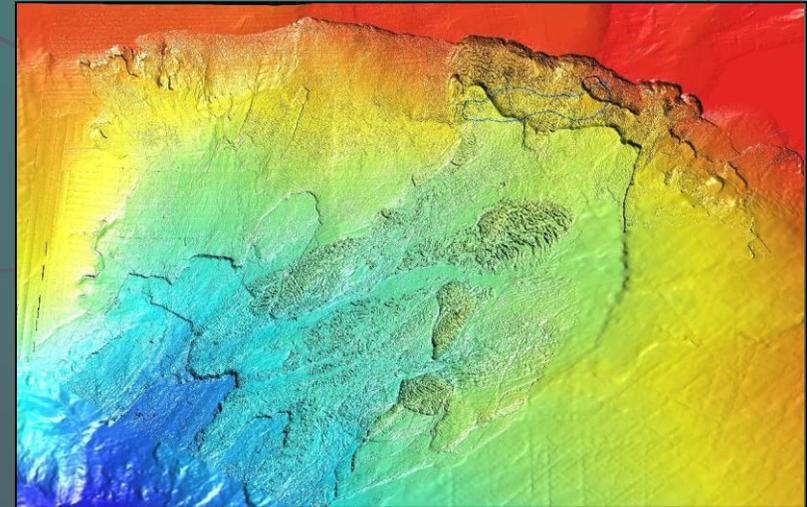
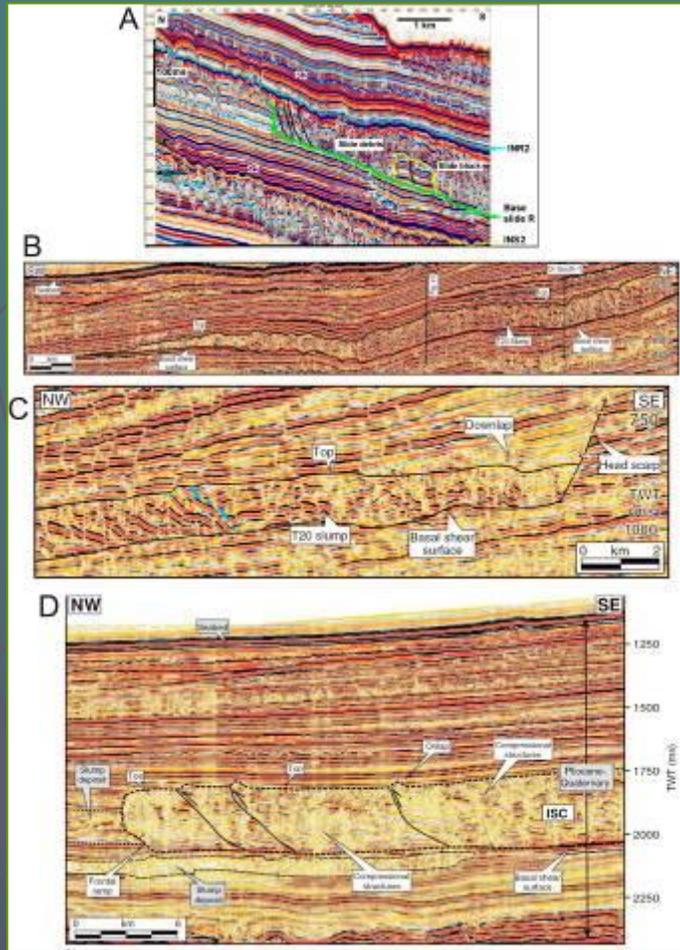


(Alsop, Marco, 2011)



analogue experiment of Xavier Fort

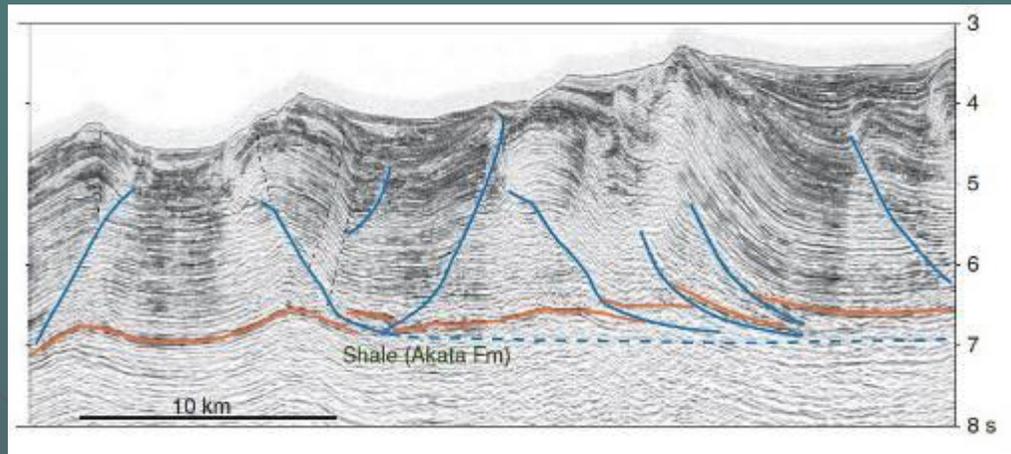
Существуют и крупные оползневые потоки с фрагментами складчато-надвигового строения. Они обнаружены на пассивных окраинах, в дельтах крупных рек и других местах



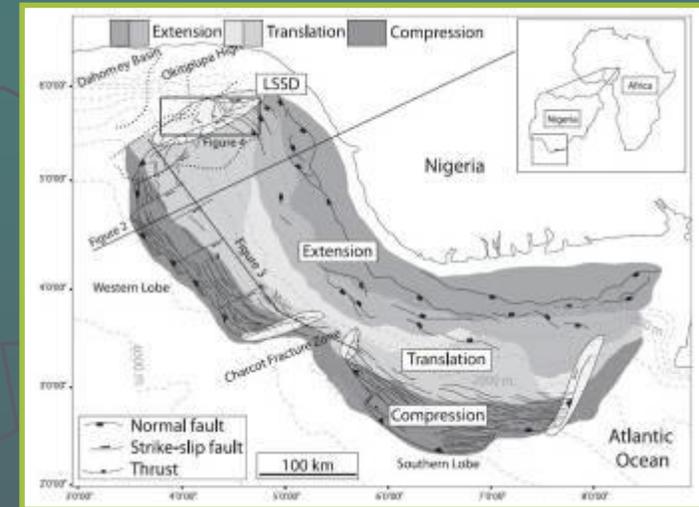
Топография дна с крупным оползневым потоком Сторегга на пассивной континентальной окраине Норвегии. Топография склона (*Kvalstad et al., 2005*)

А - фрагмент профиля для района оползневых потоков Сторегга на континентальном склоне Норвегии. Это верхняя часть склона, для которого характерно оползание и сопутствующее растяжение (*Solheim et al., 2005*). В, С, D – фрагменты профилей для континентального склона Средиземного моря в Израиле (*Frey-Martinez et al., 2006*). Хорошо видны оползневые потоки (slumps), на “D” четко видны взбросы и структуры сжатия.

Крупные структуры, связанные с гравитационным скольжением



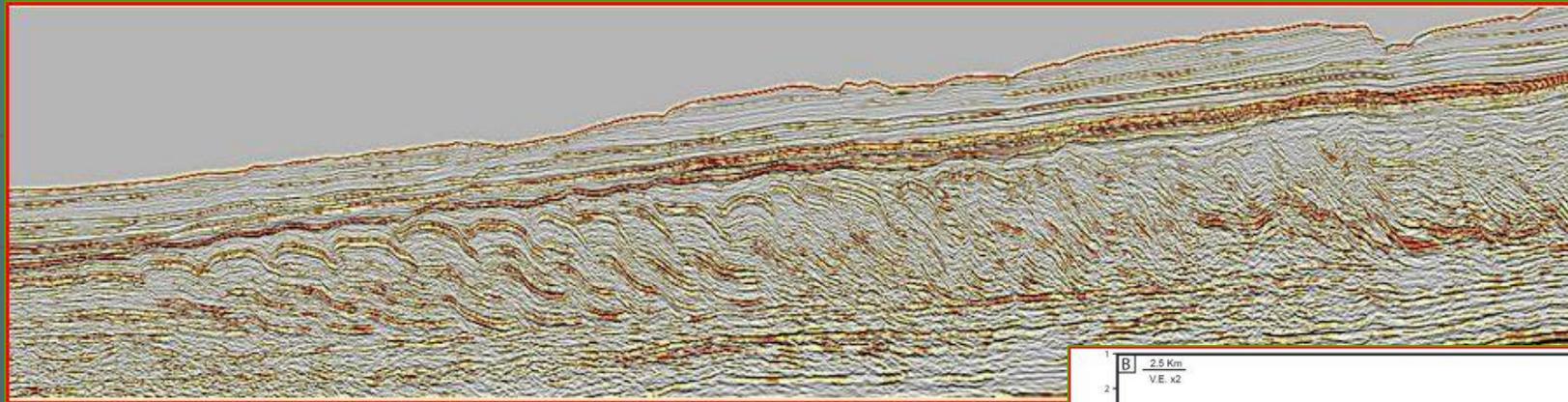
Пример структур сжатия в нижней фронтальной части дельты Нигера, сформированных посредством гравитационного давления верхних частей склона дельты. Данные 3-D сейсморазведки (Fossen, 2011)



Морская дельта Нигера с выделенными структурными областями (Leduc et al., 2011)

Таким образом, структурообразование под воздействием сил гравитации все же происходит и иногда в крупных масштабах

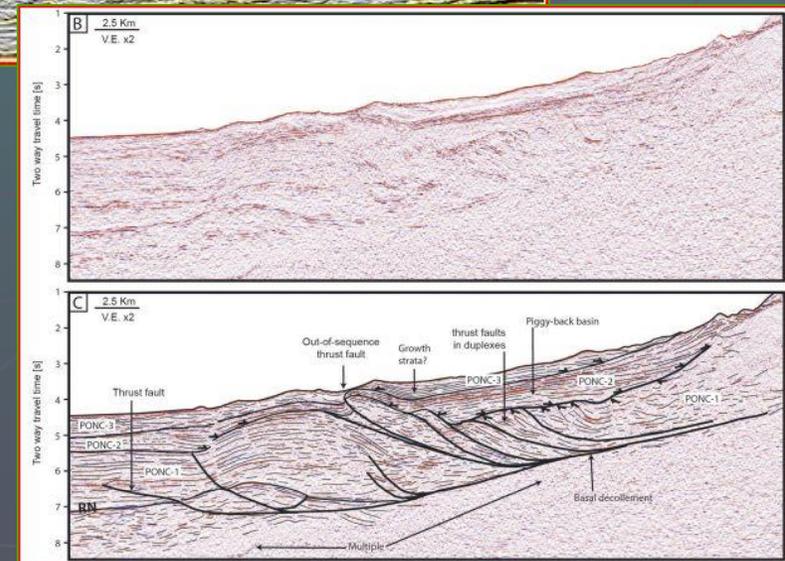
Подводные складчато-надвиговые комплексы, сформированные в результате подводного оползания



Намибия

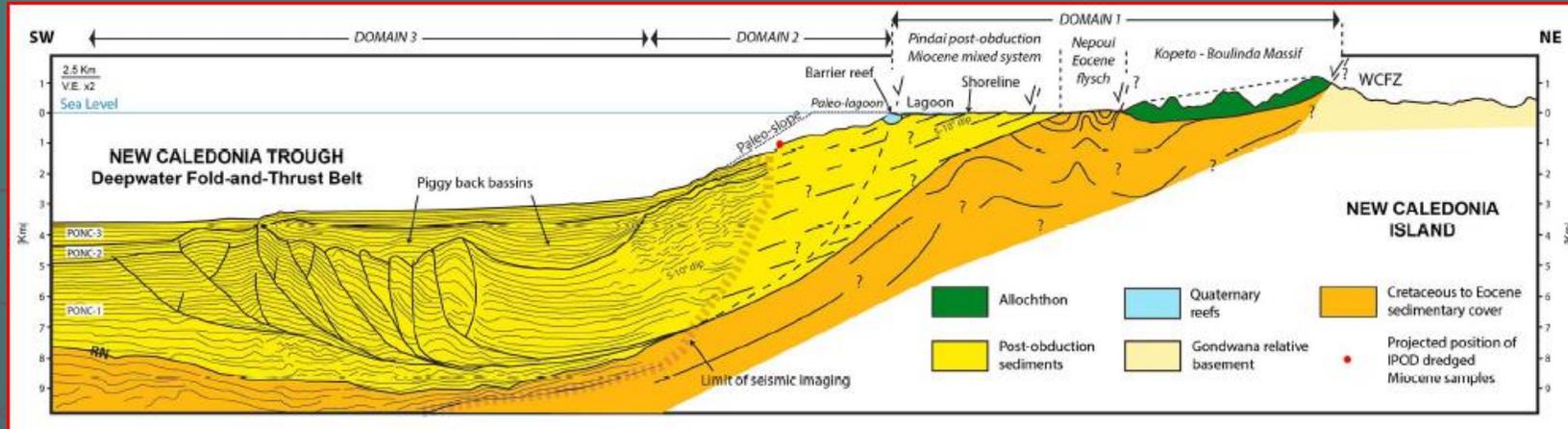


Deepwater fold and thrust belt classification, tectonics, structure and hydrocarbon prospectivity_ A review - ScienceDirect_files

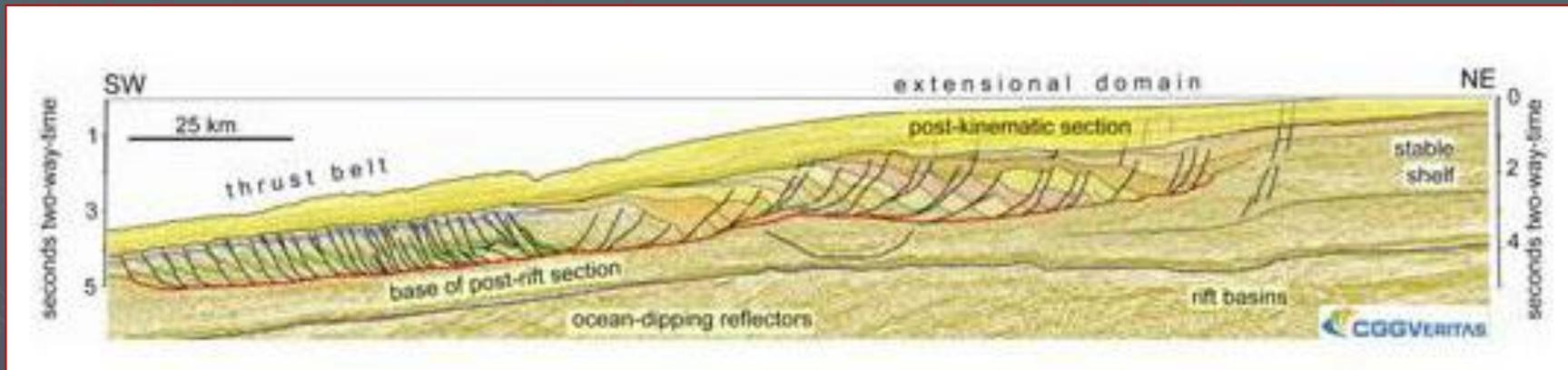


Новая Каледония (Collot et al., 2017)

Еще примеры структурообразования на подводных склонах

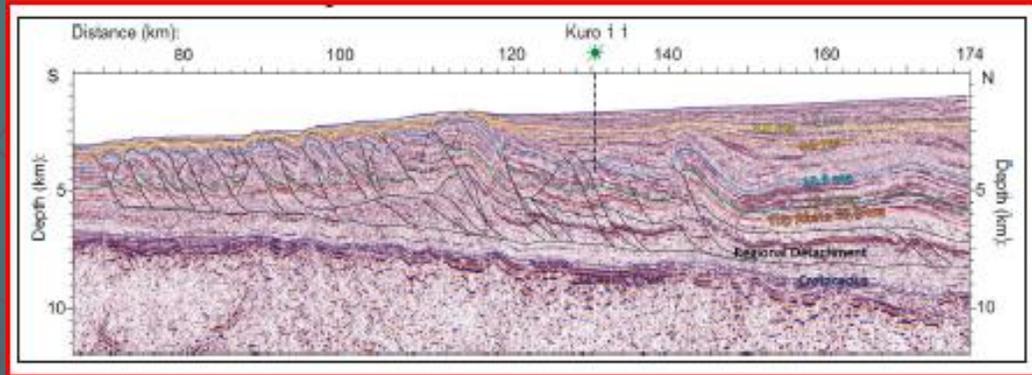


Новая Каледония (Collot et al., 2017)

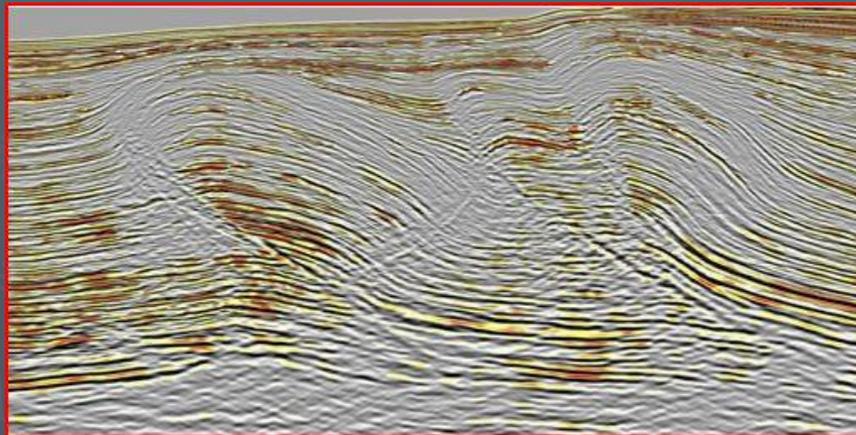


Такие структуры (слампы) могут иметь размеры в первые сотни километров

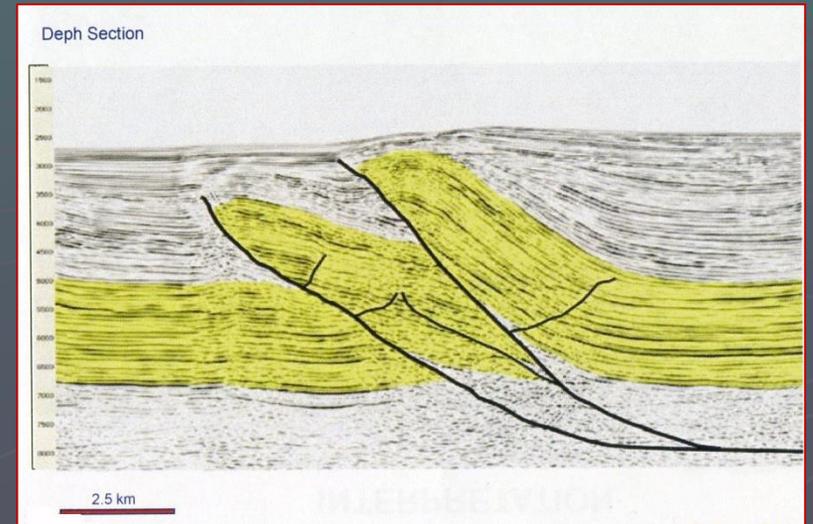
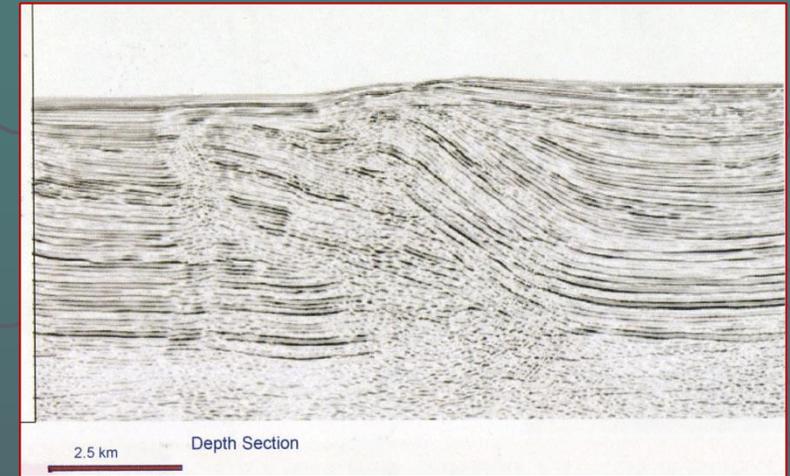
Складки, осложненные взбросами во фронтальных частях крупных слампов (чешуйчатые веера) (*fold and thrust belts подводных склонов*)



Нигерия

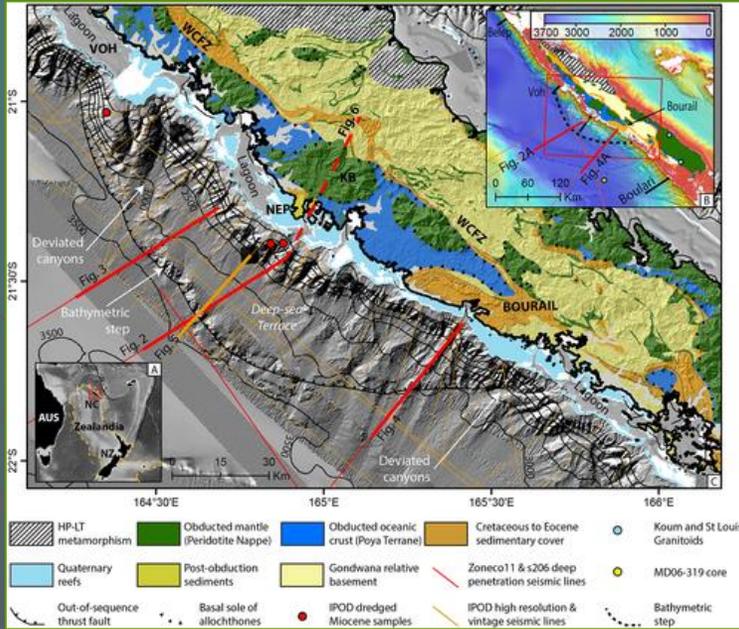
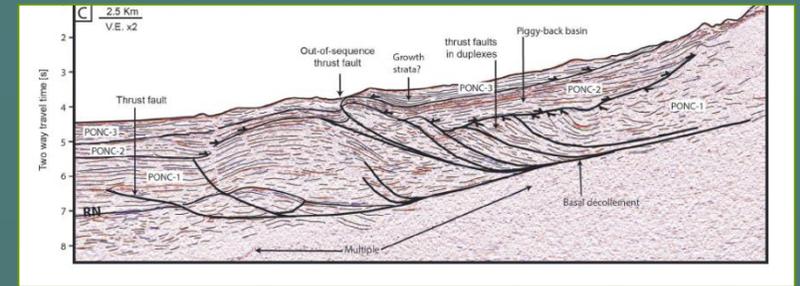


Намибия



Нигерия

Пример интерпретации структурообразования на подводной окраине Новой Каледонии



Батиметрическая и геологическая карта Новой Каледонии

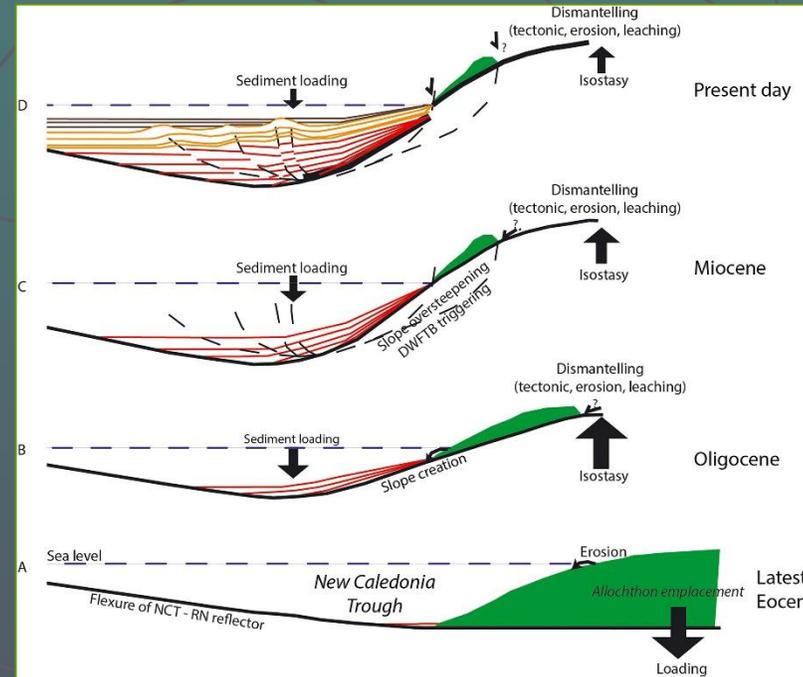
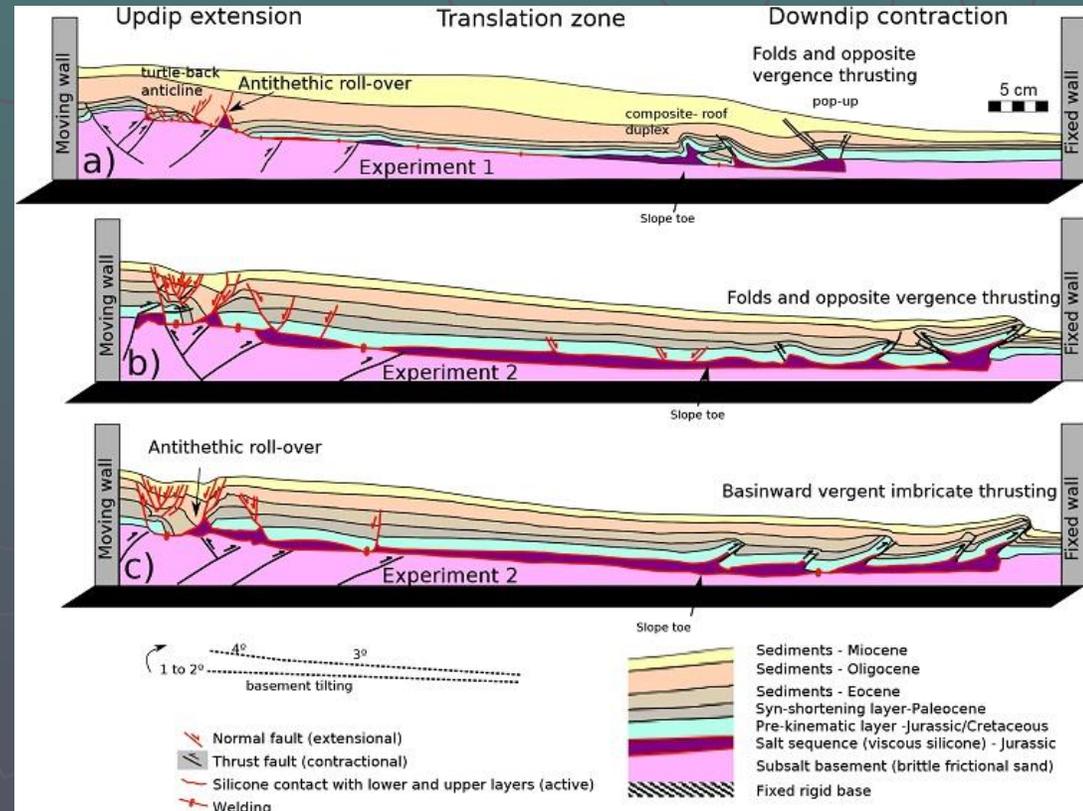
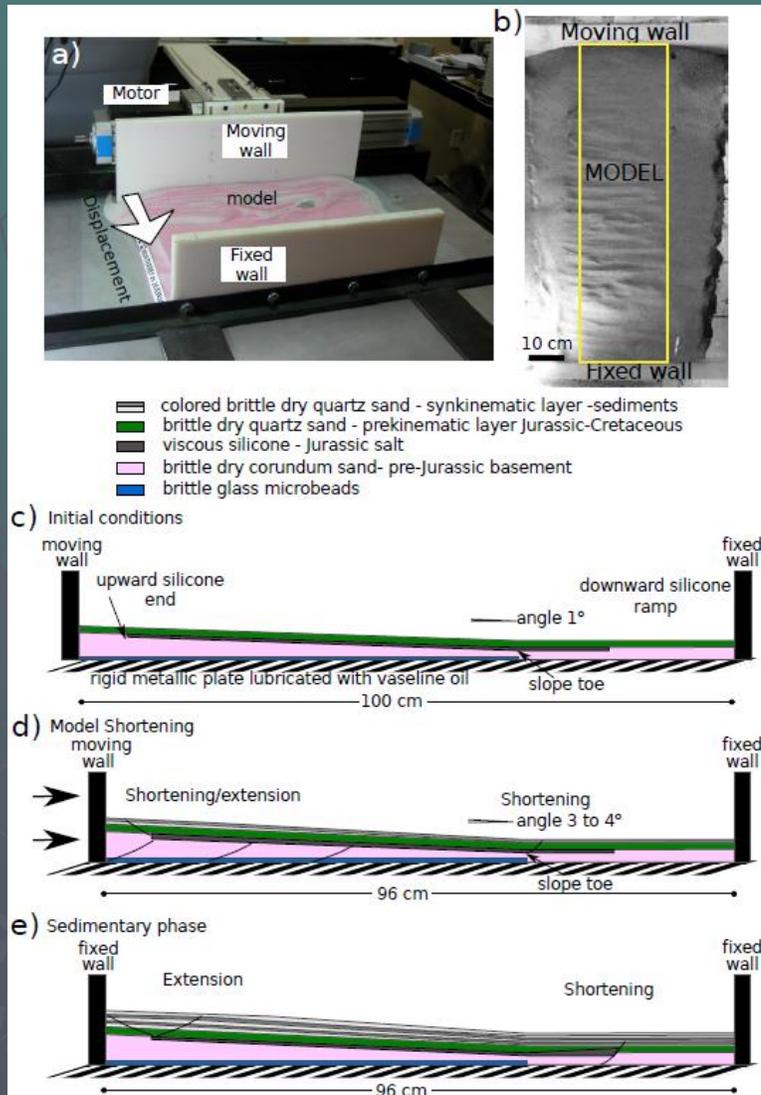


Схема эволюции западной подводной окраины Новой Каледонии

(Collot et al., 2017)

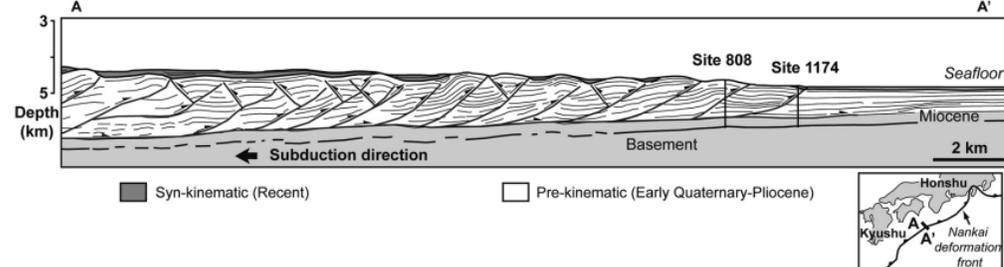
Пример аналогового моделирования

Analogue model of gravity driven deformation in the salt tectonics zone of northeastern Mexico.
Diego Gracia-Marroquín et al., 2017

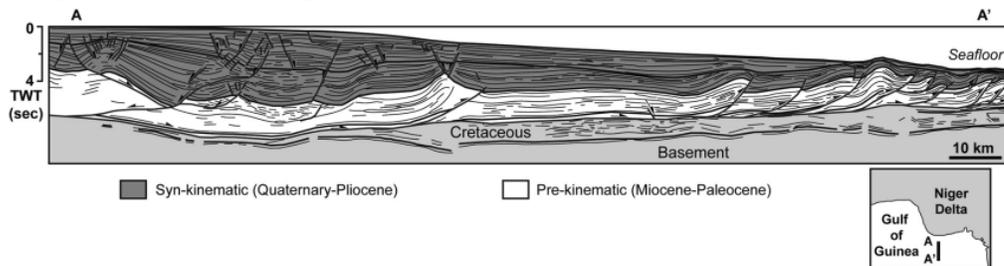


Аналоговое физическое моделирование ПОДВОДНЫХ складчато-надвиговых структур

a Front of Nankai accretionary prism, offshore Japan (low syn-kinematic sedimentation case)



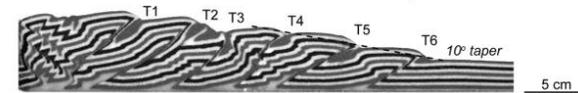
b Niger Delta, Gulf of Guinea (high syn-kinematic sedimentation case)



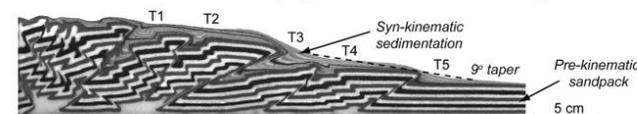
Analogue modelling of deepwater fold and thrust belts: dynamic interactions with **syntectonic sedimentation**

Wu, McClay, Despinis et al., 2010

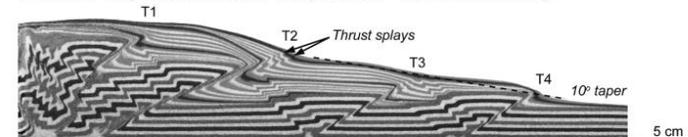
a Model 1 - No sedimentation - 50.2 cm shortening



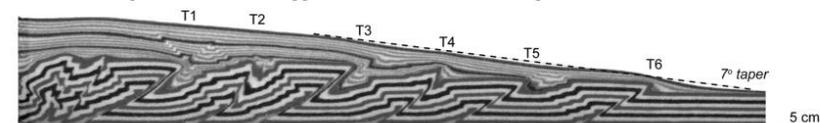
b Model 2 - Low sedimentation - progradation - 49.2 cm shortening



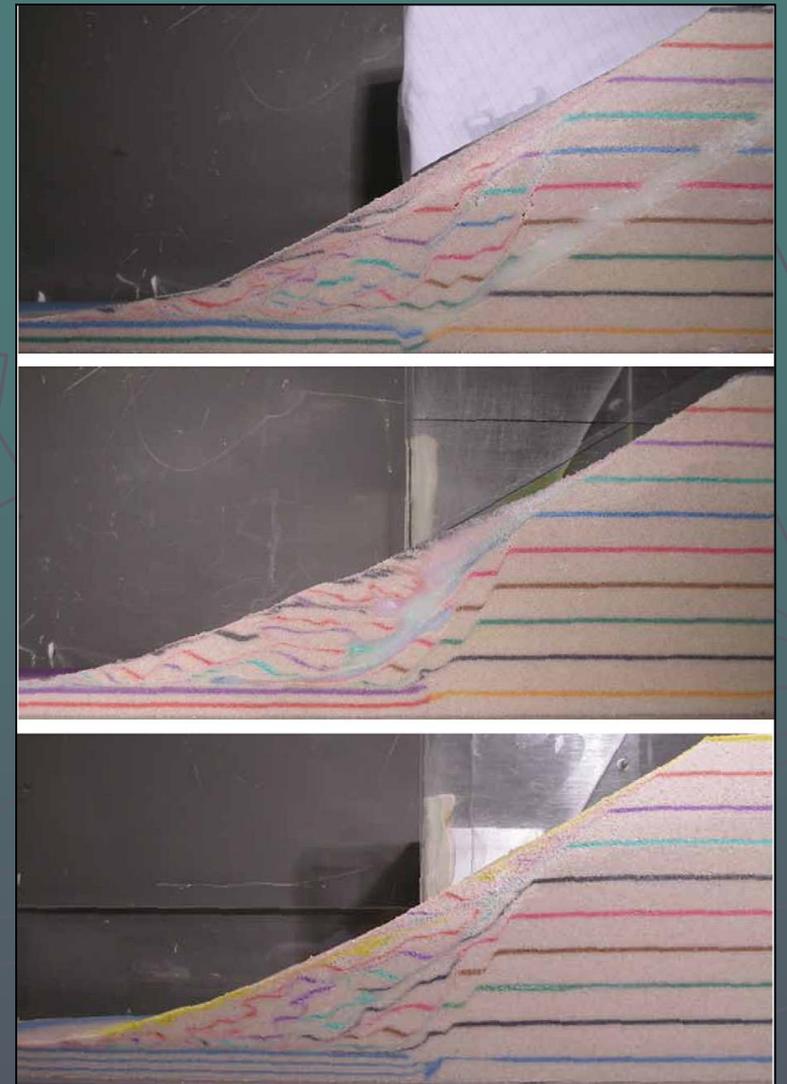
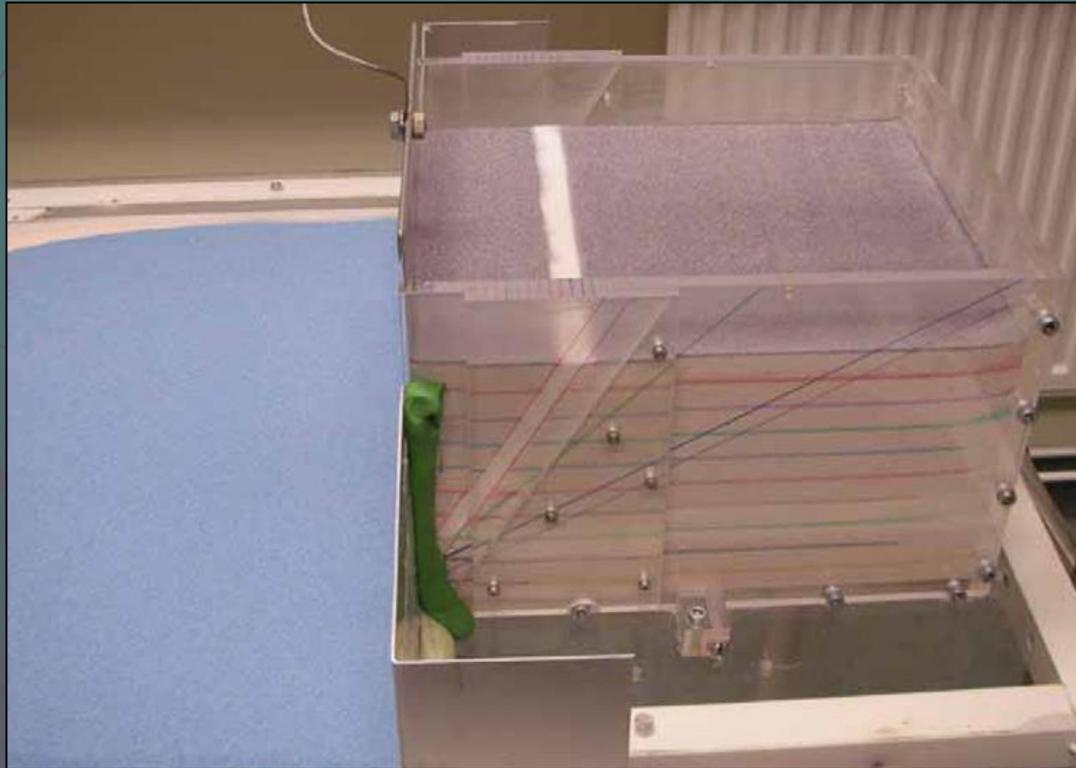
c Model 3 - High sedimentation - progradation - 41.2 cm shortening



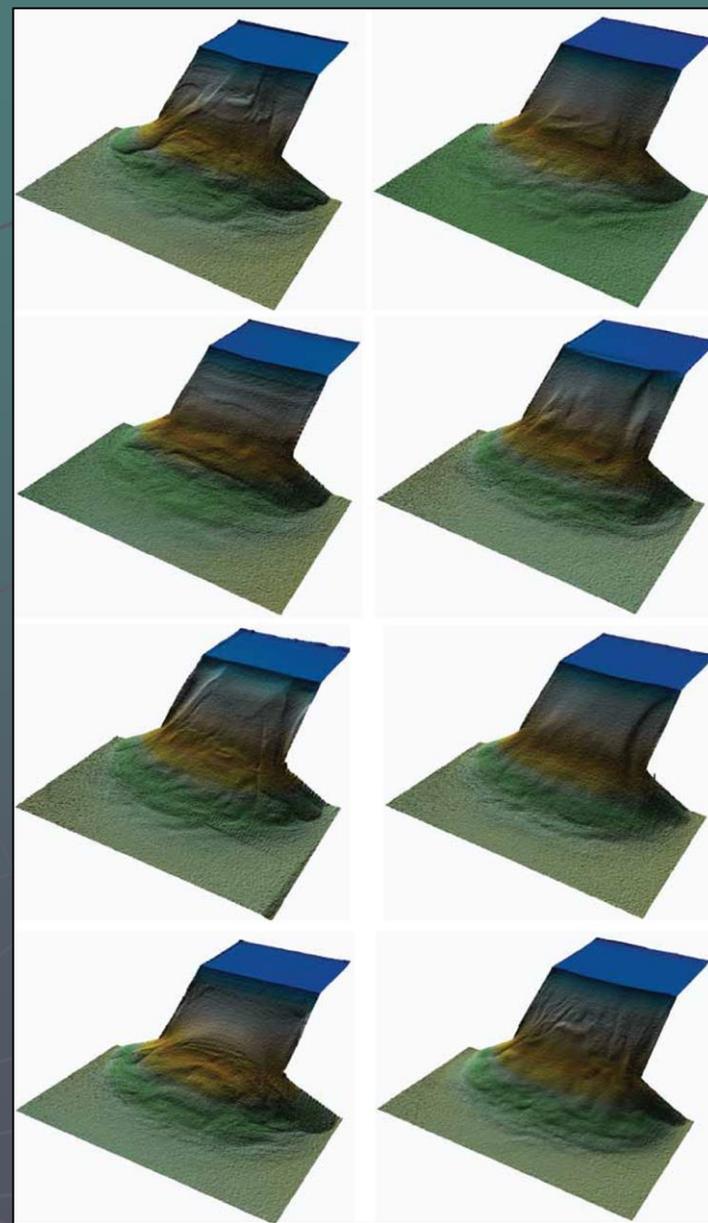
d Model 4 - High sedimentation - aggradation - 41.2 cm shortening



Пример моделирования гравитационных процессов на склонах



Аналоговое моделирование обрушения не гомогенизированного гранулированного склона вдоль ослабленного горизонта. *Liu&Koyi, 2014*



Тот же опыт

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.

Локальная инверсии плотности

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

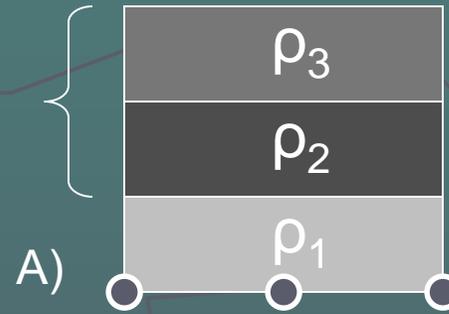
Б) **Исходное реальное состояние:** неустойчивое равновесие. Разное литостатическое давление из-за неровностей на границе толщ. Зарождение купола

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

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

○ → Литостатическое давление

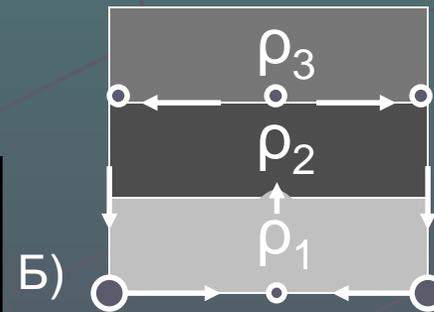
$\rho_2 \gg \rho_3$
Гравитационное равновесие



$$\rho_2 > \rho_1$$

Гравитационное неравновесие

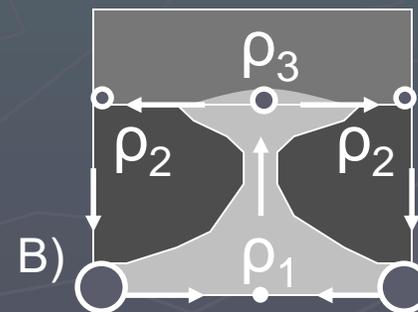
Из физики известно, что жидкость перетекает из области повышенного в область пониженного давления. Относительное давление отражено величиной кружков



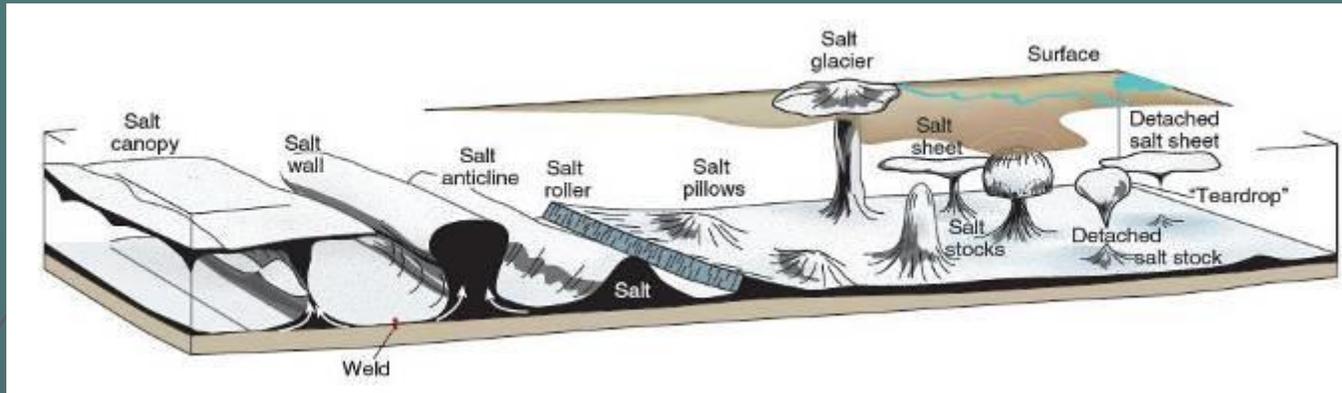
Ведущая сила этого процесса – сила тяжести

$$\rho_1 > \rho_3$$

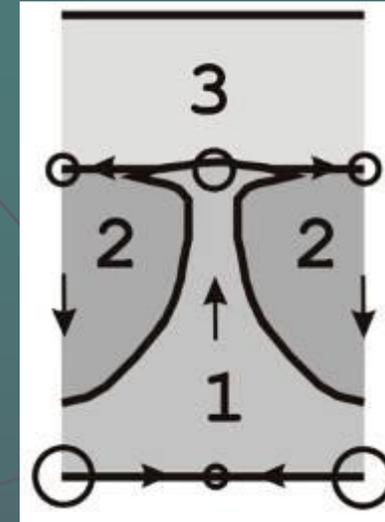
Гравитационное равновесие



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 растет поднятие и углубляются впадины, что еще больше увеличивает разность давлений).

$2,2 \text{ г/см}^3 \approx \rho_1 > \rho_0 \approx 2,0 \text{ г/см}^3$ (верхняя терригенная толща).

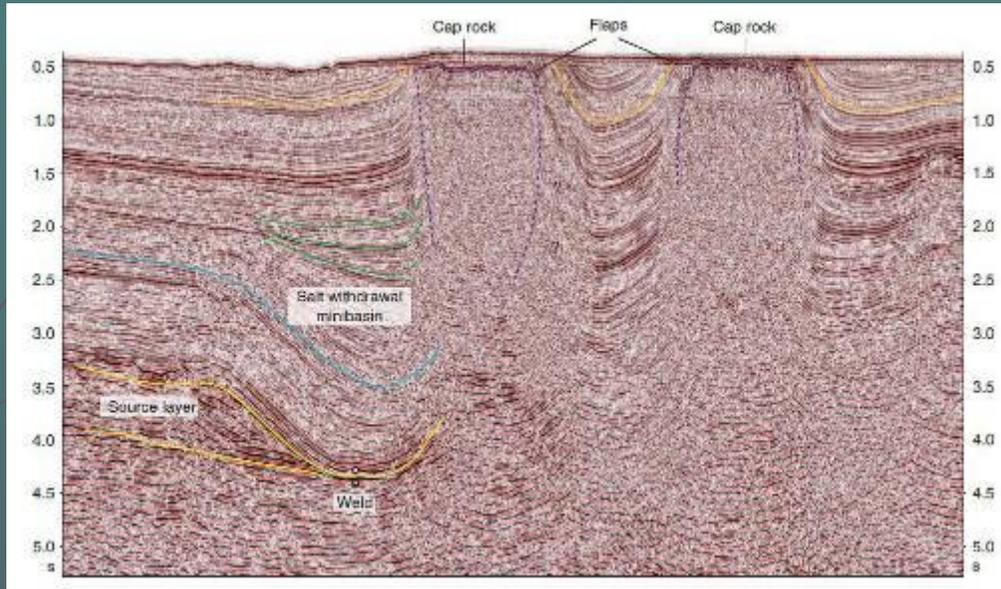
Дальше поднятие не растет (теперь в его верхней части повышенное давление) и расползается в виде «kozyрьков»

Свойства соли



- ▶ Слои соли становятся подвижными и гравитационно неустойчивыми когда погружаются на глубину, где средняя плотность пород покрывки превышает плотность соли ($2,2 \text{ г/м}^3$ на глубине 1500-2000 м).
- ▶ Два фактора делают соль особенной: ее низкая плотность и способность течь подобно жидкости даже на поверхности, а также при нагрузке.
- ▶ Деформацию соли можно рассматривать как вязкое течение. Доминирующие деформационные механизмы: диффузия в присутствии воды (растворение и перемещение вдоль границ зерен) и дислокационный крип

Соляные поднятия часто являются диапирами

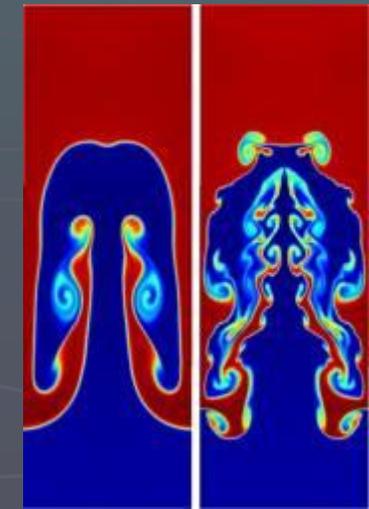


Соляные диапиры на сейсмическом профиле. Норвегия. (Fossen, 2011)

Диапир — это относительно подвижная масса материала, которая проникает через вышележащие толщи.

Малоплотный материал диапира (соль, глина, магма, ...) направляется вверх благодаря силе плавучести.

Математически эти структуры можно описать через явление неустойчивости Рэлея — Тейлора, которая имеет место на границе между двумя толщами разной плотности.





Соляные структуры в Dasht-e Kavir, Иран. Видна округлая форма диапиров (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 соли и перекрывающих ее слоев. Впервые это положение было высказано Аррениусом еще в 1912 г. относительно куполов Германии, однако получило преобладающее признание только после 1930 г.

Моделирование соляных куполов было начато в 1934 Нетлтоном.

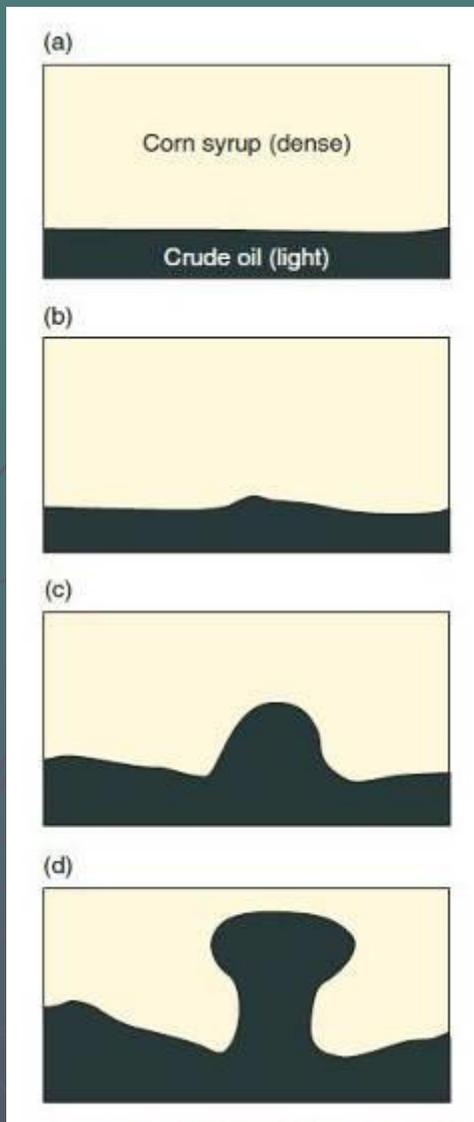
Эксперименты по формированию соляных куполов в условиях инверсии плотности

Модели на вязких жидкостях

Модели на твердых текучих материалах с применением центрифуги

Опыты Нетлтона

(Lewis Lomax Nettleton, 1934)



Последовательные стадии
роста поднятия нефти
(черное) в сиропе.
Схематическая зарисовка.
(Fossen, 2011)

Было проведено несколько серий опытов.

- Парафин разогревался, заливался в сосуд, затвердевал. Делалась выпуклость, наливалась ртуть, образец разогревался.
- В сосуд заливался горячий сироп разной плотности. Сверху – тяжелая асфальтовая нефть (но ее плотность была ниже плотности сиропа). Сосуд закрывался и переворачивался.

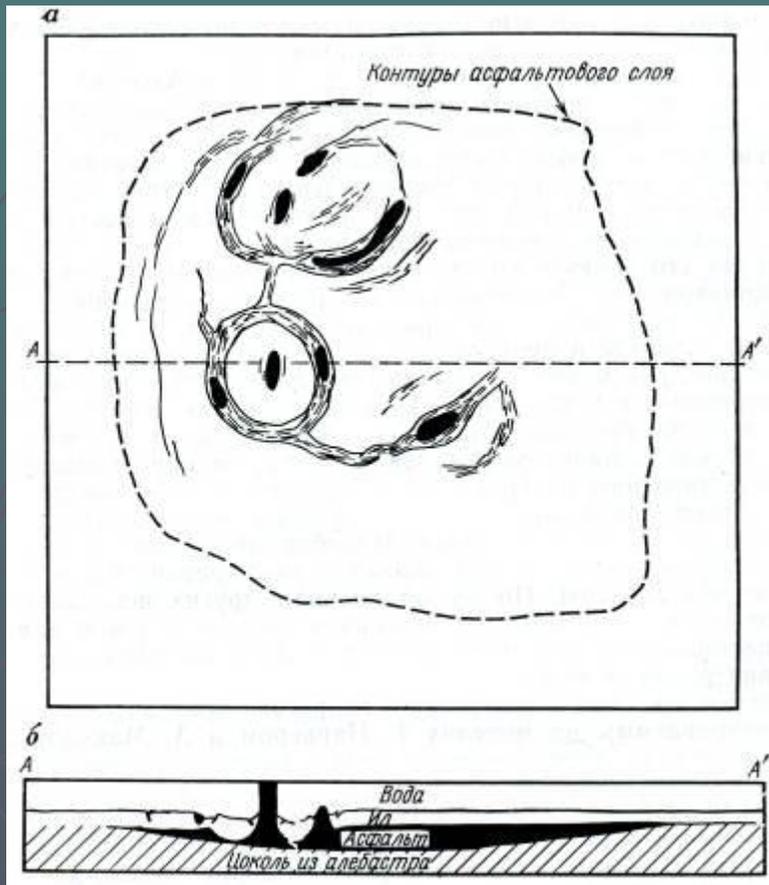
Значение опытов Нетлтона:

- Подтверждена возможность предполагаемого механизма.
- Установлен факт формирования вокруг купола периферического прогиба.
- Исследовано влияние перекрывающей толщи на рост поднятий: должна быть превышена некоторая мощность и, наоборот, не должна быть слишком большой вязкость.

В 1937 г. М. Хабберт произвел расчеты моделей Нетлтона и показал их подобие природным объектам

Опыты Паркера и Мак-Дауэлла (1955)

модели с сыпучим и илистым верхним комплексом



План и разрез модели, в которой соль имитировалась асфальтом, покрывающие породы – илом, постепенно осаждающимся из воды. (Методы..., 1988)

В моделях использовался асфальт (имитация соли), влажный ил (получаемый из глины и асбеста) и различные рыхлые порошки (например, смесь песка с сульфатом бария) для имитации покрышки

В этих экспериментах многие структуры, образовавшиеся спонтанно как результат гравитационного неустойчивого расположения легкого асфальта под тяжелым илом имели вид природных структур.

Важно:

- образование систем разрывов и сбросов в перекрывающей толще (этого нет при использовании только вязких жидкостей);
- намечается ячеистое строение солянокупольных областей (связано с конвективным характером движений)

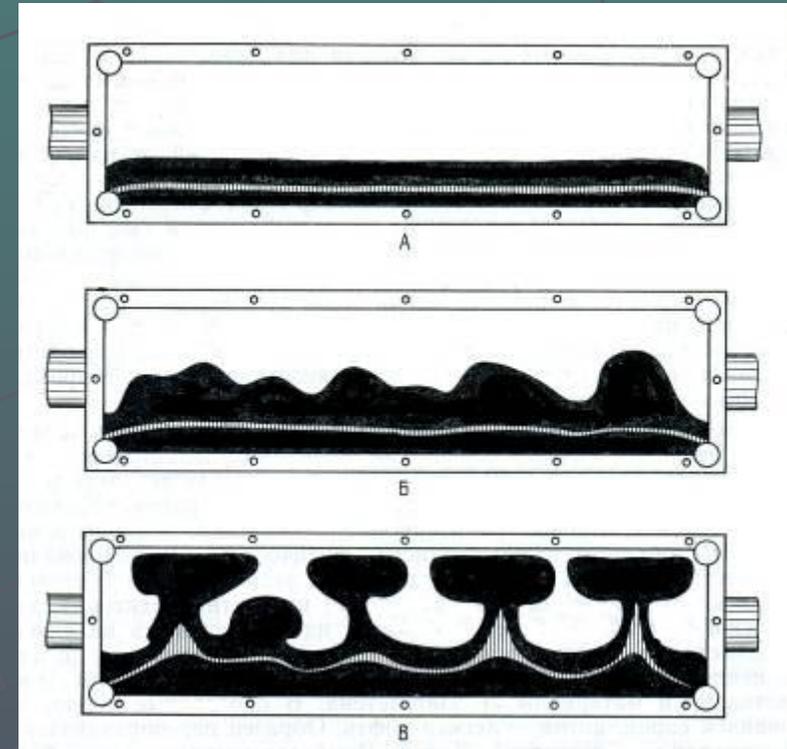
Опыты Х. Рамберга

(с 60-х годов прошлого века)

первый этап – использование вязких жидкостей

- ▶ Рамберг рассмотрел теоретические основы гравитационной тектоники;
- ▶ Исследовал влияние неоднородностей жидкости на рост поднятий
- ▶ Неоднородности мощностей (на участках с более мощным легким слоем поднятия возникают раньше и растут быстрее)
- ▶ Влияние вязкости на скорость процесса

В практически однородных моделях на поверхности нефти появлялись волны, параллельные стенкам сосуда, высота которых увеличивалась с возрастающей скоростью. Потом на поднятых частях волн возникали бугорки, разрастающиеся в более крупные поднятия, растекающиеся в стороны при достижении кровли сиропа.



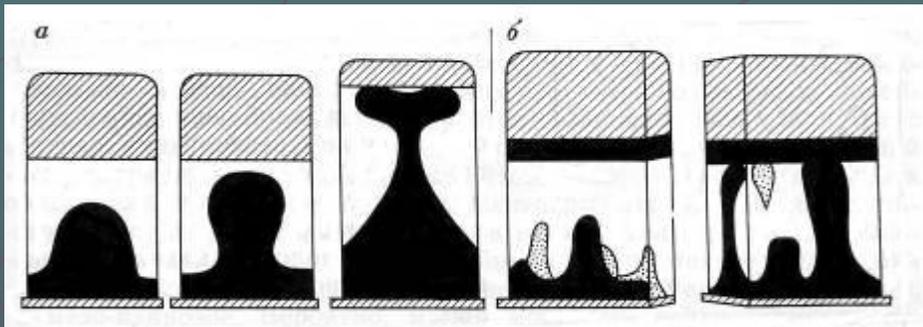
Последовательные стадии роста поднятий нефти в тяжелом сиропе (по Рамберг, 1970)

Опыты Н.Б. Лебедевой

(Лаборатория тектонофизики и геотектоники МГУ,
60-е годы прошлого века)

Первый тип опытов (показано на рисунке). Переворачивание сосуда. Рост чаще всего одного поднятия.

Изменение формы: округлые купола - колонны – пережим колонн – растекание верхней части в стороны



Изменение морфологии поднятий в процессе Их роста (а) и в зависимости от вязкости битума (а – 10^2 Па·с; б - 10^4 Па·с). Верхняя часть – сироп или патока (Методы..., 1988)

Второй тип опытов. Сначала наливался битум. Поверх него – сироп. Развитие процесса: неровная поверхность битума, рост обособленных поднятий (2-5), рост новых, более мелких поднятий. Важный вывод.

Исследовалось влияние мощности и вязкости модельных жидкостей.

Уменьшение мощности – скорость роста поднятий уменьшается.

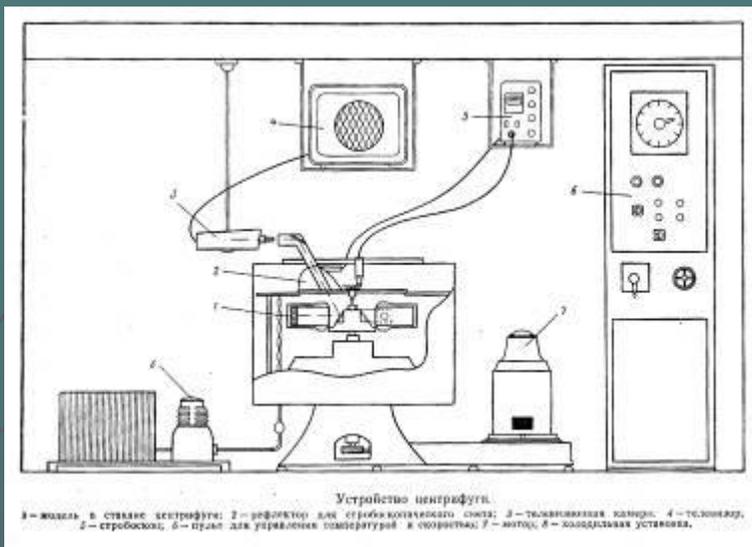
Более вязкий битум – возрастает общее число возникающих поднятий (см рис.)

Модели на твердых пластичных материалах с применением центрифуги

Эксперименты Х. Рамберга

- ▶ Начиная с 1963 г Х. Рамберг разработал и впервые применил метод центрифугирования для моделирования тектонических процессов, в которых гравитационные силы играют ведущую роль. В основе метода лежит использование в моделях центробежной силы, заменяющей силу тяжести. (Центробежная сила может превысить силу тяжести в тысячи раз).
- ▶ Максимальное ускорение достигало 3000 g и 4000 g
- ▶ Размер образцов (диаметр или сторона стакана) 10 и 19 см.
- ▶ Материалы. «Соль»: силиконовая замазка (силикон), смесь силикона с порошками магнетита и вольфрамита, сапожный вар, смесь канифоли с этиленфталатом. Породы верхней части комплекса: смесь глины с маслом, грунтовка на пластичной основе.
- ▶ Изменялось: свойства материала, мощность слоев, время центрифугирования, величина центробежной силы.
- ▶ Даже если никаких неоднородностей на поверхности легкого слоя не создавалось, «диапиры» все равно образовывались.

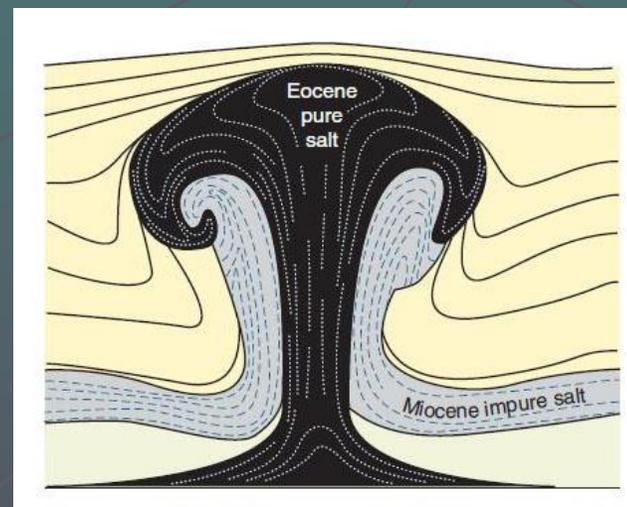
Некоторые модели Рамберга



Форма диапиров была различной. Сначала — пологое вздутие, его рост, формирование краевой впадины. При приближении к поверхности образца (или перекрывающему слою с иными свойствами) происходит расползание вздутия в стороны с образованием «шляпки гриба».

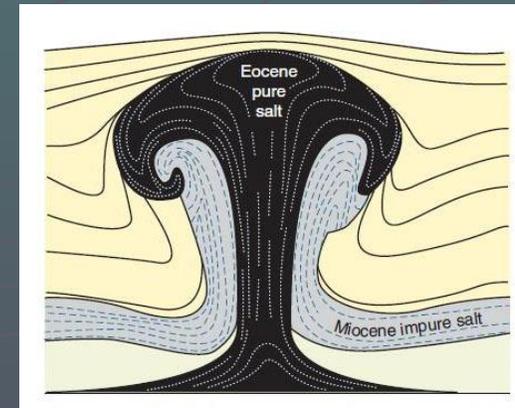
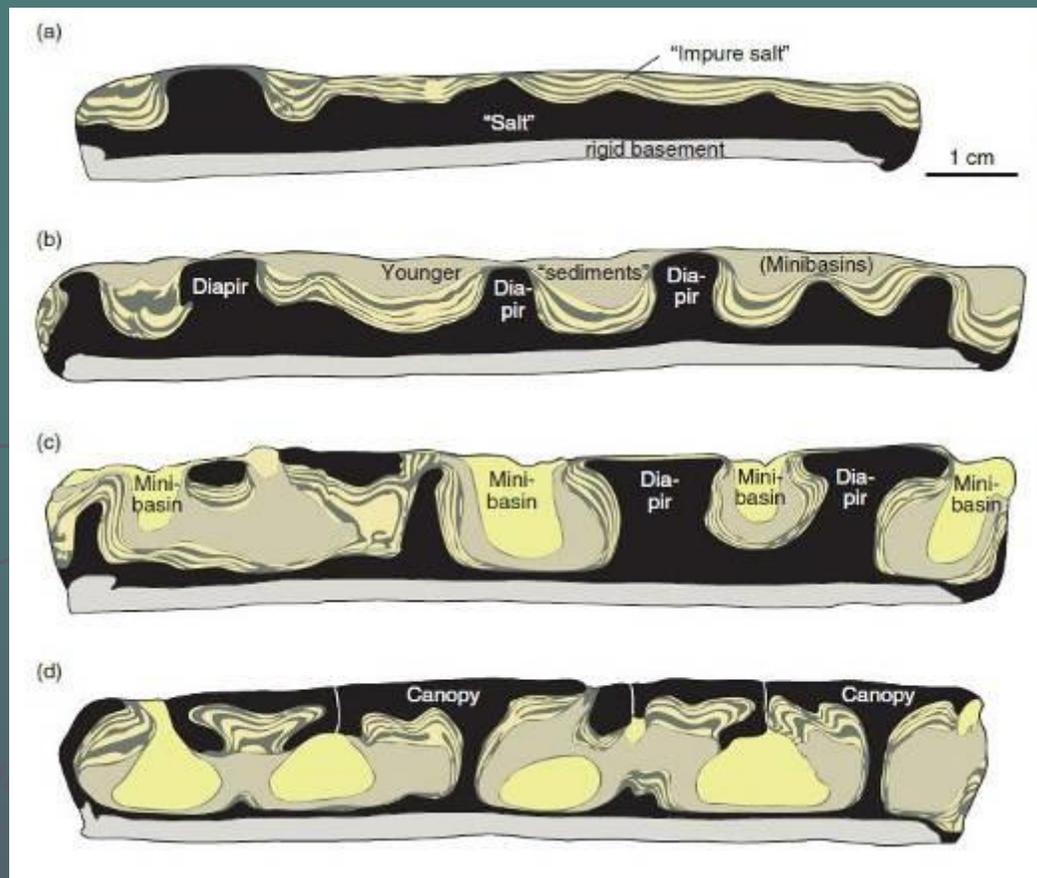


(Рамберг, 1970)



Типичная форма грибообразного диапира в Dasht-e Kavir, Иран. (Jackson et al., 1990)

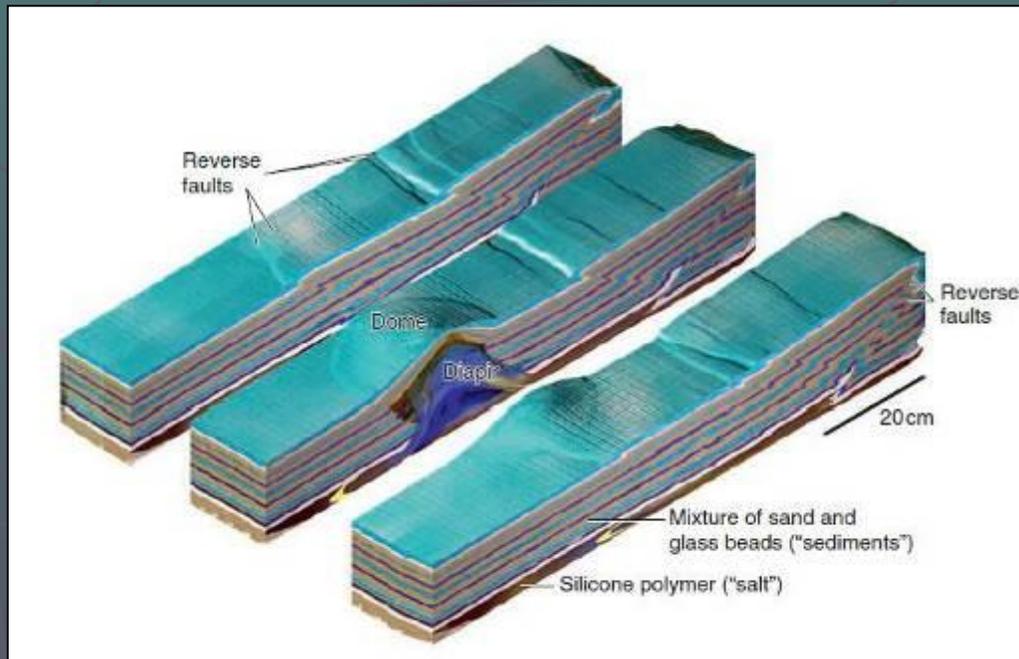
Термины соляной «купол» и «диапир» часто употребляются как синонимы



Разрезы через аналоговую модель, полученную в центрифуге. Показаны последовательные стадии развития диапиров. Разрезы не прямо скоррелированы между собой, но дают хорошее представление о динамике процесса. В конце-концов формируются козырьки. Сходство с диапирами Dasht-e Kavir, Иран (по X. Рамбергу, из Fossen, 2011)

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

В последние несколько десятилетий наиболее распространены модели, состоящие из вязкого силиконового геля, перекрытого песком (хрупкий материал). Такие модели успешно используются для воспроизведения большого количества закартированных соляных структур в осадочных бассейнах. Много важных экспериментов было выполнено в университете Ренна (Франция) и Техасском университете в Остине.



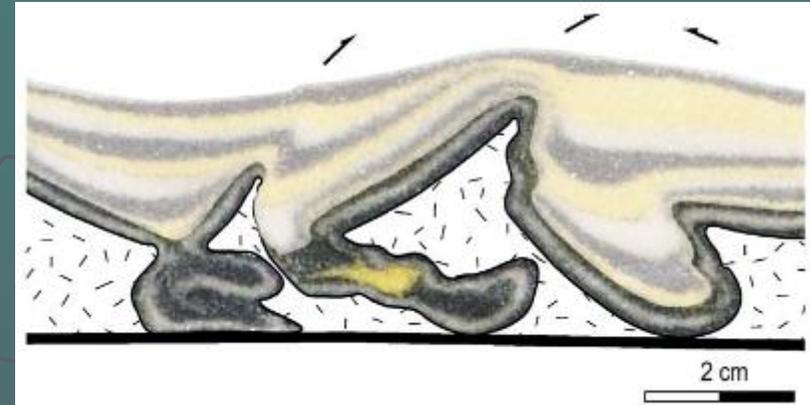
Пример физического эксперимента с участием аналогов соли, перекрытый “осадками”. Это одна из нескольких моделей, которые исследуют **результат сжатия осадочной толщи с уже имеющимся соляным диапиром**. В ходе эксперимента кровля диапира куполообразно воздымается, также развиваются взбросы (по простиранию от купола). (по Т. Дули, Лаборатория прикладной Геодинамики, Университет Техаса в Остине, из Fossen, 2011).

Еще примеры моделирования соляных структур

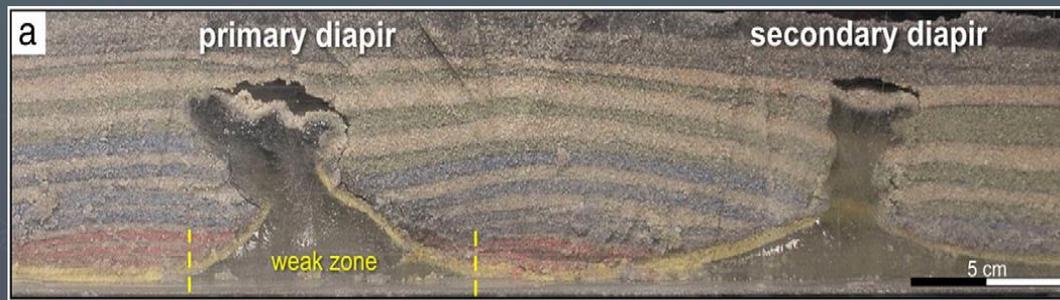
Без центрифуги



*Applied Geodynamics Lab,
University of Texas at Austin (1989)*



Brun & Fort, (2004)

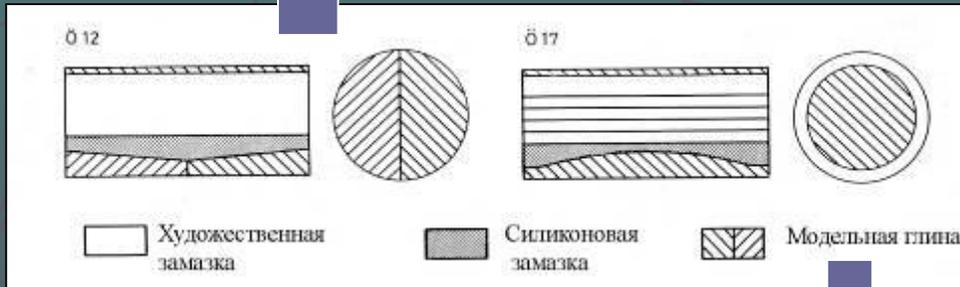
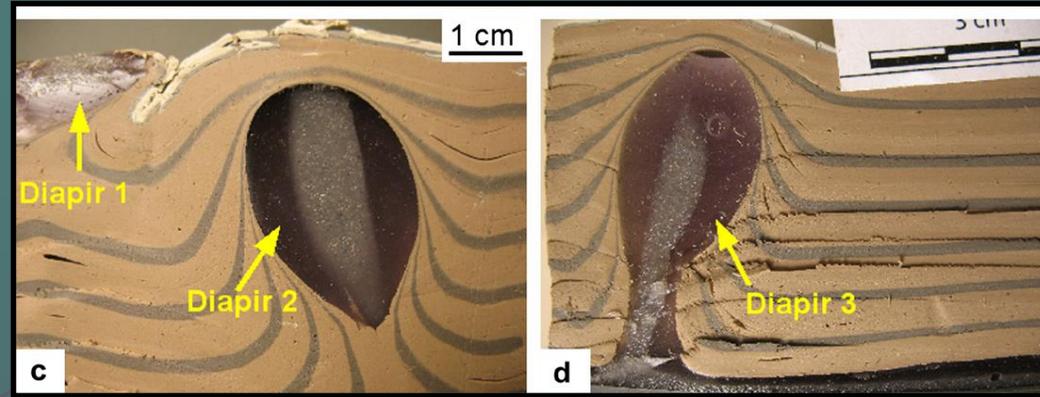
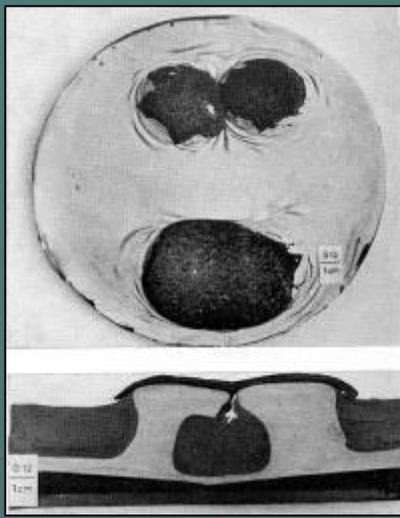


Warsitzka et al., (2013)



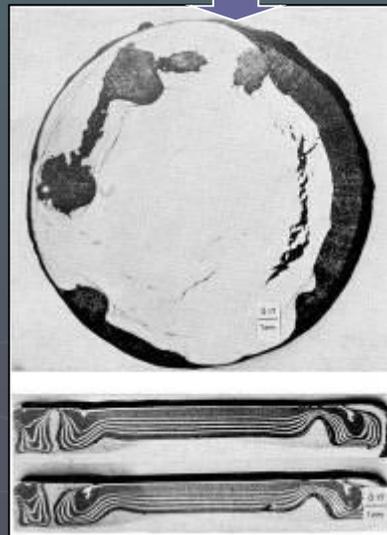
*Здесь вместо силикона
использован каучук
Х. Гуал Перес, 2013*

С использованием центрифуги



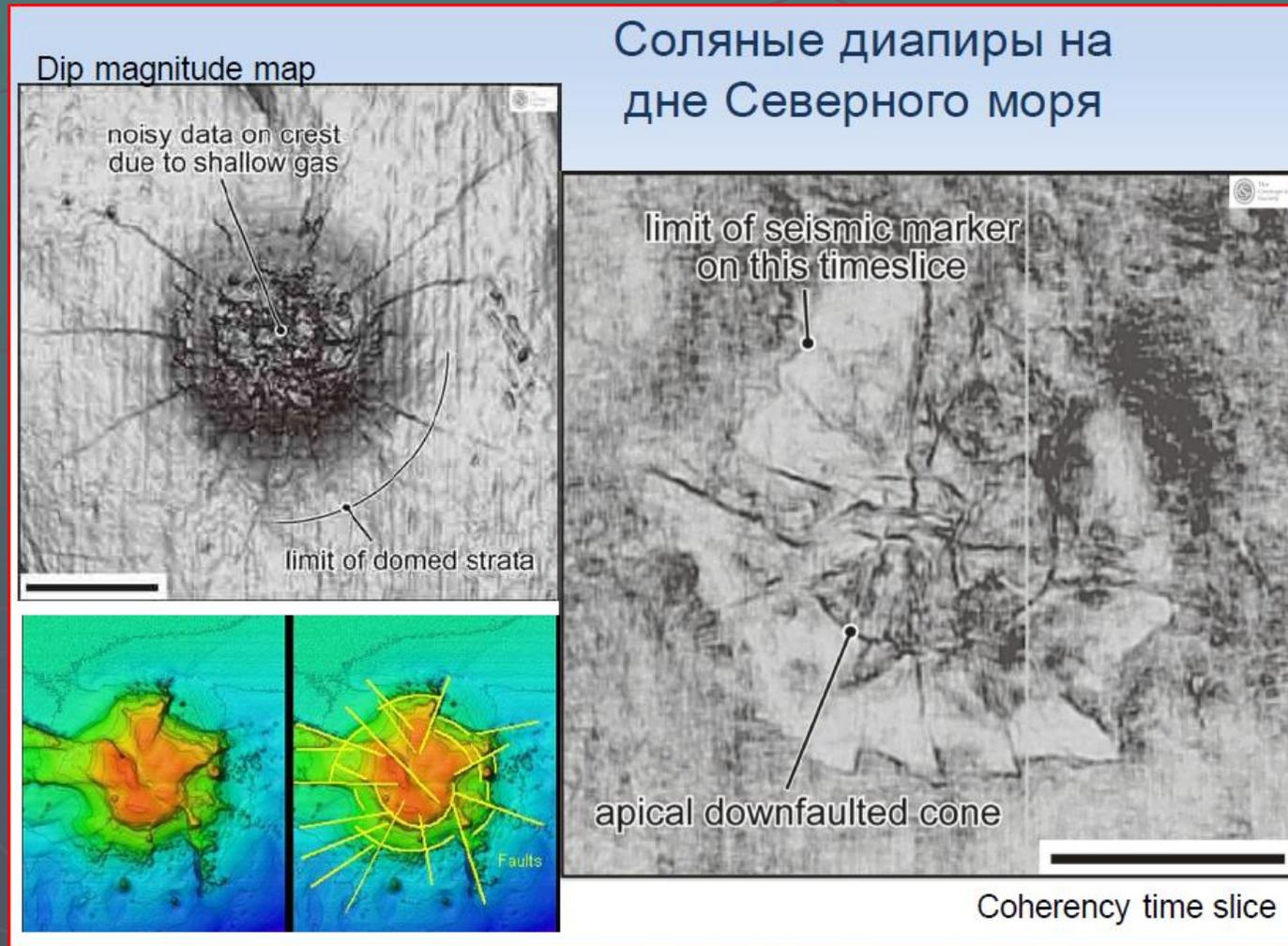
Dietl & Koyi, (2011)

(Stephansson, 1972)

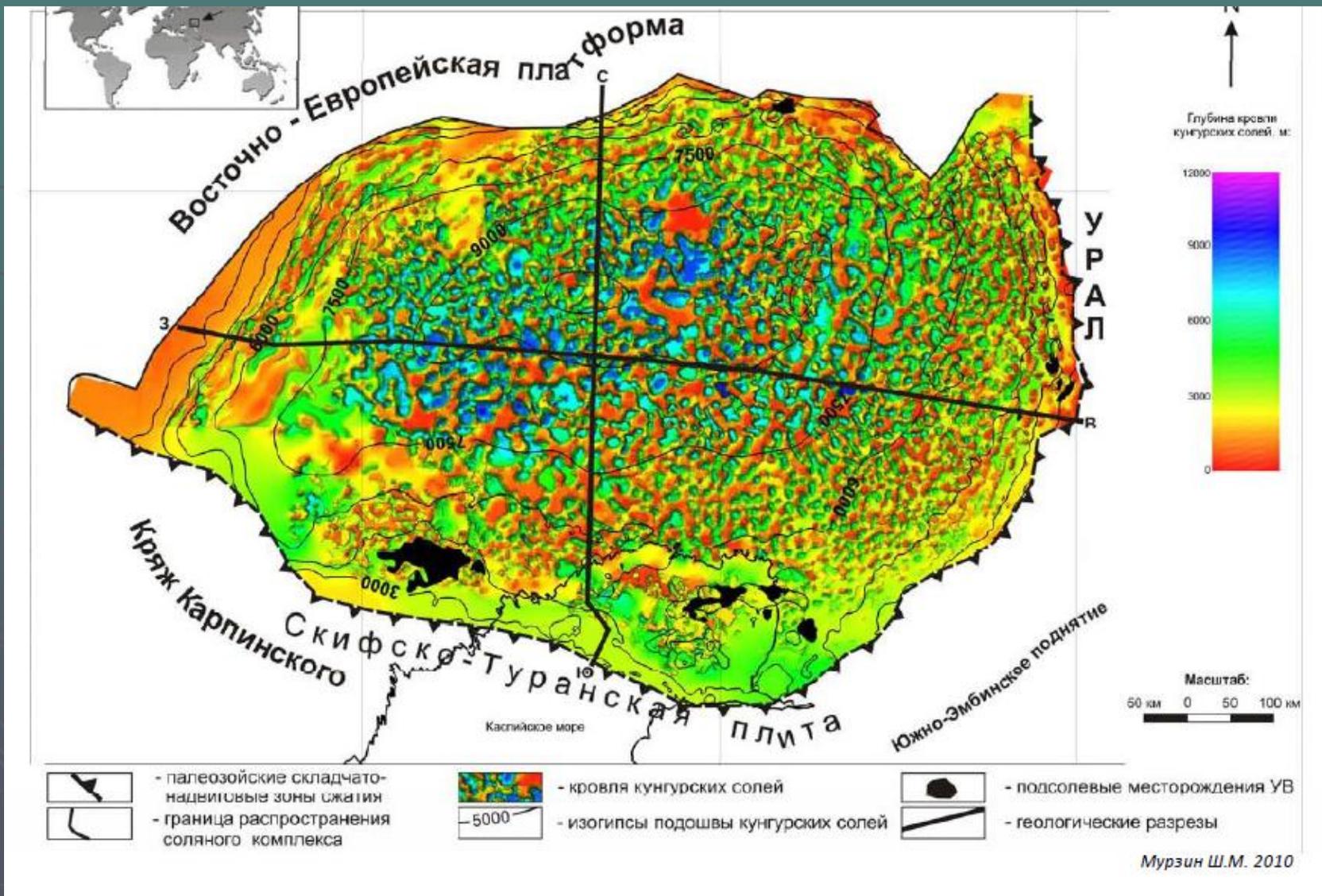


Konstantinovskaya *et al.*, (2008)

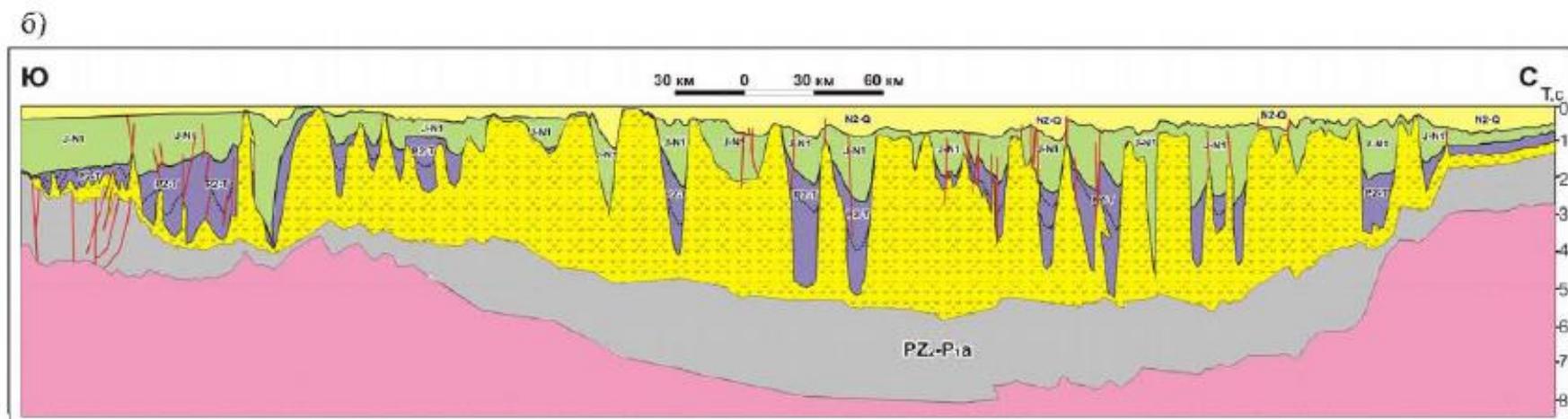
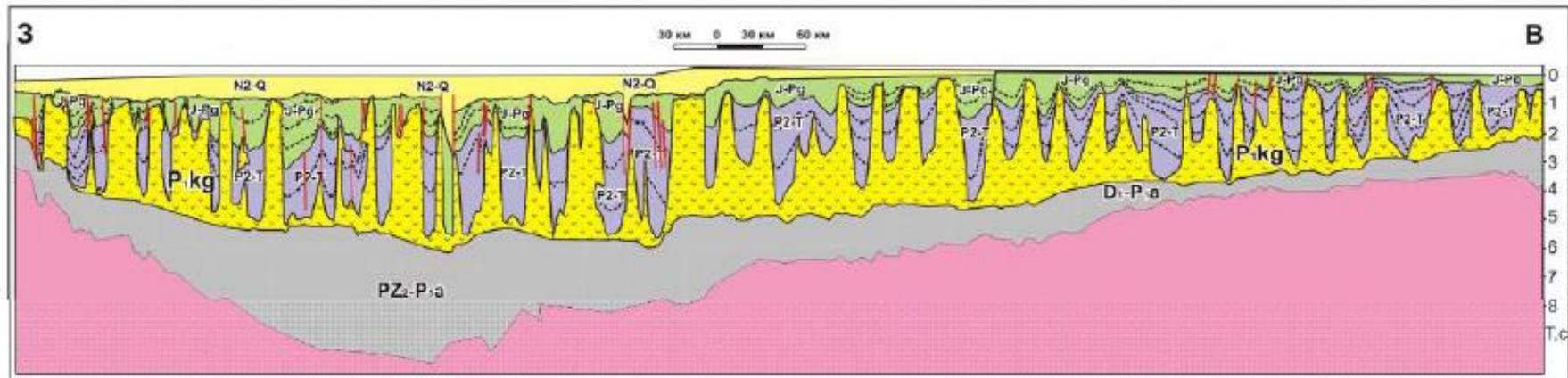
Примеры природных структур



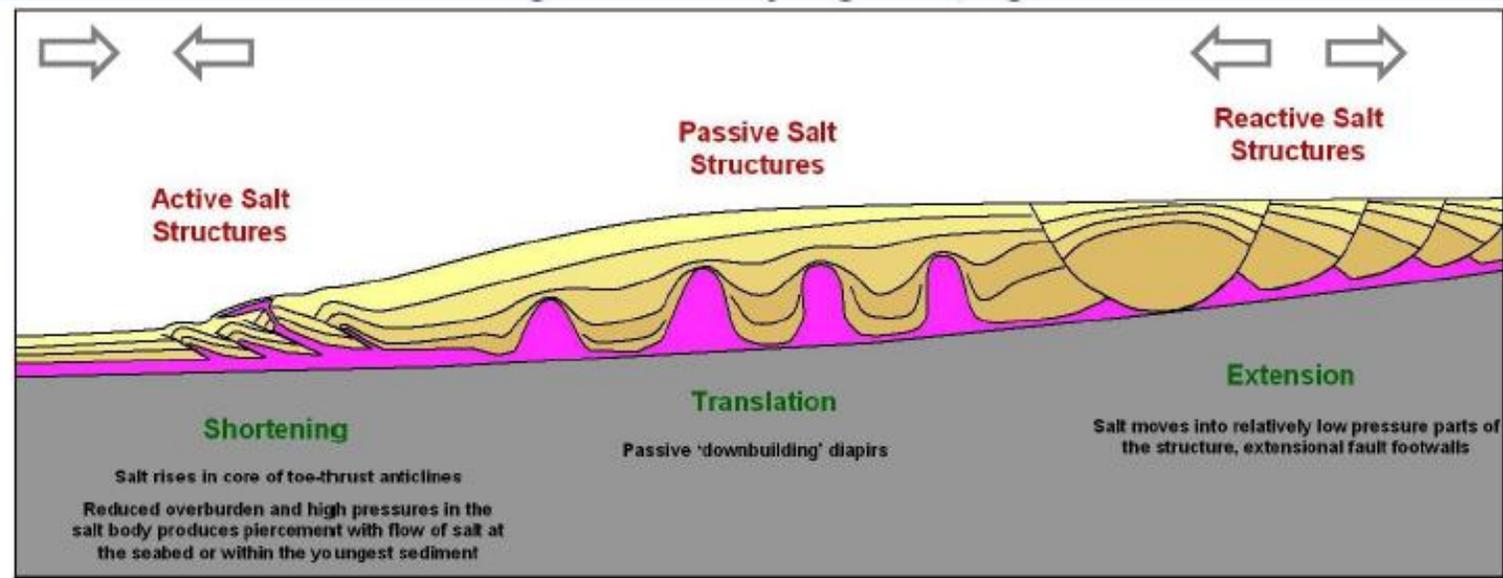
Прикаспийская впадина



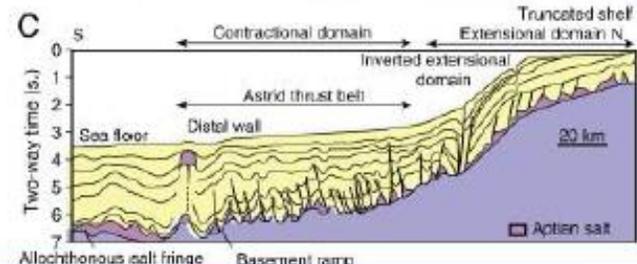
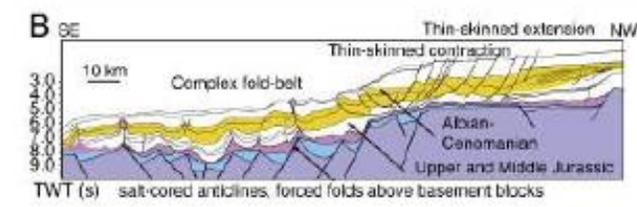
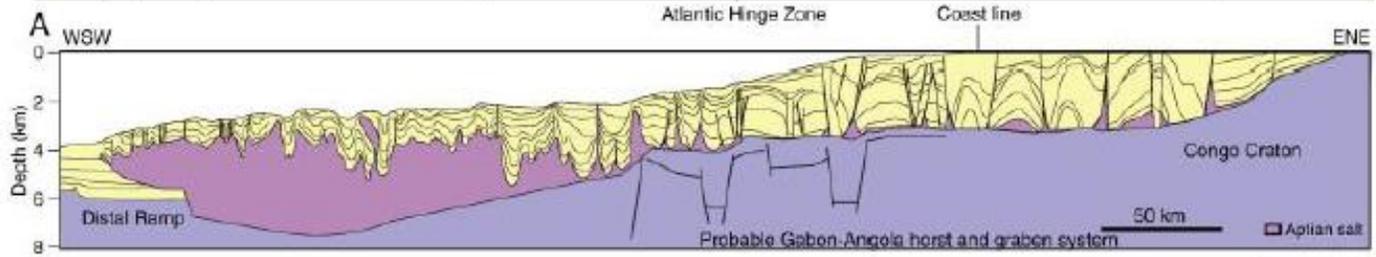
Региональные геологические профили Прикаспийской впадины



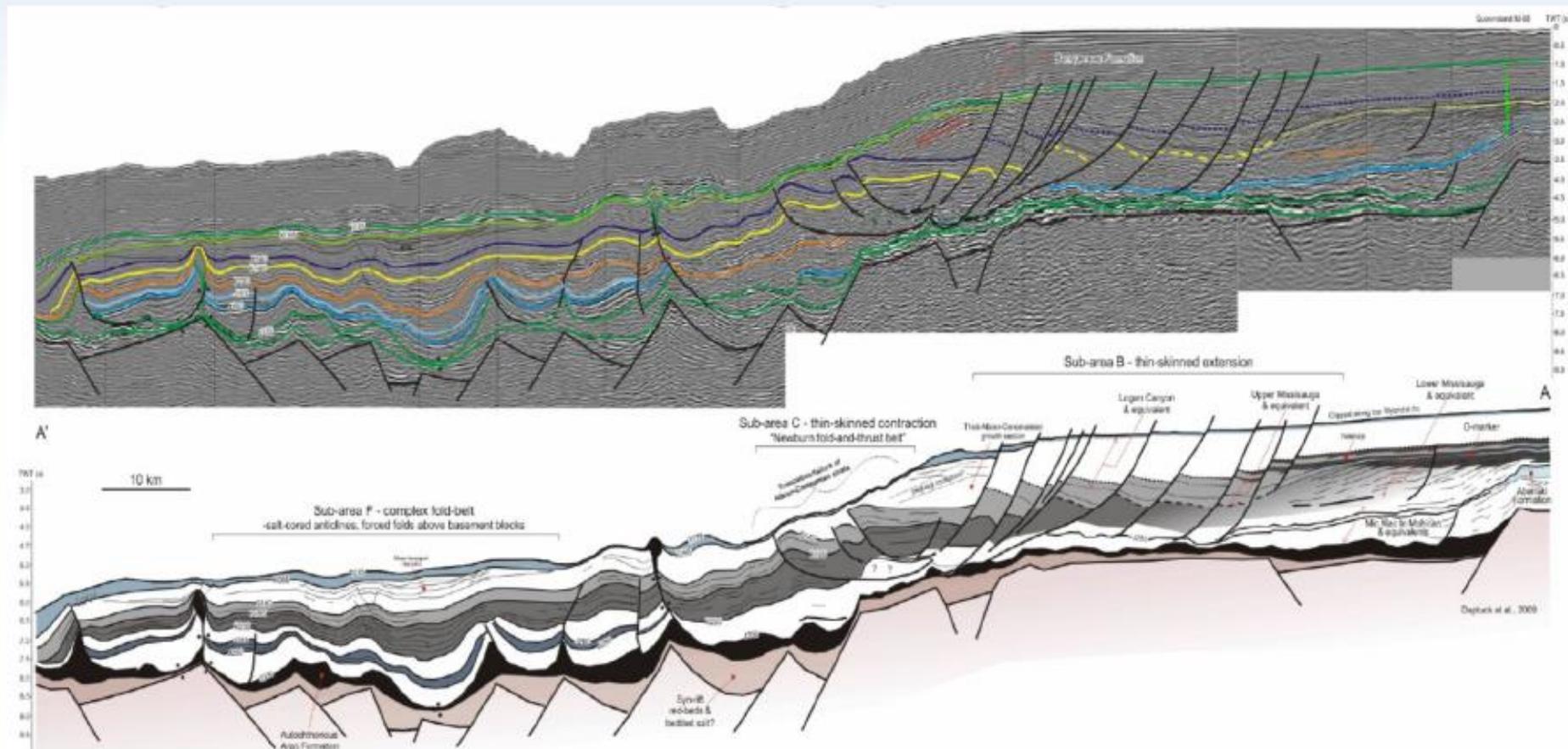
Типы соляных структур на пассивной окраине Атлантического океана (Габон, Ангола)



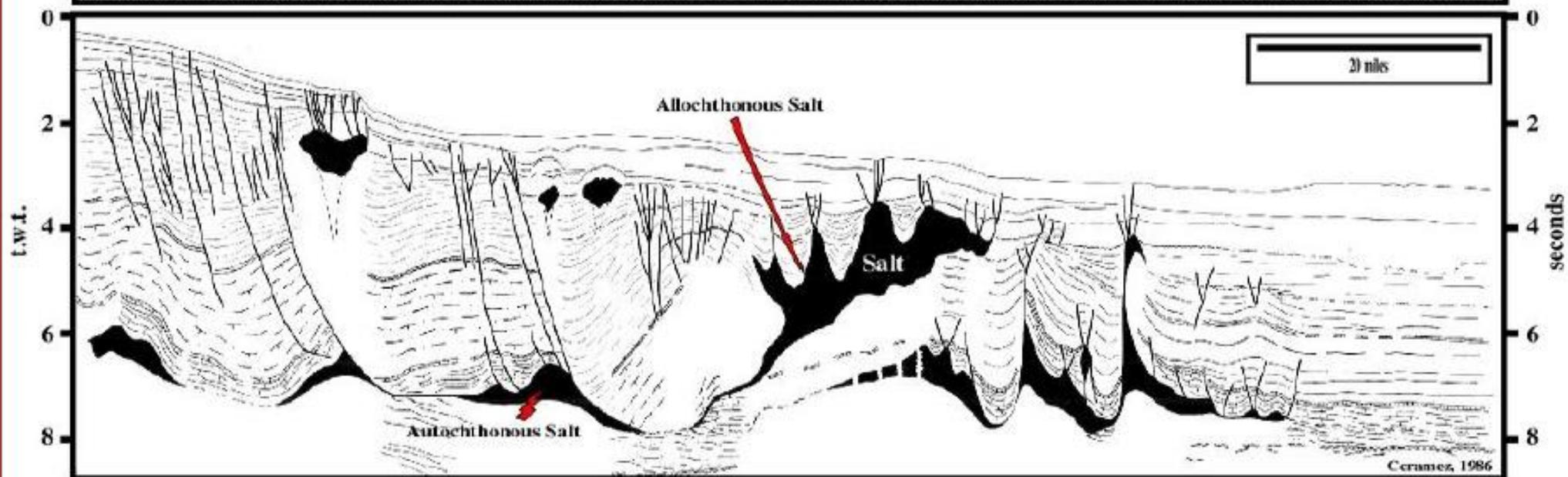
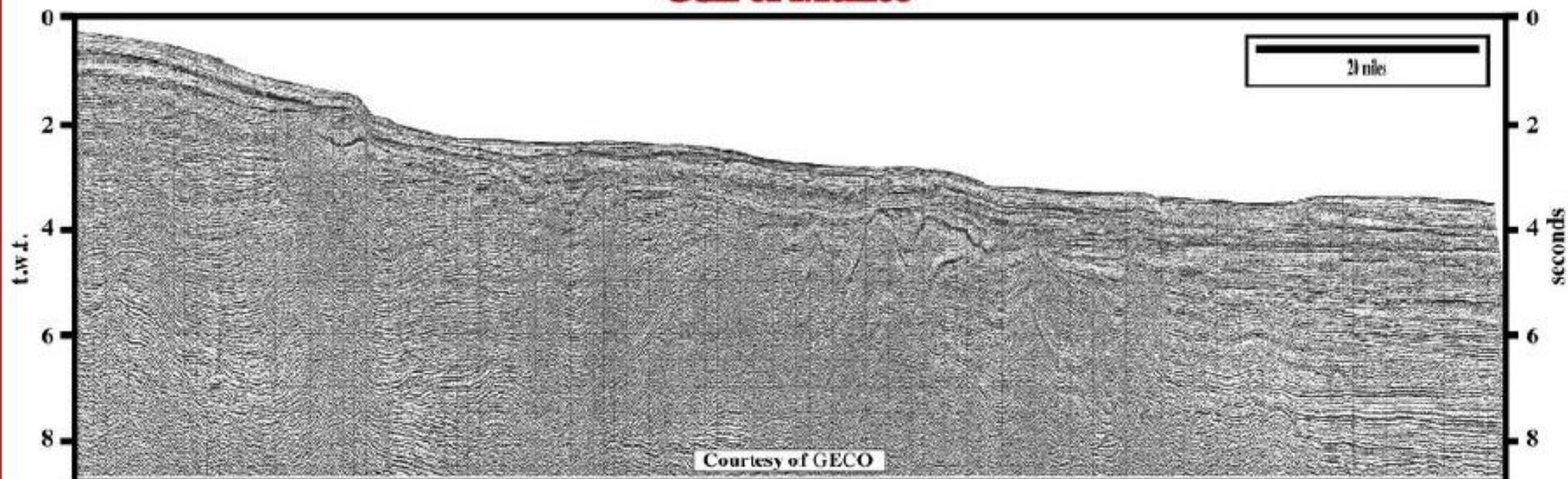
Outer Kwanza Basin (passive margin)		Outer Salt Basin			Flamingo Platform		Inner Kwanza Basin (interior basin)	
Abyssal Plain	Angola Salt Nappe	Thickened salt palteau	Diapir domain	Monocline domain	Raft Domain	Inner Salt Basin	Eastern Rim	Updip Wedge

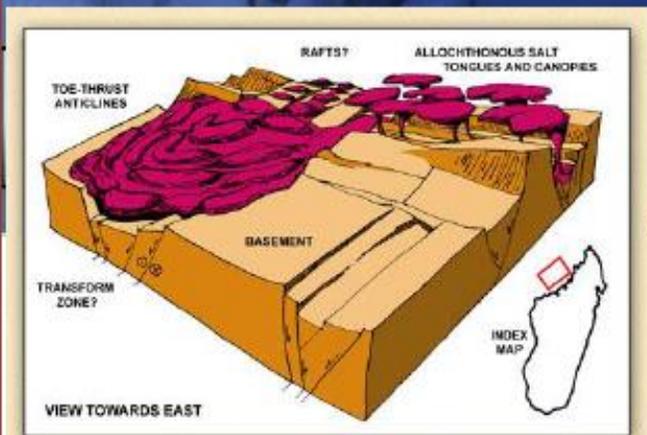


Интерпретация композитного сейсмического профиля прибрежного района Новой Шотландии, Канада

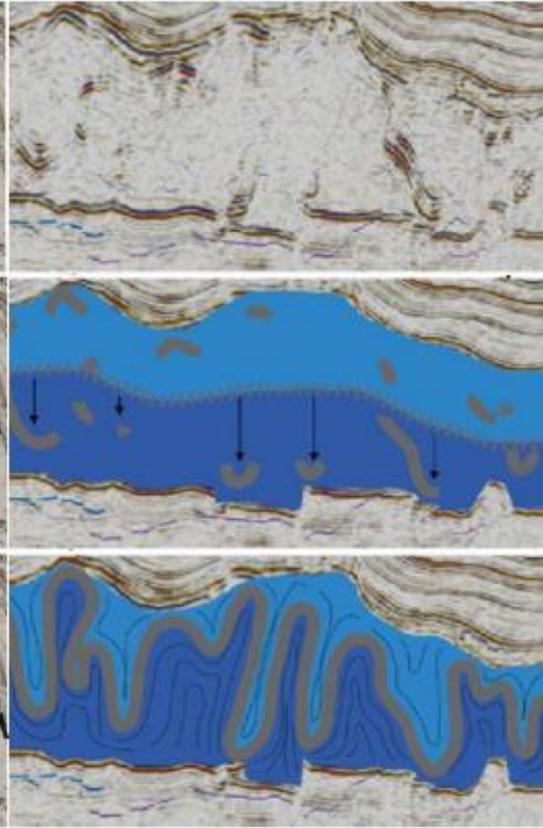
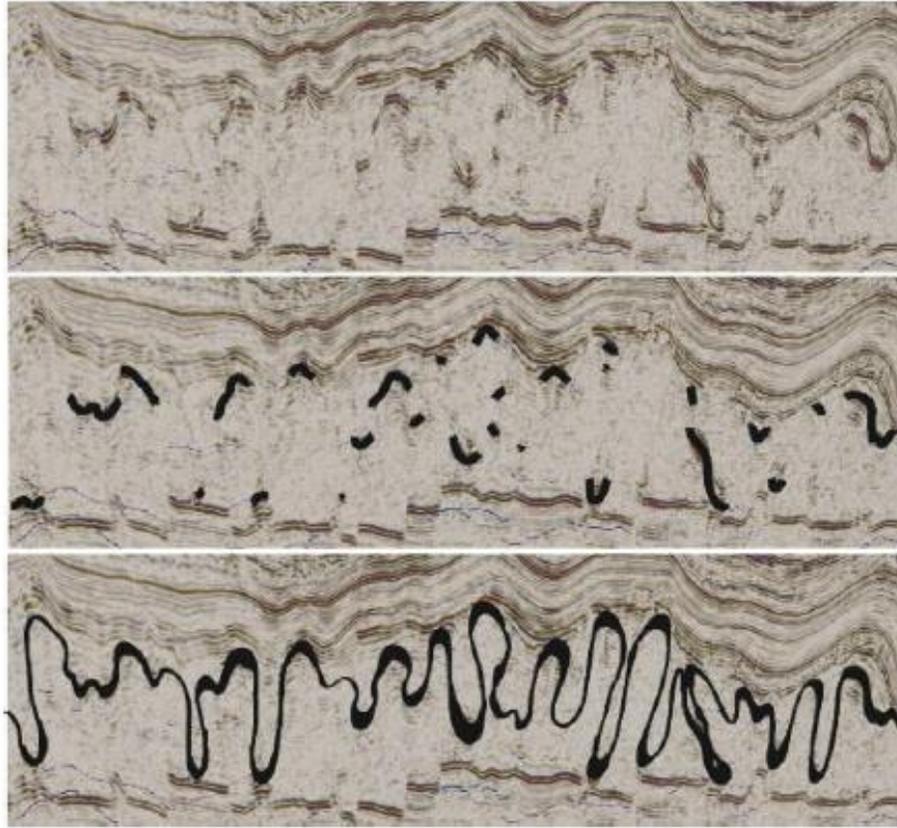
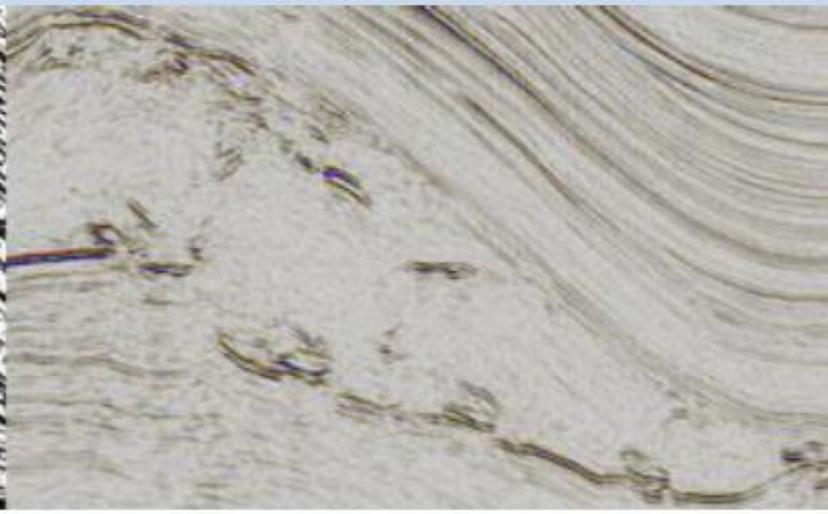
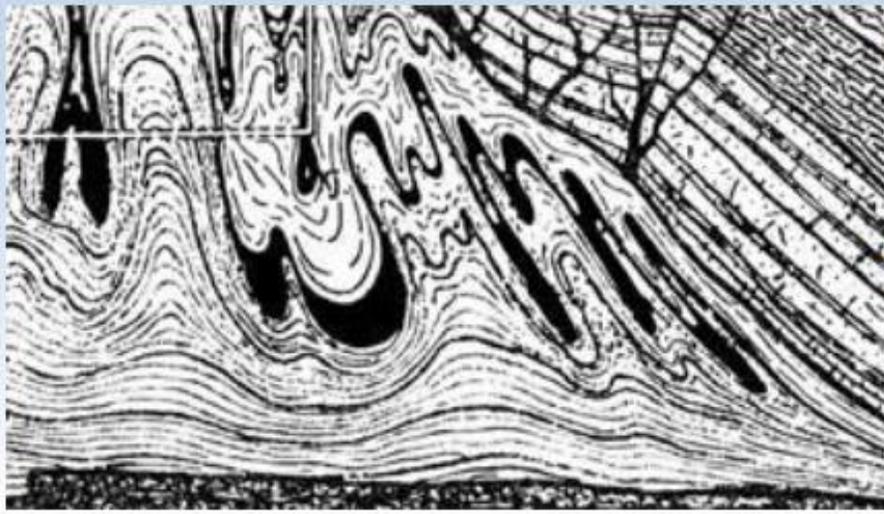


Autochthonous & Allochthonous Salt in Gulf of Mexico

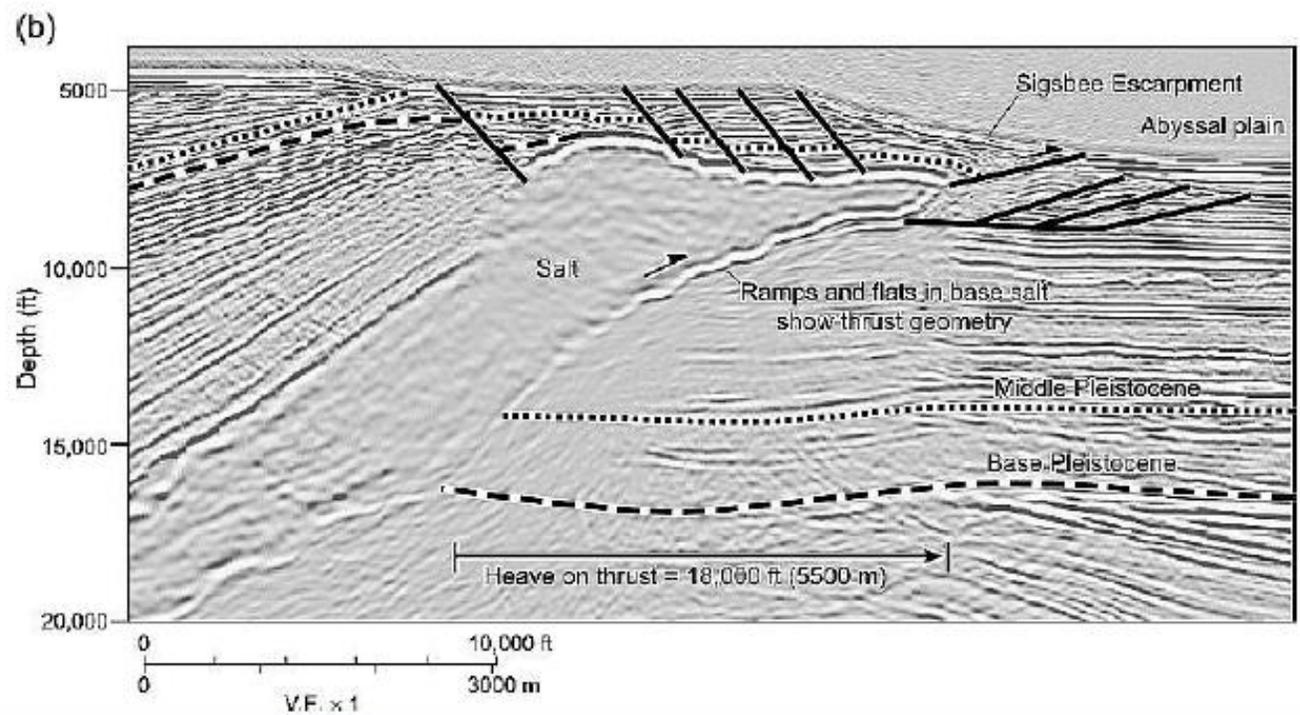
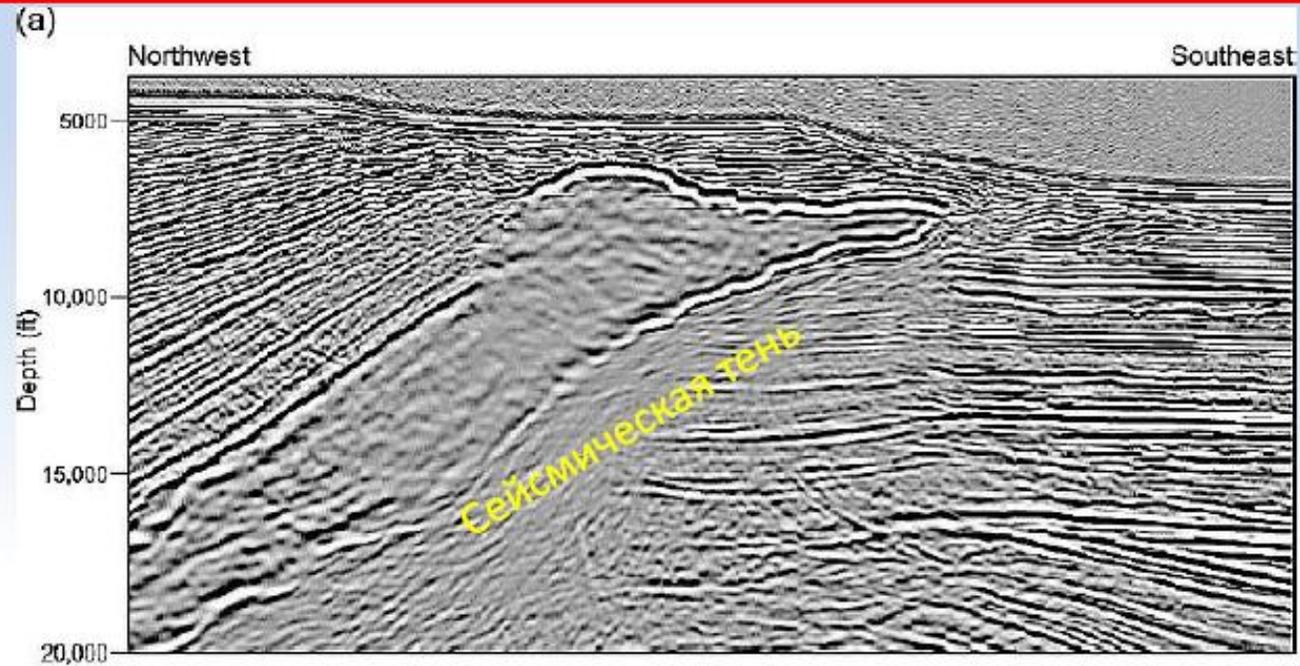


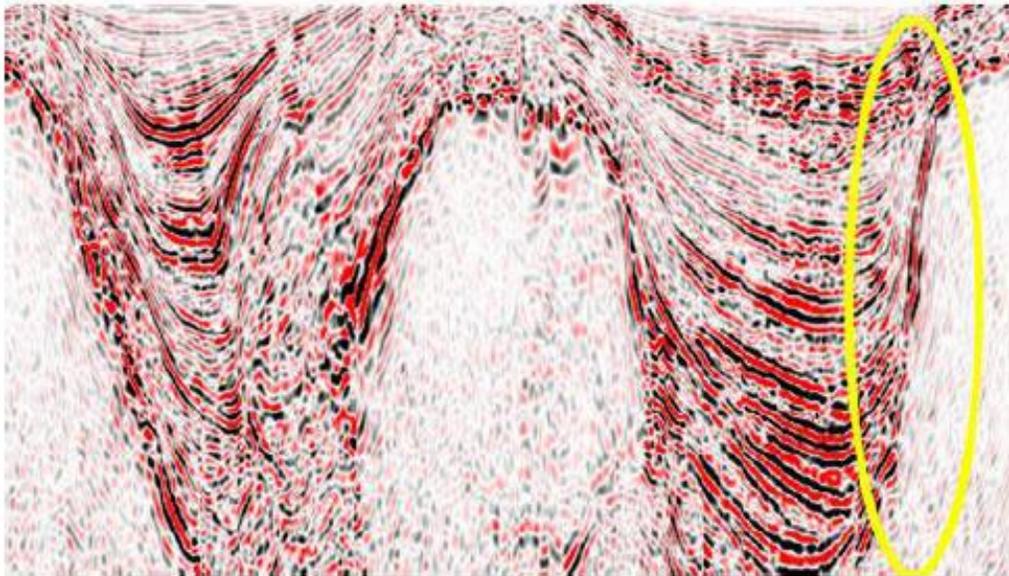
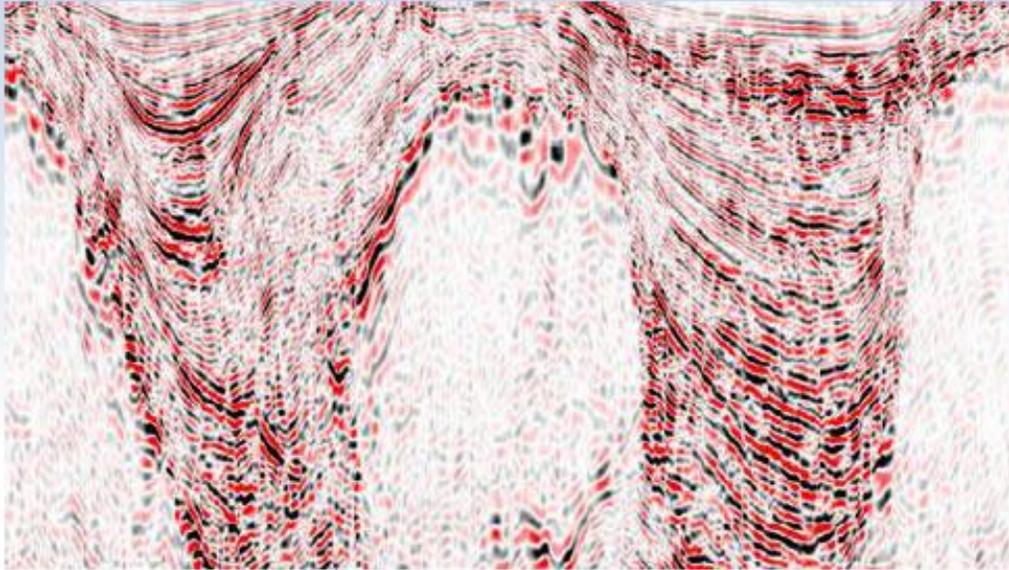


Соляные купола в Мексиканском заливе



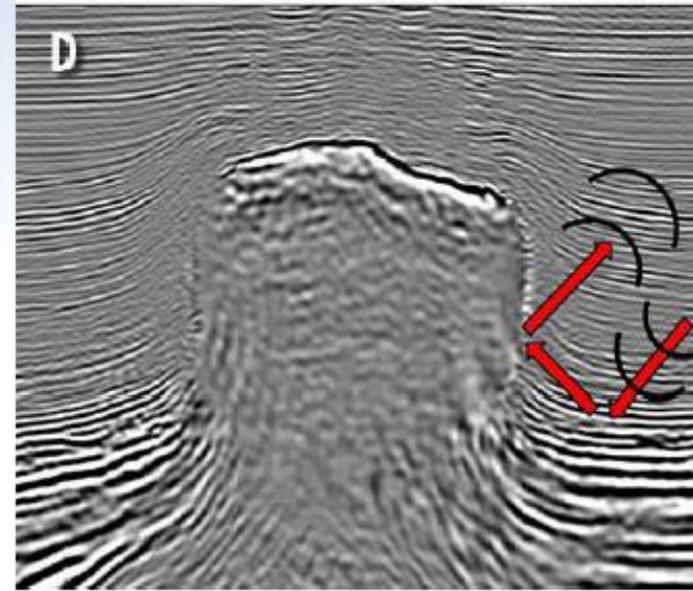
Внутреннее строение диапира





Reverse time migration

Дуплексные
волны



Соляные купола
на сейсмических разрезах

Региональная инверсия плотности

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

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

2 следствия:

1. Простое нагревание. Сами породы при этом немного расширяются и тем самым становятся легче.

Но обычно в них сохраняются флюиды (еще с момента осадконакопления), которые расширяются гораздо значительней.

Это приводит к возникновению инверсии плотности в осадочной толще, так как нижняя ее часть нагрета больше, чем верхняя (то же происходит при подогреве снизу воды в чайнике).

2. Региональный метаморфизм. Характерная реакция:



Метаморфическая реакция дегидратации осадочной толщи, содержащей водонасыщенные минералы.



Пример метаморфической реакции дегидратации.

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

В процессе этих взаимных перемещений возникает складчатость.

Условия возникновения конвекции. Критерий устойчивости Рэля

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.

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.

Подсчитаем, возможна ли конвекция в осадочной толще с геотермическим градиентом 60 град/км:

$$R = \frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot \frac{g h^3}{\nu X} \sim 10^{-1} \cdot \frac{10^1 \text{ м/с}^2 \cdot (10^4 \text{ м})^3}{(3 \cdot 10^{14} \text{ м}^2/\text{с}) \cdot (3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с})} \approx 10^4 > R_1 \sim 10^3.$$

Оценка числа Рэля для осадочной толщи, подвергнутой воздействию теплового импульса из мантии.

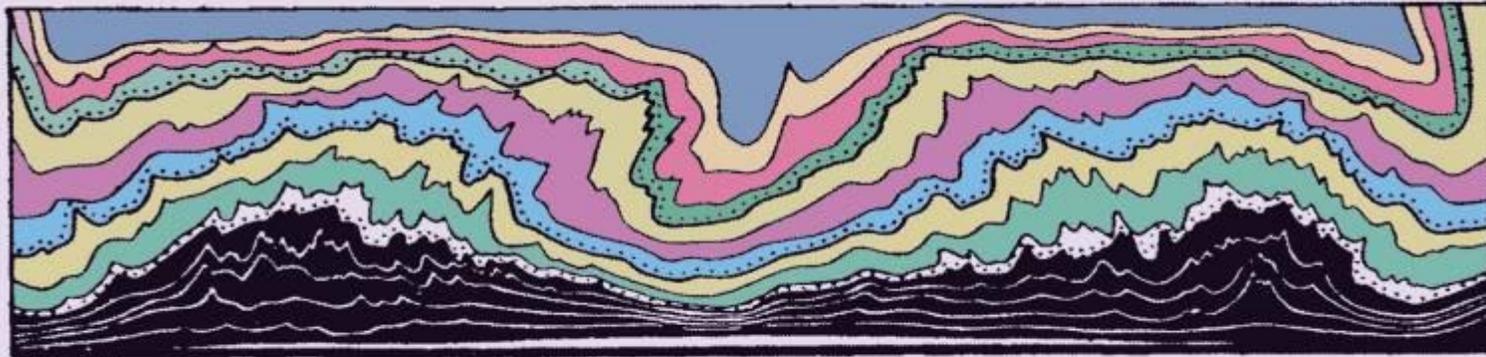
Превышение критического числа Рэля говорит о физической возможности конвекции в осадочной толще.

(по М.А. Гончарову)

Условия протекания конвекции в линейной или купольной формах

Помимо 1-го критического числа Рэля $R_1 \sim 10^3$,
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.



Эксперимент Лаборатории тектонофизики МГУ (М.А. Гончаров и Ю.М. Горелов)

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

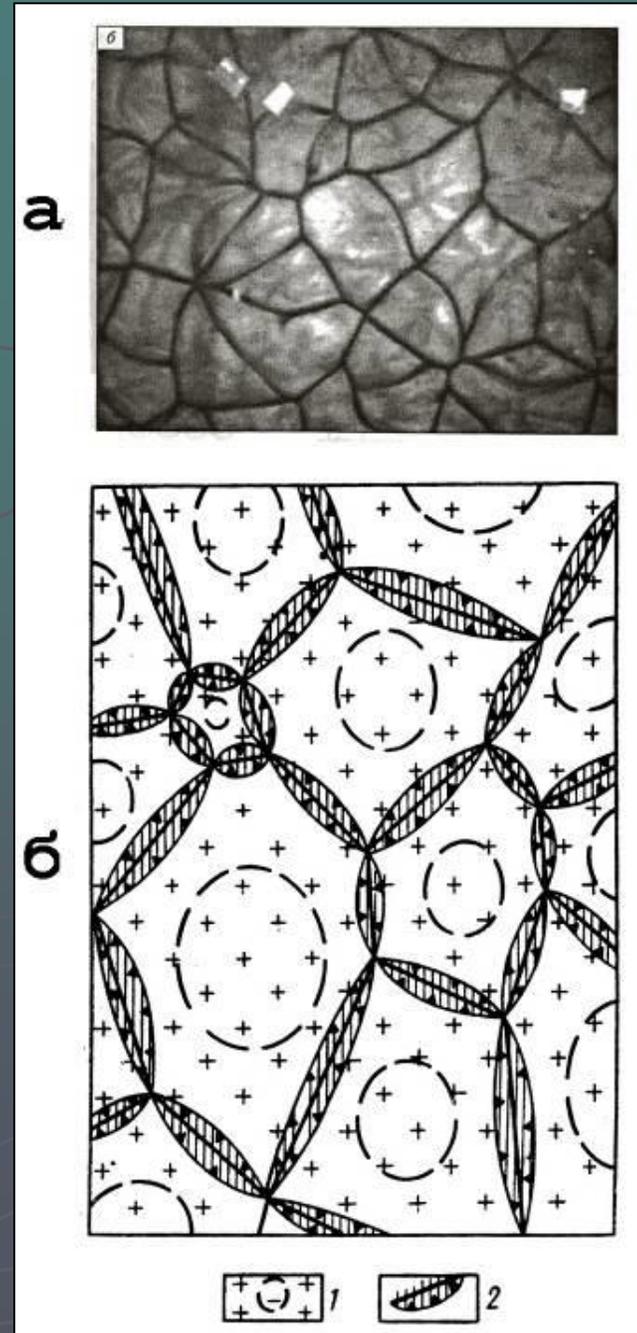
В критерии Рэля в числителе фигурирует степень инверсии плотности, прямо пропорциональная вертикальному градиенту температуры.

Поэтому при его умеренных значениях, а поэтому и при умеренной степени регионального метаморфизма, $R < R_2$, и мы наблюдаем **линейную** складчатость.

А при повышенных значениях градиента 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.

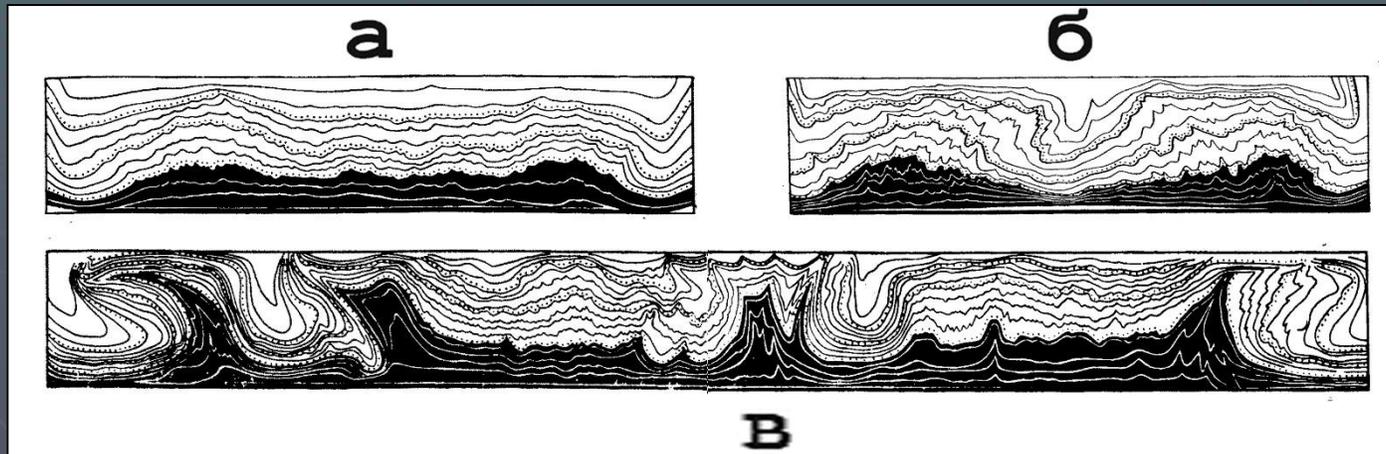
а – ячейки Бенара, возникающие при тепловой конвекции в горизонтальном слое жидкости, подогреваемом снизу (эксперимент А.Г. Кирдяшкина и А.А. Кирдяшкина).

б – схема соотношения раннедокембрийских гранит-зеленокаменных областей (1) и гранулитовых поясов (2), по В.Е. Хаину.



Моделирование тепловой конвекции в Лаборатории тектонофизики и геотектоники МГУ

Такая конвекция была воспроизведена в нашей Лаборатории тектонофизики и геотектоники путем подогревания тонкослоистых образцов, состоящих из сплава канифоли с машинным маслом.



Моделирование структур, формирующихся при активной роли гравитации

Имитация инверсии плотности с помощью теплового импульса
(Гончаров, Горелов, 1975; Гончаров, 1979).

В этом случае инверсия плотности возникала в процессе опыта

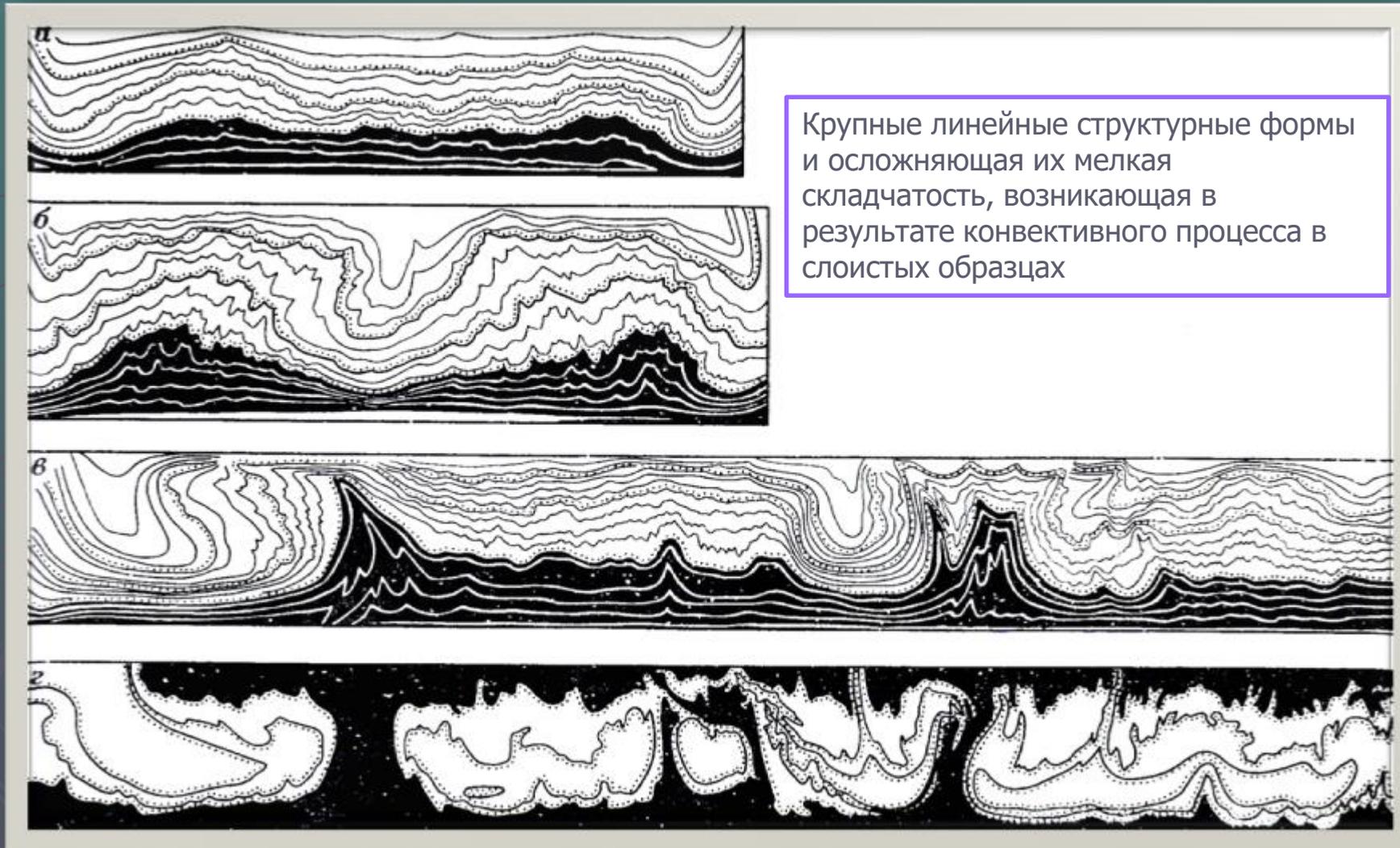
- ▶ Эквивалентный материал: сплав канифоли (90%) с машинным маслом (10%), обладающий вязкостью 10^7 - 10^8 Па·с при комнатной температуре. При подогревании снизу он размягчается и конвектирует, после опыта охлаждается, затвердевает и становится удобным в работе (аналогия с метаморфическими толщами).

Слоистость в образцах создавалась путем чередования в них тонких слоев сплава канифоли с машинным маслом и прослоев того же материала, к которому добавлялись масляные краски разного цвета.

- ▶ Технология изготовления образцов: охлаждение канифоли в холодильной камере до хрупкого состояния; затем канифоль дробилась до порошкообразного состояния. Потом порошок засыпался тонкими слоями в прямоугольный прибор 28x10 см. Далее он уплотнялся под прессом, нагревался (слабо) и при нагревании спекался, образуя монолитные слои.

- ▶ Прибор со слоистым образцом помещался на несколько часов в термокамеру, в которой поддерживалась постоянная температура от 65 до 80°C в разных опытах. При этом вязкость материала снижалась до 10^3 Па·с. Благодаря тому, что дном прибора служила теплопроводящая пластинка, стенки были деревянными, а сверху прибор закрывался теплопроводящей крышкой, температура на нижней поверхности образца была примерно на 5° выше, чем на верхней поверхности, что и вызывало в слоистом образце конвекцию.
- ▶ По окончании опыта образец извлекался из термокамеры и охлаждался до комнатной температуры. Структура образца изучалась в вертикальных разрезах.
- ▶ В модели возникала линейная в плане складчатость. Конвективное движение в линейной форме (в виде так называемых конвективных валов) реально. Это было выяснено позже, чем представление о конвекции в купольной форме. Теоретически, а затем и экспериментально было показано, что конвекция в линейной форме происходит, если число Рэлея $R_1(10^3) < R < R_2(10^4)$

Инверсия плотности вызвана горизонтально-однородным тепловым импульсом



Крупные линейные структурные формы и осложняющая их мелкая складчатость, возникающая в результате конвективного процесса в слоистых образцах

Ситуация с равномерным подогревом снизу

(по М.А. Гончарову и Ю.М. Горелову)

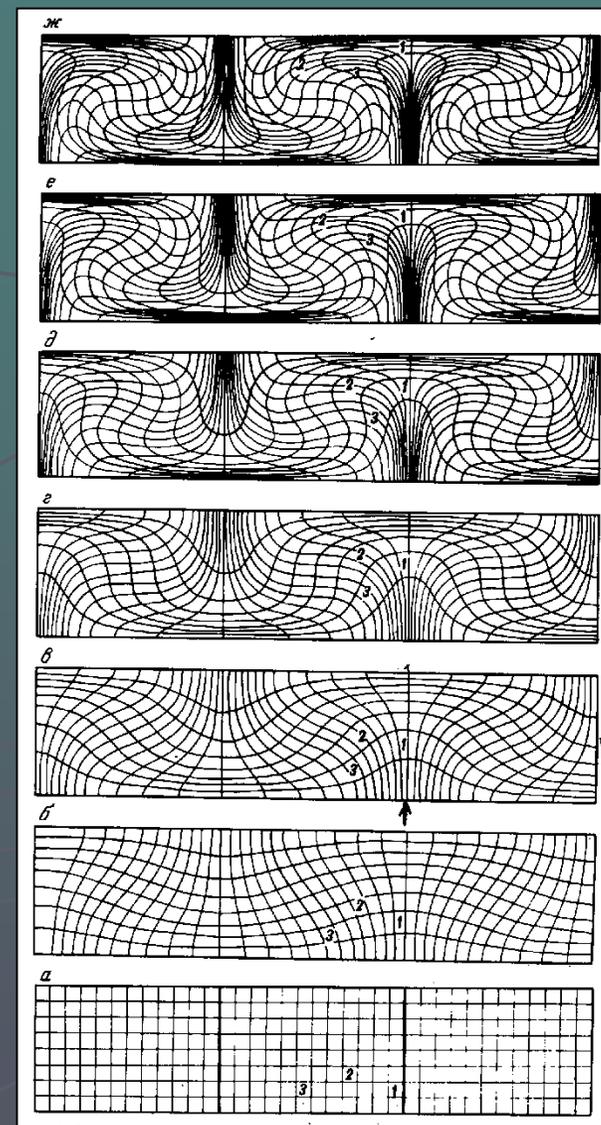
Фрагмент одной из моделей

При подогреве снизу слоистых образцов из канифоли, нагретое, более легкое вещество, поднималось вверх, более холодное и тяжелое опускалось вниз, то есть происходил **процесс конвекции**. Сформировались крупные поднятия и опускания. Одновременно происходило сжатие и растяжение тонких слоев и они деформировались, образуя на некоторых участках мелкие складки

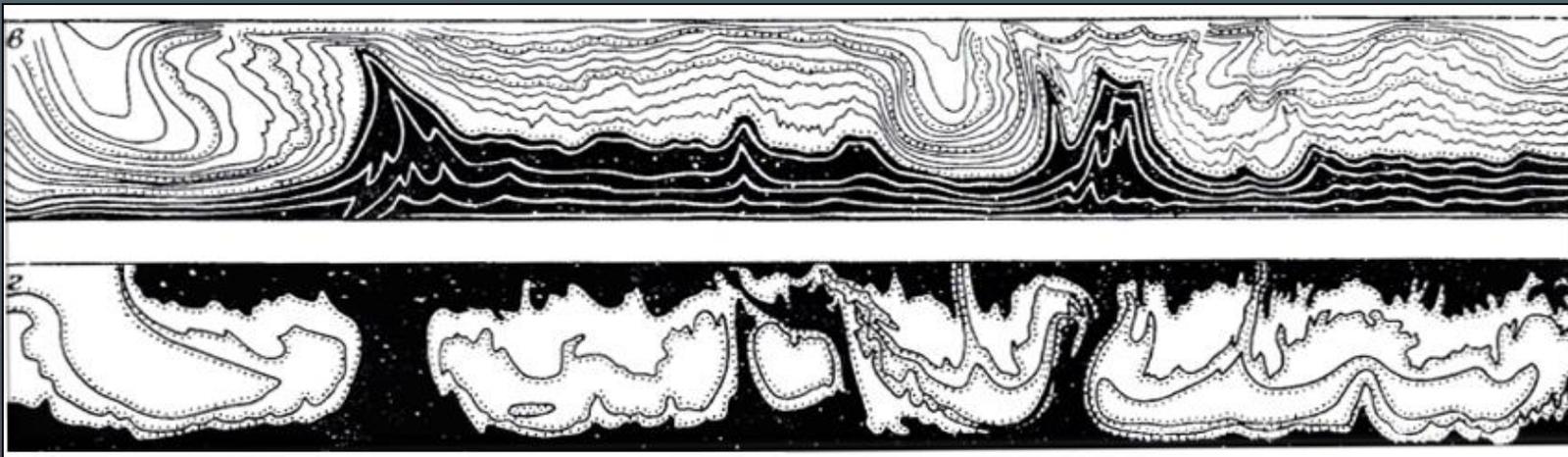


Фрагмент модели из канифоли. В центре - область поднятия, осложненная складками, и две области опускания по краям

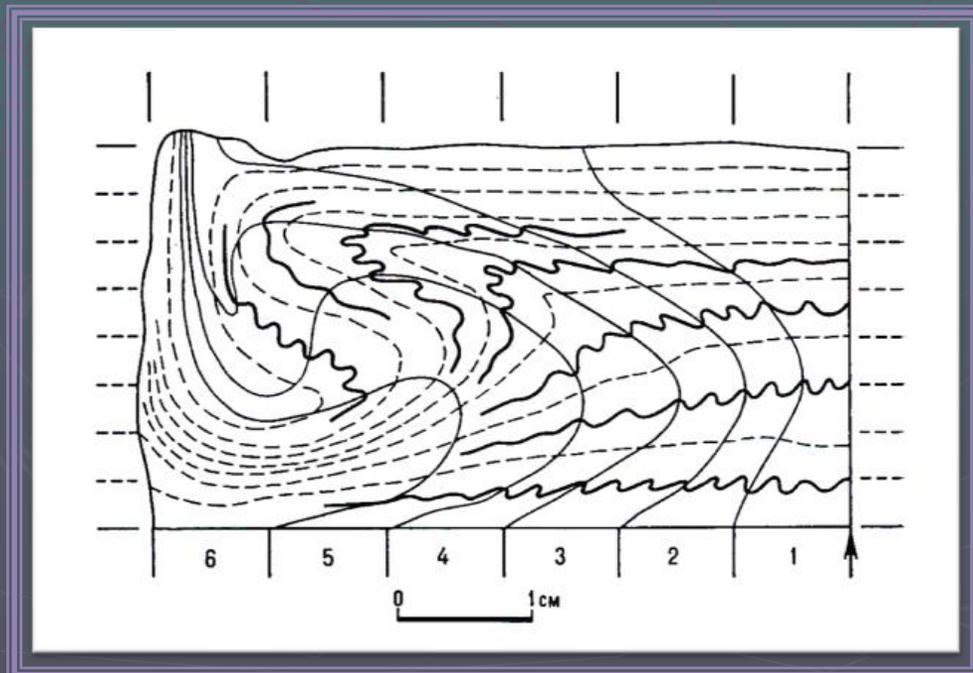
- ▶ В моделях мы видим структурные формы двух порядков. Крупные поднятия – это «конвективные «валы», которые образуются в местах восходящего конвективного потока. В разделяющих их крупных впадинах имеет место нисходящий конвективный поток.
- ▶ Мелкая складчатость осложняет крупные структурные формы и представляет собой изгибы отдельных слоев. Ее возникновение обусловлено полем конвективных деформаций. Специфика этого поля состоит в том, что в нижней части поднятий и в верхней части впадин господствует обстановка горизонтального сжатия, где и формируется складчатость общего смятия. В качестве компенсации в верхней части поднятий и в нижней части впадин осуществляется горизонтальное растяжение.
- ▶ На первом этапе модельной конвекции возникают сравнительно пологие синусоидальные формы, амплитуда которых со временем увеличивается. По мере дальнейшего роста поднятия становятся гребневидными в нижней части и коробчатыми в верхней. Дальнейшее развитие процесса ведет к грибообразному разрастанию верхних частей поднятий; нижние части впадин образуют структуру «перевернутого гриба».



- ▶ Грибообразные структуры свидетельствуют о значительных горизонтальных перемещениях в нижней и верхней частях конвектирующей толщи. Это может привести к формированию шарьяжей. Этому способствует наличие пластичных пачек. Грибообразное разрастание верхних частей поднятий воспроизводит глубинные шарьяжи пеннинского типа. «Расслаивание» же перед их фронтом верхних частей толщи можно уподобить поверхностным шарьяжам гельветского типа. (т.е. они вовсе не сползают со склонов тектонических поднятий). Конвективная концепция более перспективна, чем «гравитационный тектогенез», понимаемый в узком смысле.



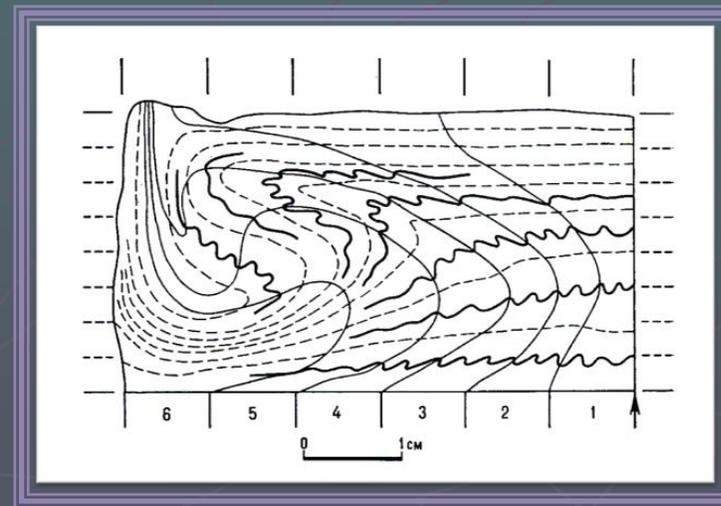
- ▶ Во всех описанных опытах нижняя и верхняя поверхности образцов были изотермическими в результате равномерного подогрева снизу. Этому в природе отвечает обстановка горизонтально-однородного теплового импульса и регионального метаморфизма.
- ▶ Однако в складчатых метаморфических (в широком смысле) поясах чаще выявляются случаи горизонтально-неоднородного метаморфизма.
- ▶ Моделирование подобной ситуации. В отличие от описанной ранее серии экспериментов дном прибора служила не сплошная алюминиевая пластина, а пластина из дерева, в середине которой была вмонтирована пластина из алюминия.
- ▶ В образце произошли конвективные движения:



Особенности конвективных складчатых деформаций при неравномерном подогреве снизу (по М.А. Гончарову и Ю.М. Горелову: *Методы...*, 1988)

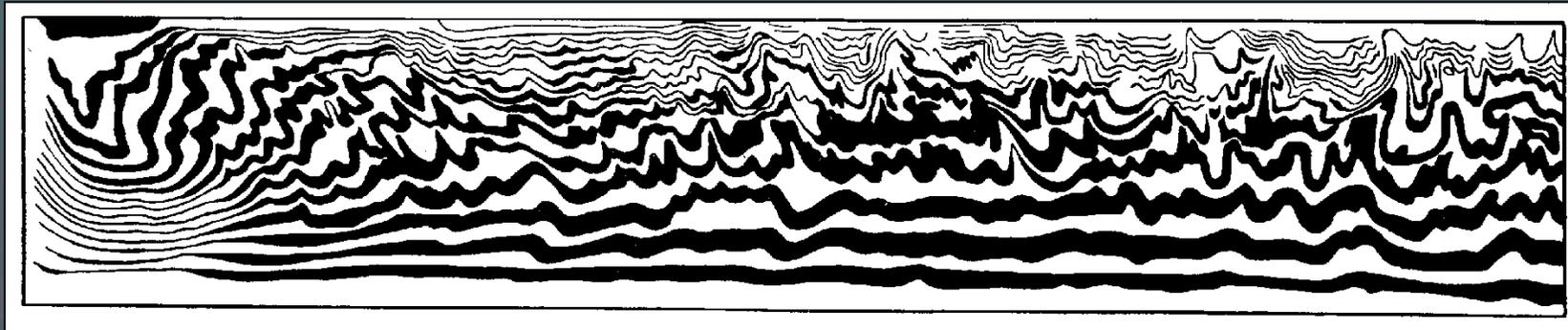
Образец симметричен.
Это только его половина!

- ▶ Сформировался линейно вытянутый конвективный вал (один!)
 - ▶ Расстояние между осями впадин и поднятия в два раза превышает мощность конвектирующего слоя (в предыдущем случае эти величины примерно примерно одинаковы).
 - ▶ Ось поднятия соответствует узкой зоне максимального прогрева образцу
 - ▶ Амплитуда горизонтальных перемещений поверхностных секций образца примерно в 4 раза превосходит амплитуду вертикальных перемещений в зоне поднятия (в принципе, без боковых стенок, он может быть гораздо больше).
 - ▶ В нижней и средней частях зоны восходящего конвективного потока имеет место горизонтальное укорочение слоистой пачки образца. Возникла складчатость.
 - ▶ На периферии сформировалась лежачая и перевернутая складчатость (арена развития тектонических покровов).
- Ниже этой зоны располагается участок, который испытывал горизонтальное перемещение в противоположном направлении.



Равномерный подогрев снизу. Увеличен контраст вязкости смежных слоев.

- ▶ (1) разница в содержании масла в сплаве составила 15%. В результате конвекции возникло одно очень широкое и пологое поднятие, ограниченное узкими краевыми впадинами. В области этого поднятия сформировалась повсеместная складчатость с пологим и ровным зеркалом.

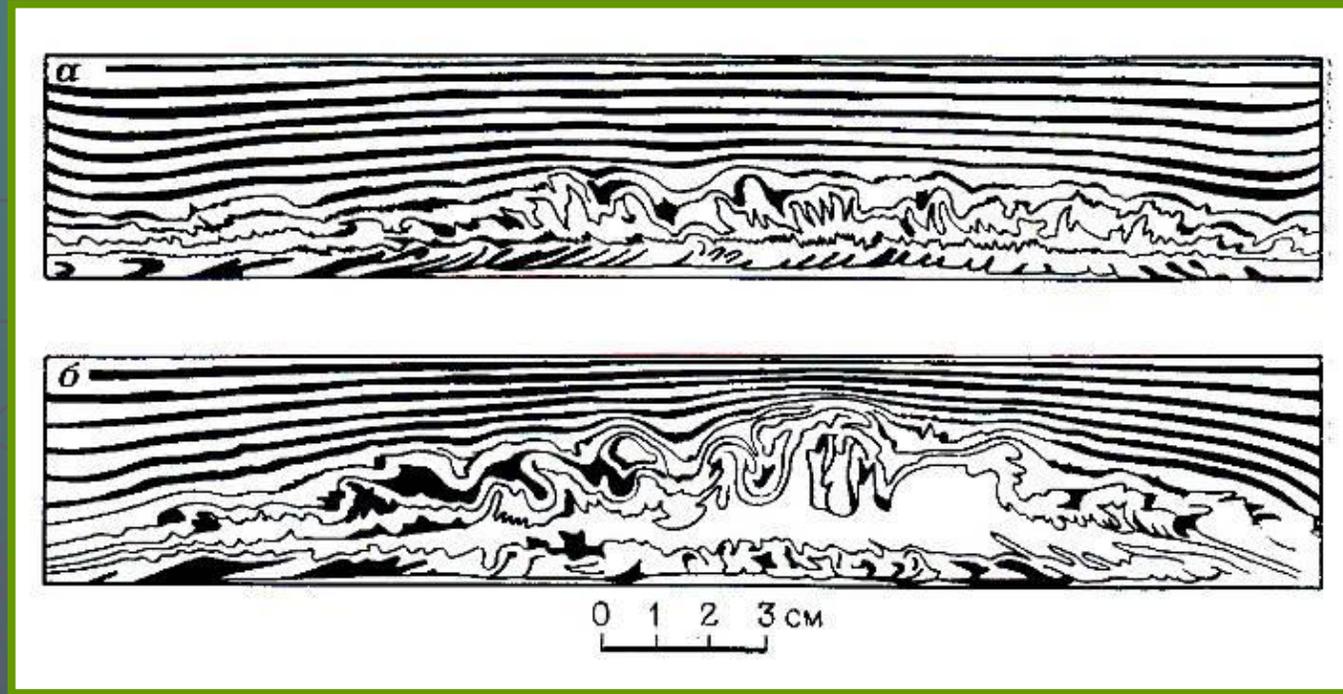


- ▶ (2) в нижней части образца имелся слой, который из-за добавления парафина имел резко пониженную вязкость. Конвекция проходила в два этапа. Сначала возникла продольная по отношению к длинной стороне прибора линейная складчатая структура. Затем нижний слой парафина внедрился в складчатую толщу в виде изометричных в плане «интрузий», имитируя аллохтонные поздне складчатые гранитные плутоны. (сравните: сближение плит (один энергетический источник); внедрение интрузий (другой энергетический источник))



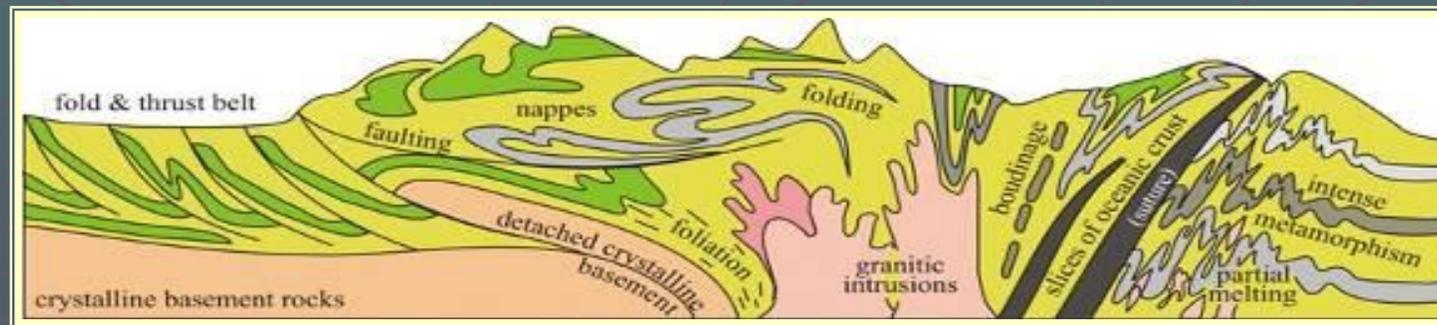
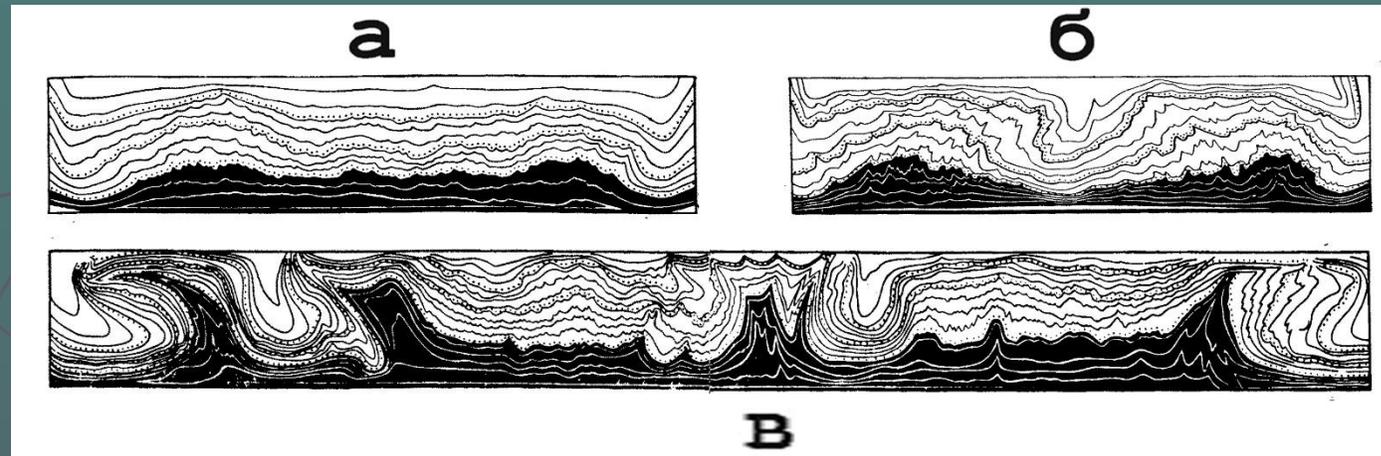
Во всех экспериментах из-за малой разности температур в подошве и кровле образцов и специфике режима прогрева (в термокамере) процесс конвекции был близок к стационарному. В природе подъем геоизотер происходит достаточно медленно, поэтому процесс конвекции должен быть нестационарным

Еще один эксперимент по моделированию конвективной складчатости



Слоистые образцы подогревались только снизу. Подъем изотерм происходил медленно. Фронт конвекции постепенно поднимался. В некоторый момент в нижней части образцов начиналась конвекция. Их верхняя половина в конвекции не участвовала. В нижней части сформировалась сложная складчатая структура при отсутствии деформаций в верхней части. Затем по мере подъема изотерм, в конвекцию вовлекается и верхняя часть образцов. В этой части возникает более простая складчатая структура. Общая структура напоминает «фундамент» и «чехол». (по В.Г. Талицкому)

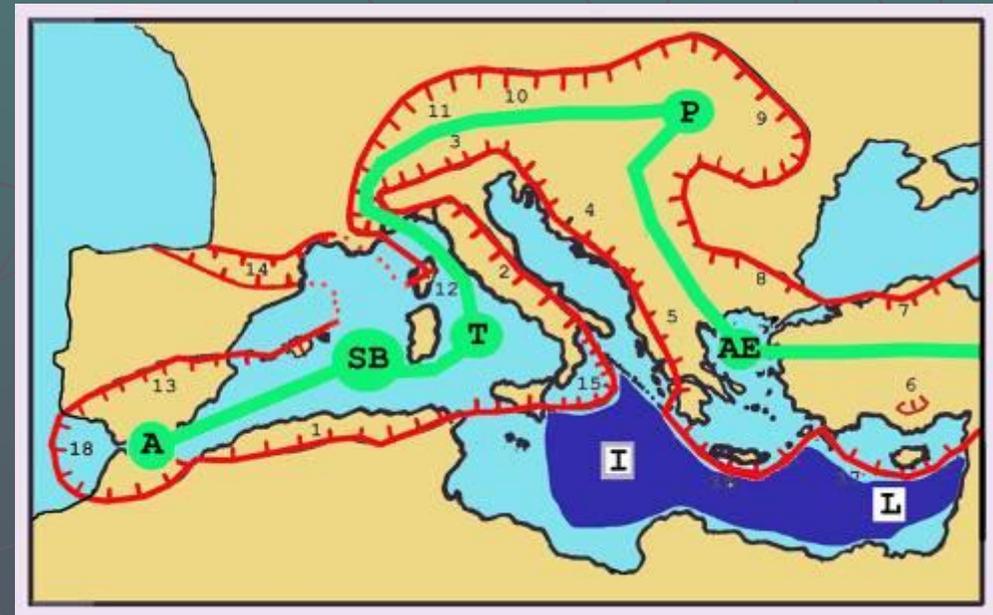
Возможно, тепловая конвекция в земной коре играет заметную роль в формировании структуры складчатых сооружений



Альтернативные гипотезы формирования складчатых областей: (1) действие на осадочную толщу внешних сил (например «жестких плит»). (2) причина складкообразования – внутренние силы, которые порождаются специфическим физическим состоянием толщи. В первом случае в ходе экспериментов прибегали к действию различных искусственных факторов.

Структуры более низкого ранга

Возможно, что причиной формирования новообразованных впадин Средиземноморья и современной конфигурации окружающих центробежно-вергентных складчато-покровных сооружений является мантийный диапиризм, возникающий вследствие инверсии плотности в геосфере астеносфера+литосфера на фоне увеличения теплового потока.



(по М.А. Гончарову, 2013)

Тепловая конвекция **двух рангов**

(эксперимент А.Г. Кирдяшкина, 1989)

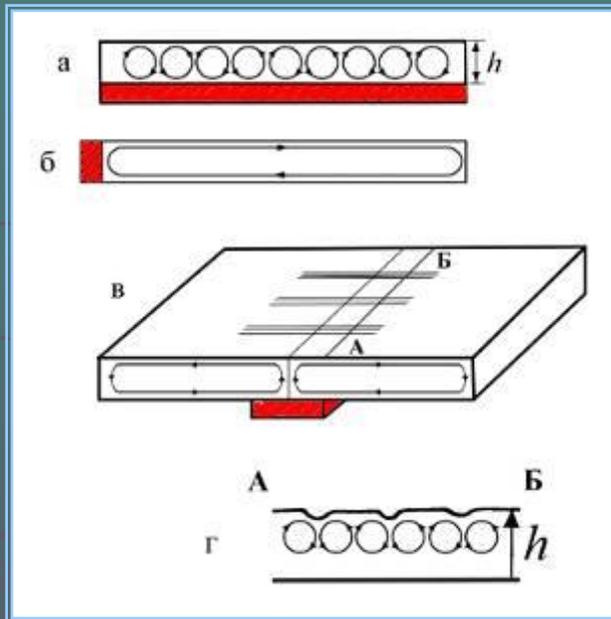
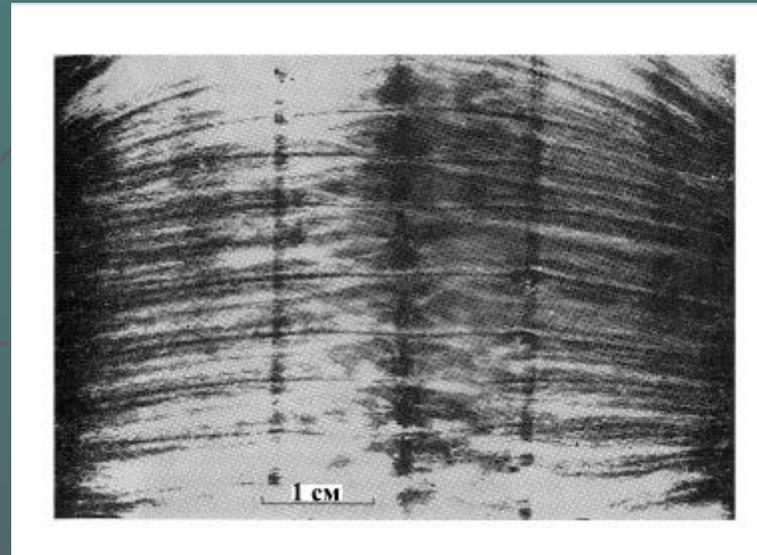


Схема опытов



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

а – тепловая конвекция в виде линейных в плане валов и впадин («валиковая»), возникающая при равномерном подогреве снизу; ячейки квадратной формы соизмеримы с мощностью конвектирующего слоя (h). **б** – тепловая конвекция в форме удлинённой по горизонтали ячейки при подогреве сбоку. **в** – тепловая конвекция в виде сочетания двух крупных вытянутых по горизонтали ячеек в слое мощностью h (как в случае «б») с системой поперечных мелких ячеек квадратной формы (как в случае «а») при подогреве снизу в линейной в плане зоне. **г** – поперечный разрез по линии АБ. Косой штриховкой обозначены зоны подогрева.

Использовался глицерин, нагревающие и охлаждающие теплообменники

Convection

