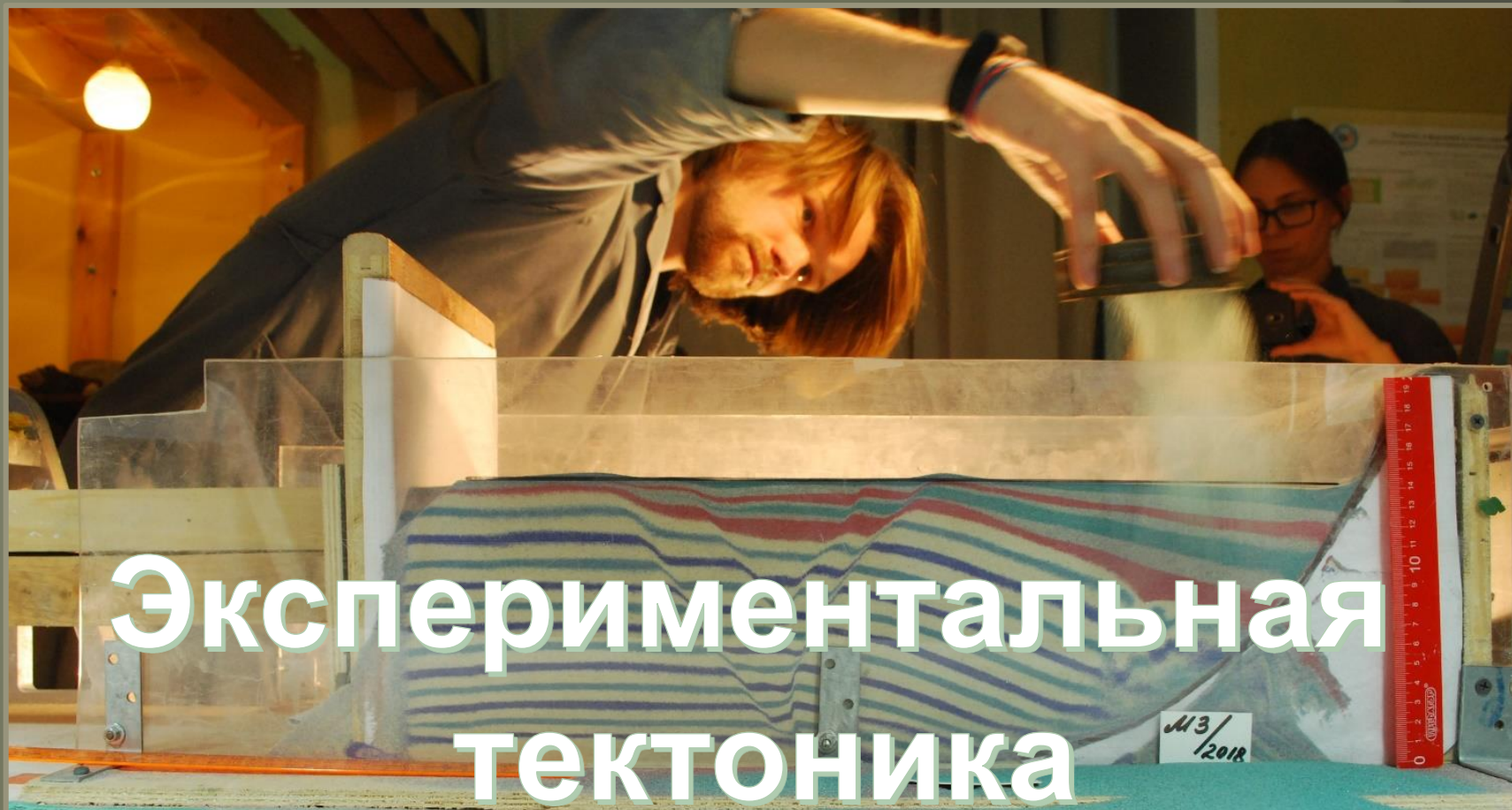


Геологический факультет МГУ
Кафедра динамической геологии
Лаборатория тектонофизики и геотектоники



Экспериментальная ТЕКТОНИКА

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

Лекция 2

- Примеры аналогового физического моделирования
- Принципы аналогового физического моделирования
- Условия подобия
- Техника аналогового физического моделирования

Примеры аналогового моделирования на эквивалентных материалах

Моделирование структур, возникающих при конвекции

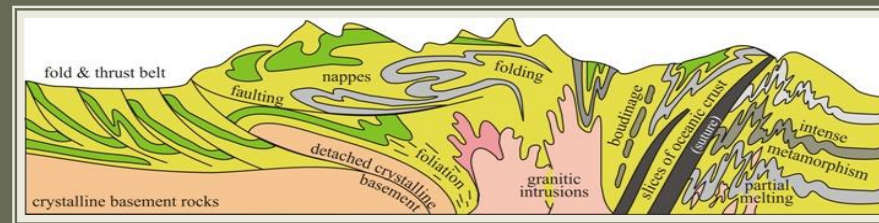
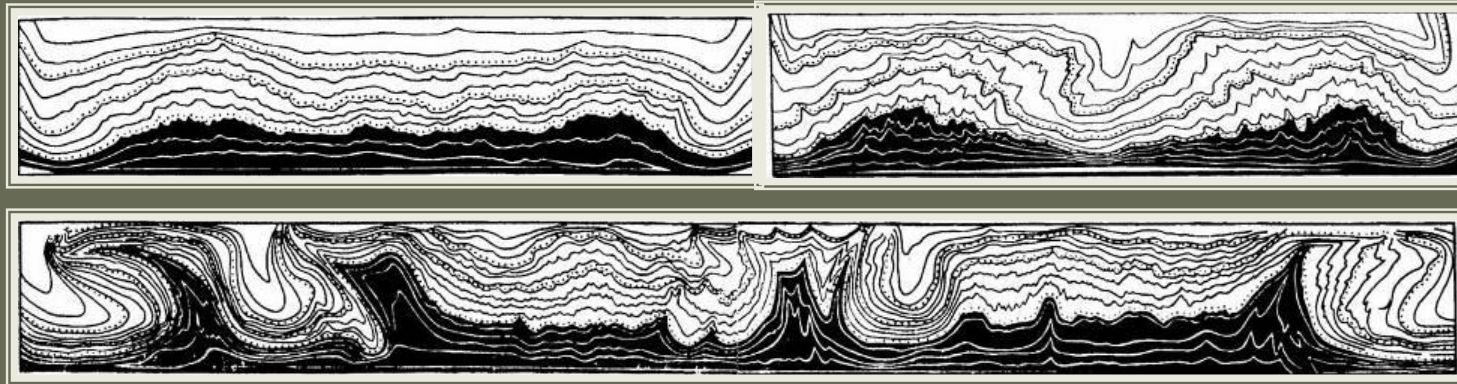
При подогреве снизу слоистых образцов из канифоли, нагретое, более легкое вещество, поднималось вверх, более холодное и тяжелое опускалось вниз, то есть происходил **процесс конвекции**. Сформировались крупные поднятия и опускания. Одновременно происходило сжатие и растяжение тонких слоев и они деформировались,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



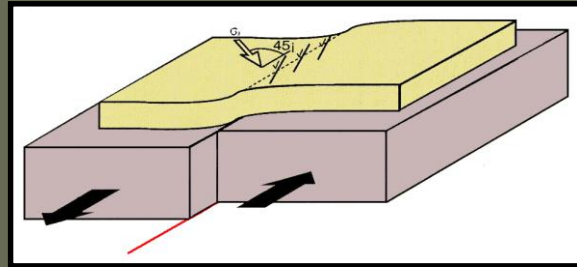
Если деформация вызывается силой тяжести, то физическое подобие устанавливается автоматически

*Фрагмент модели из канифоли.
В центре - область поднятия,
осложненная складками, и две области
опускания по краям (эксперимент М.А.
Гончарова и Ю.М. Горелова)*

Продольные и поперечные разрезы через модель, имитирующую **широкую складчатую зону**, состоящую из крупных линейных форм и осложняющей их мелкой складчатости. Возникла в результате конвективного процесса в образцах из слоистой канифоли при подогреве снизу



Моделирование структур, возникающих в зоне сдвига



**Схема
эксперимента**

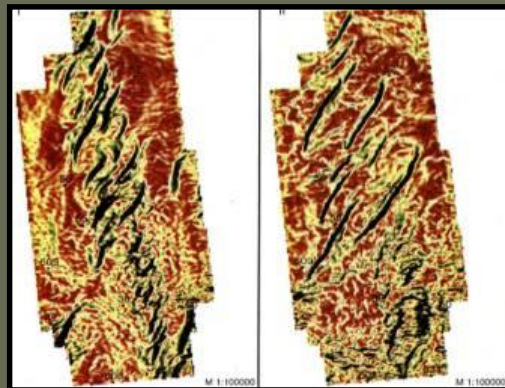


Прибор



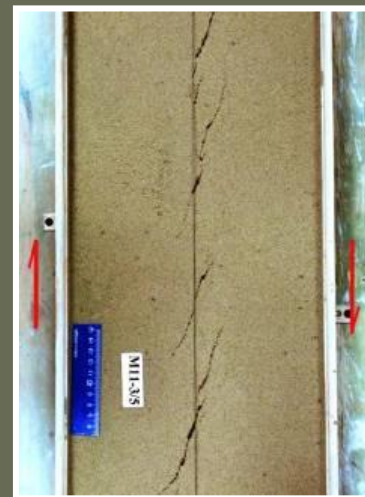
Материал – «эквивалентный», т.е такой, который за время моделирования в лаборатории деформируется так же, как горные породы за огромное геологическое время. Это влажная глина, силикон, песок и др.

Примеры экспериментальных и природных структур в зонах сдвига

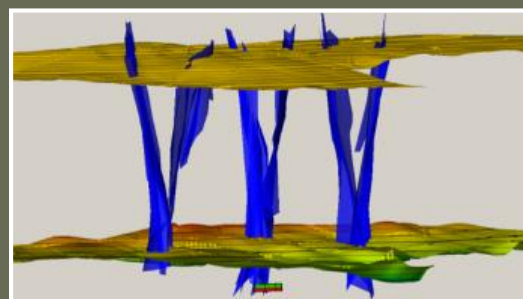
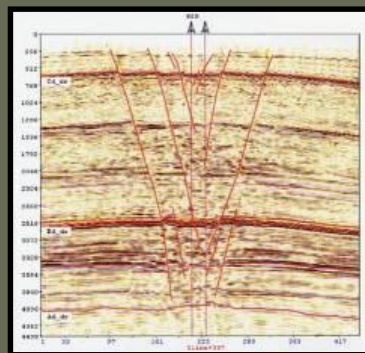


Зоны сдвигов по геофизическим данным в плане (Западная Сибирь)

Сколы Риделя в природе и эксперименте



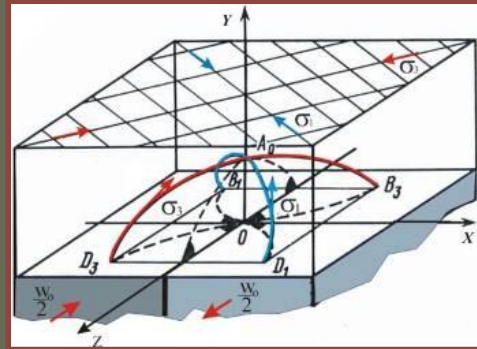
Эксперимент.
Модельный материал-песок



Структуры цветка в природе и эксперименте



Математическое и физическое моделирование неоднородного сдвига



Математическое моделирование

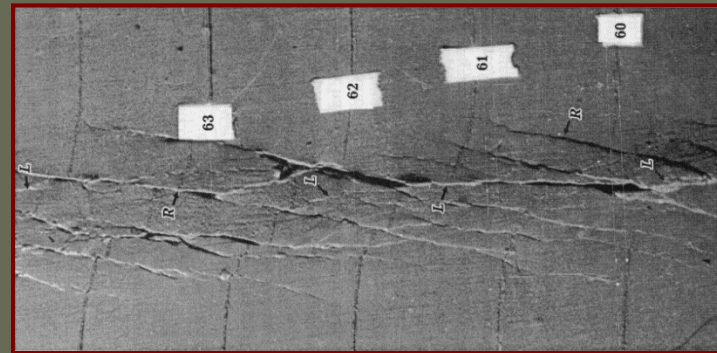
А. Траектории осей главных напряжений σ_1 и σ_3 (синяя и красная линии) внутри слоя. Модель отражает начало процесса деформации (Ребецкий, Михайлова, 2011)



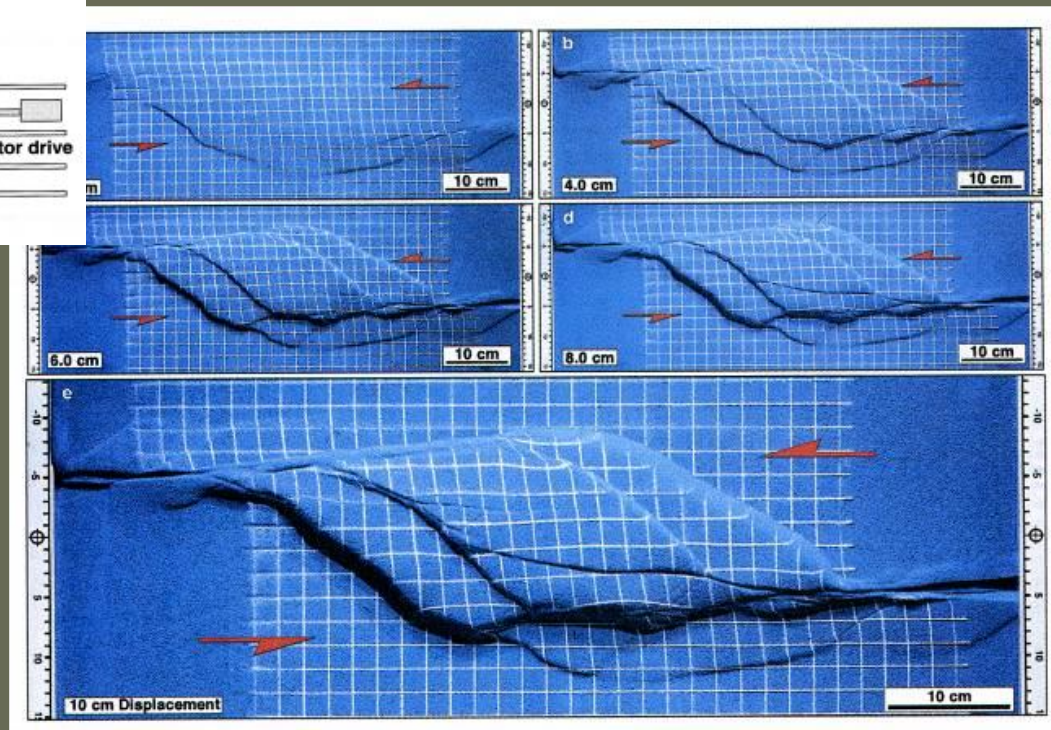
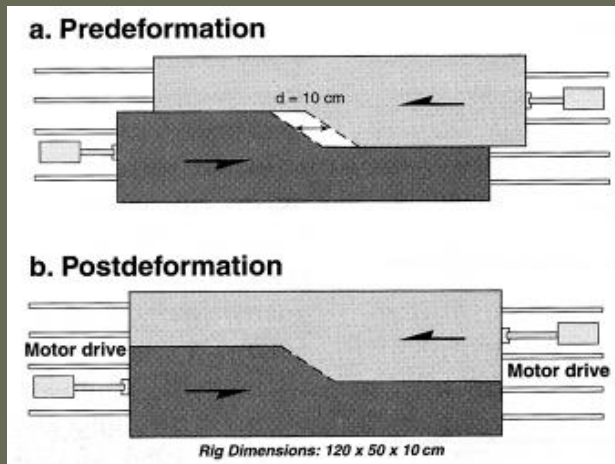
Б. Полосы локализованной деформации вблизи поверхности модели (Стефанов, 2013)

Физическое (аналоговое) моделирование

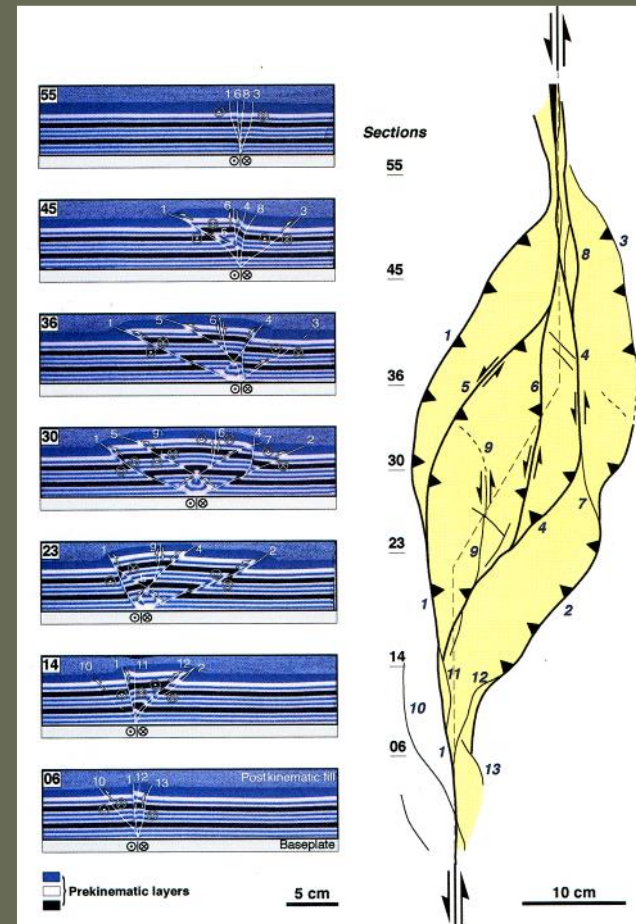
Завершающая стадия развития сдвиговой зоны Риделя. Видны трещины R, P и L. (Эксперимент С.А. Борнякова и В.Б. Кобылянского).



Моделирование более сложных сдвиговых ситуаций (транспрессия)



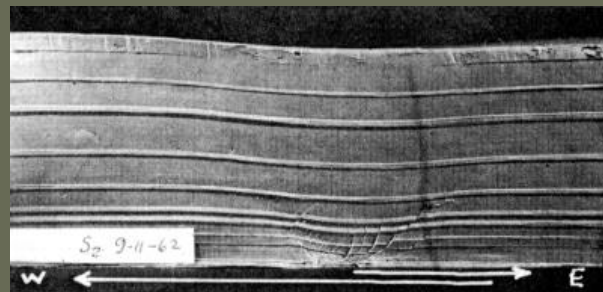
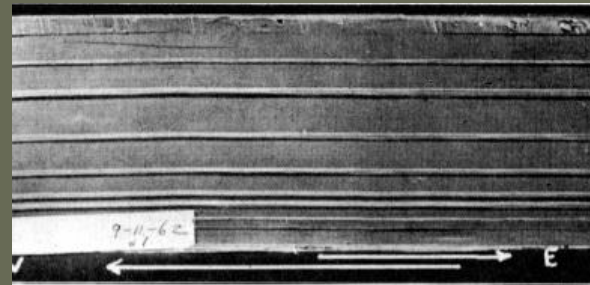
(McClay & Bonora, 2001)



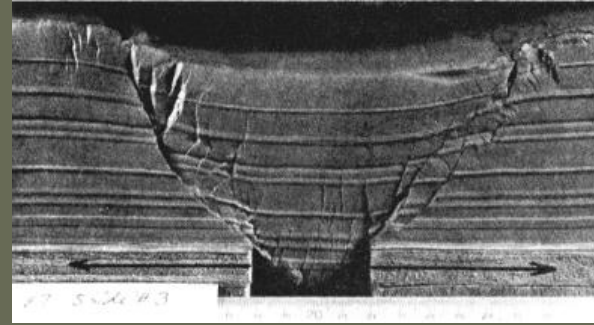
(McClay & Bonora, 2001)

Аналоговое моделирование обстановки растяжения

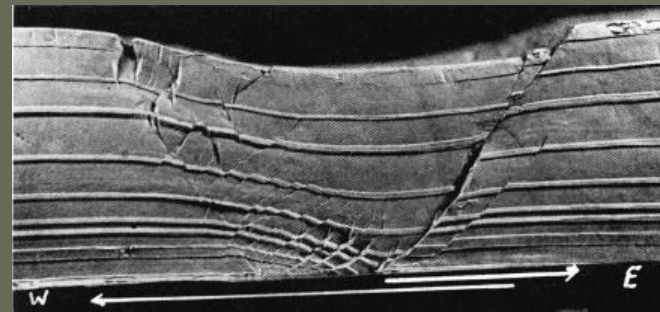
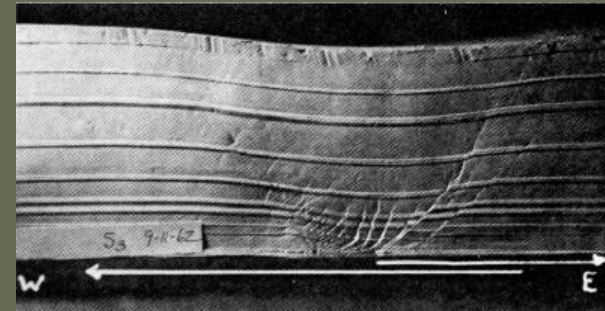
Моделирование грабена с помощью раздвигающихся пластин.
Эквивалентный материал – влажная глина (Э. Клоос, 1968)



А



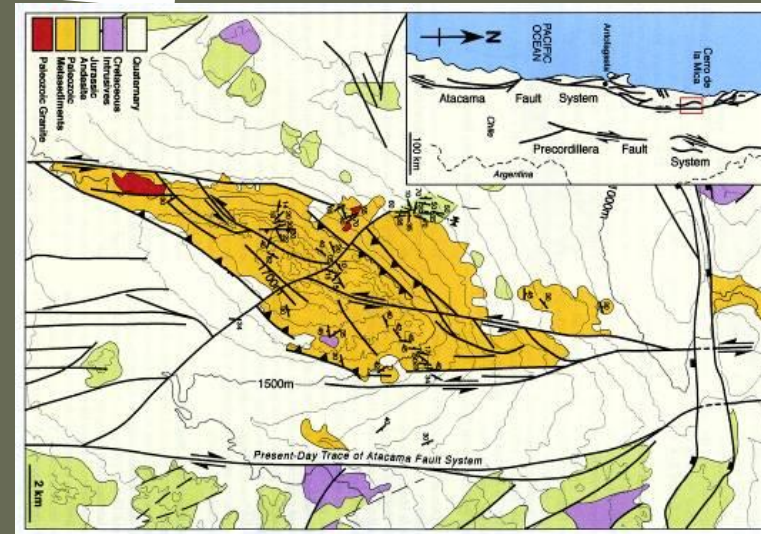
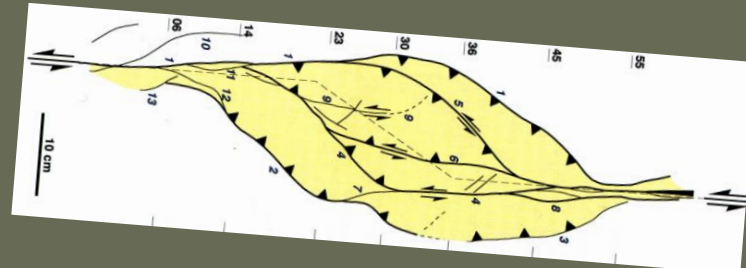
Б



В приведенных примерах был задан тот или иной **механизм деформации**. Изучались следствия этих физических механизмов. В таких экспериментах можно наблюдать развитие процесса формирования структур во времени, оценить параметры возникающих структур.

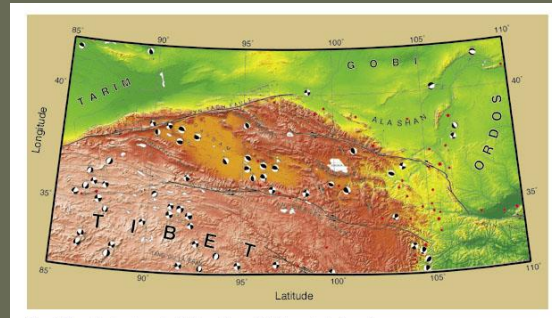
Иными словами решались **прямые задачи**. Обычно устойчиво повторяющиеся в таких моделях структуры сопоставляются с реальными объектами и отыскиваются аналоги с учетом наибольшего числа важнейших коррелирующихся параметров. На основании близких модельных аналогов выбирается гипотеза о механизме образования того или иного типа структур. Затем может моделироваться образование конкретных структур определенного типа с учетом их индивидуальных особенностей и истории развития. По мнению В.Г. Гутермана и А.В. Михайловой, именно такая последовательность тектонофизического моделирования представляется наиболее эффективной.

Корреляция результатов экспериментов с природными структурами



(McClay & Bonora, 2001)

Моделирование региональных структур

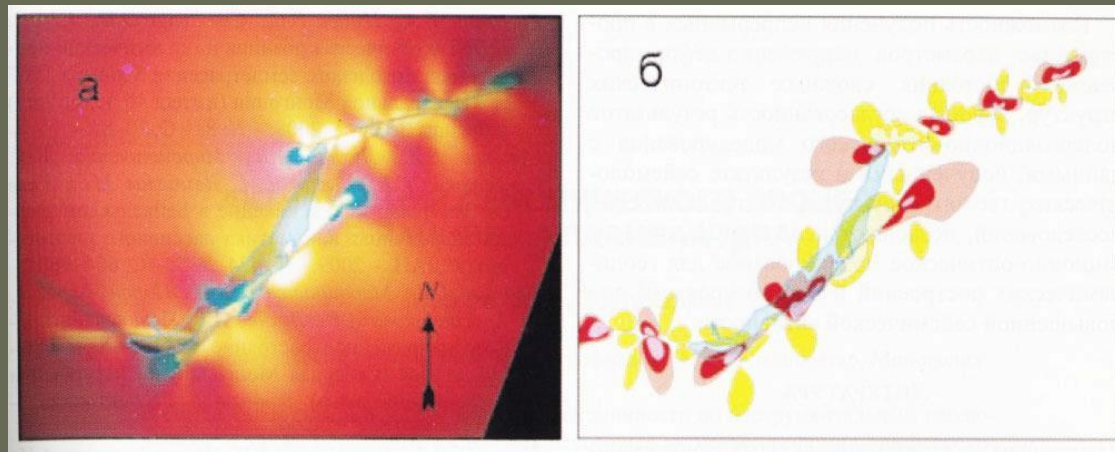


<https://str.llnl.gov/str/Ryerson.html>

Пластилиновые модели, имитирующие деформации вследствие Индо-Азиатской коллизии. Восточная сторона остается в виде свободной границы. Смещения указывает на сдвиговую кинематику разрывов.

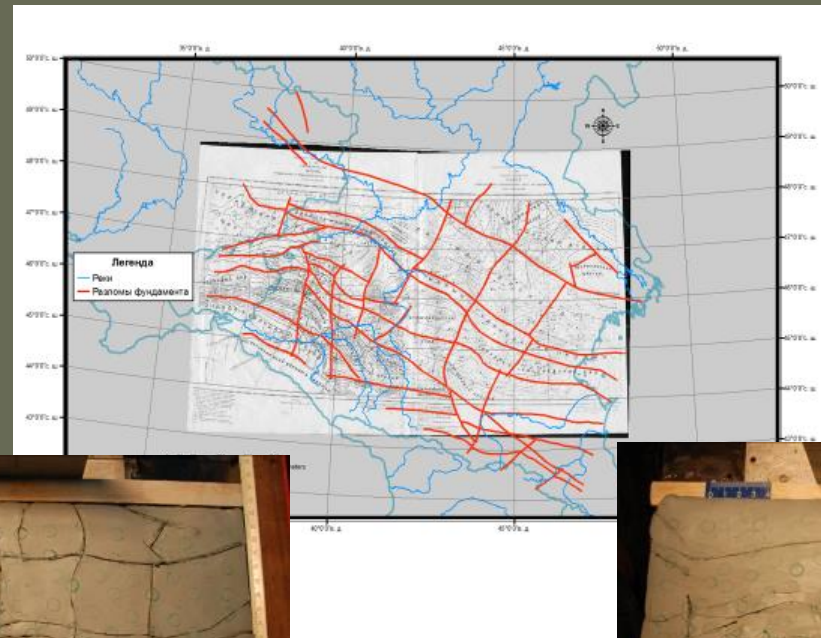
Изучение напряженного и деформированного состояния конкретных регионов

Изучение напряженного состояния методом поляризационно-оптического моделирования
(не относится к аналоговому моделированию)



Результаты поляризационно-оптического моделирования напряженного состояния деструктивной зоны Байкальской рифтовой системы и их интерпретация. Цветом показаны области концентрации касательных напряжений (по А.И. Мирошниченко, 2010)

Метод количественного изучения деформации путем аналогового моделирования

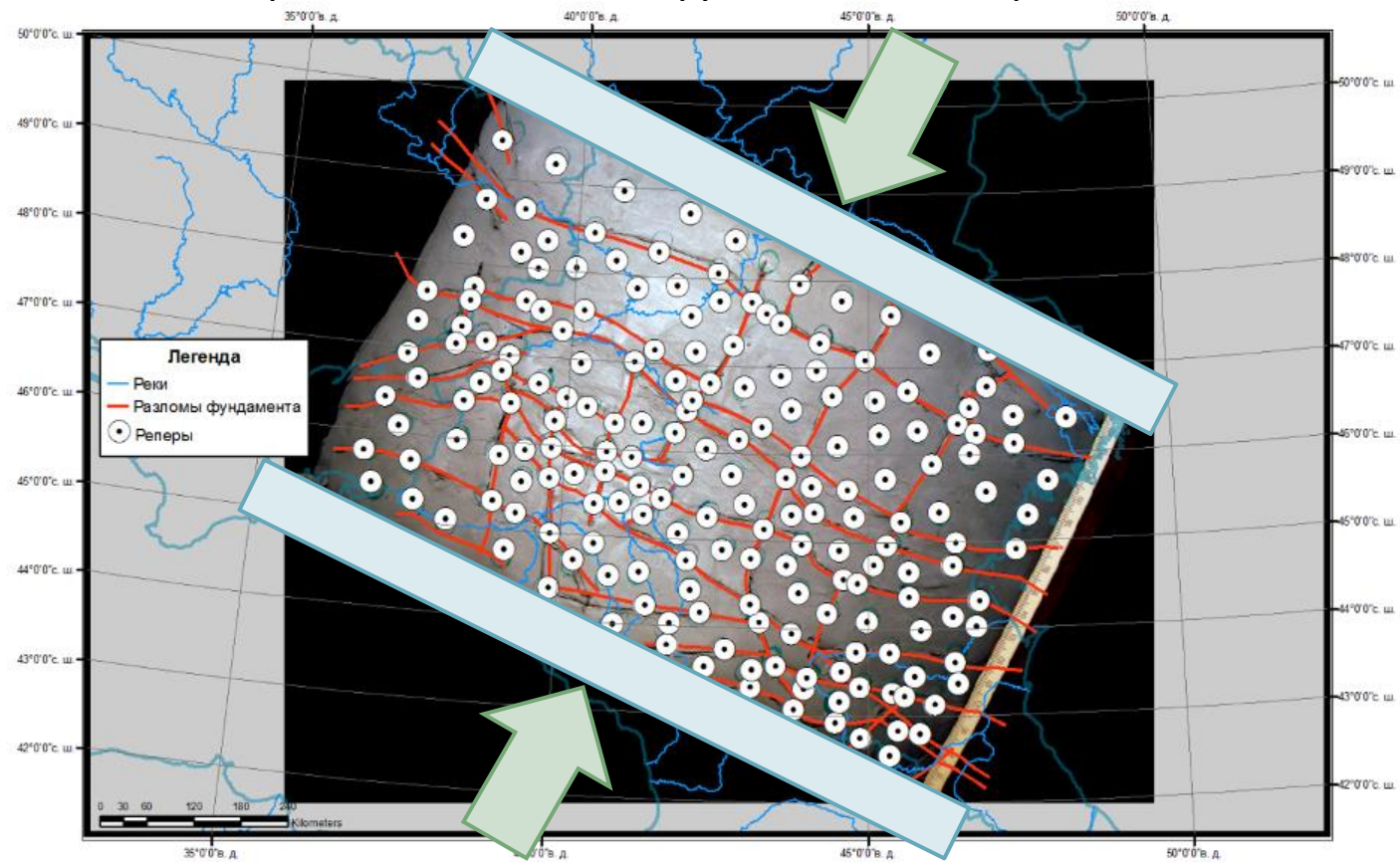


*Карта поверхности
фундамента
Скифской плиты*

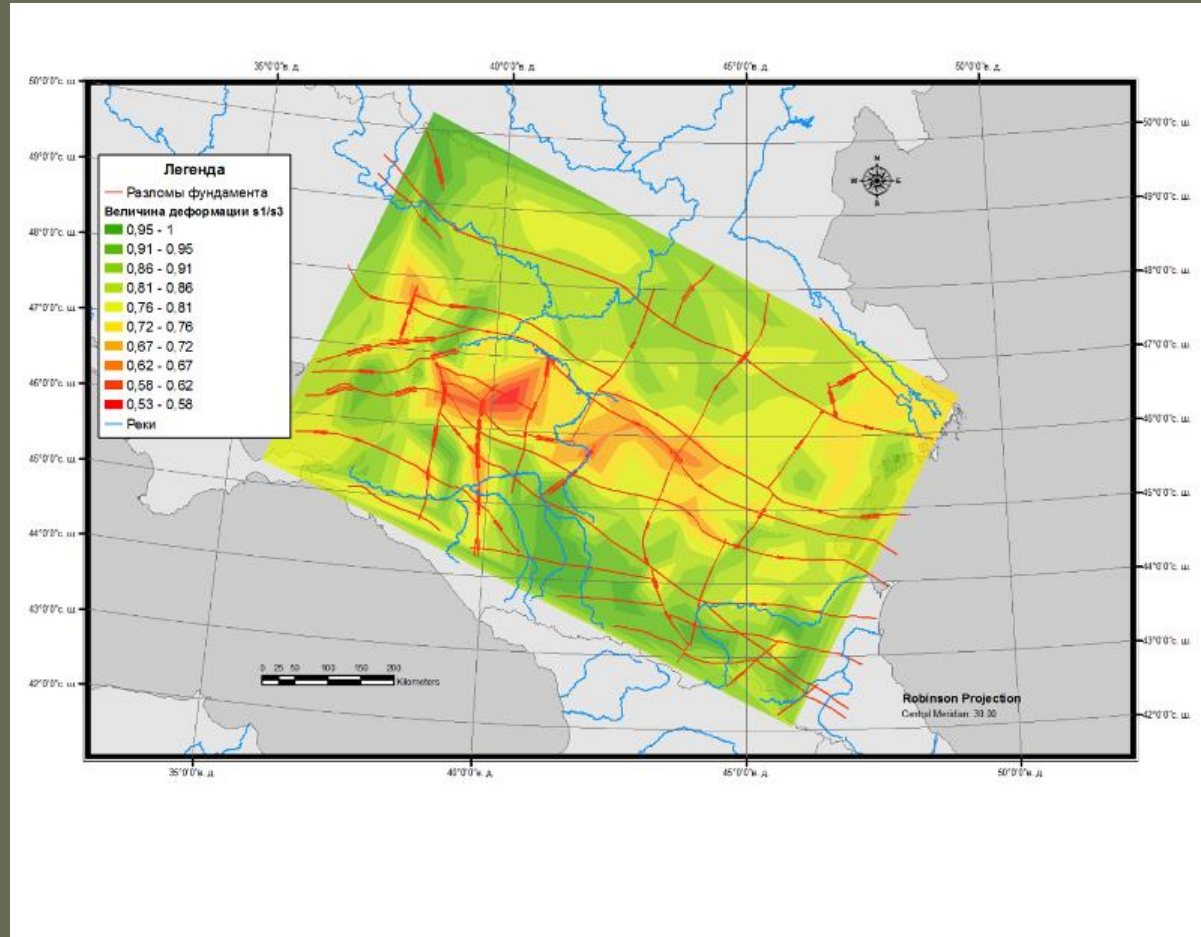


Моделирование деформаций фундамента Скифской плиты (по В.А. Зайцеву)

Тектонофизическая модель фундамента Скифской плиты



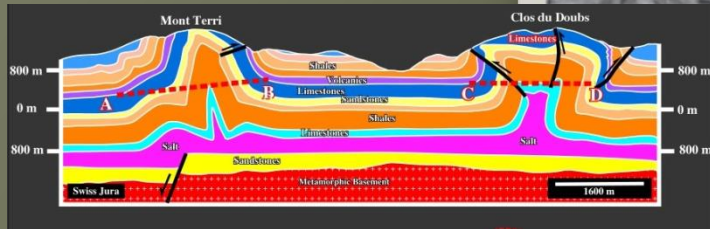
Карта деформированности фундамента Скифской плиты (при 15%сокращении)



Первые эксперименты. Развитие методологической базы. Техника моделирования

- Уже в первой половине XIX в делались первые попытки воспроизвести деформации горных пород на искусственных моделях, чтобы таким образом лучше понять, как они возникают. Но первоначально исследователи пытались получить лишь внешнее подобие формы структуры, не заботясь о том, какой материал используется для моделирования, т.е. воспроизведение самого процесса деформации, подобному природному, отодвигалось на второй план.
- Эпизодически эксперименты по физическому моделированию природных структур продолжались и в течение последующих 100 лет, но опыты выполнялись без специальной теоретической и экспериментальной базы и служили, в основном, для иллюстрации той или иной тектонической идеи.

Прежде всего, необходимо отметить работы Дж. Холла, К. Ляйеля, Дж. Добрэ, А. Фавра, Ф. Пфаффа, Г. Форчхеймера, Г. Скардта, Т. Рида, Г. Кеделя и других.



Генри Кедель, 25 января 1887 года

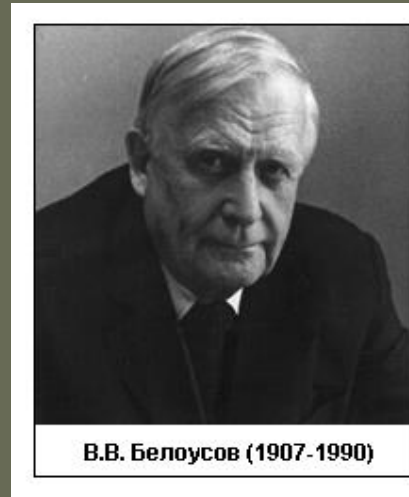
Пример Юрских гор

Только в первые десятилетия XX в. наметилась тенденция к разработке **теории физического подобия** применительно к тектоническому моделированию. К этому же времени относятся и первые эксперименты, в которых проявилось стремление сознательно следовать принципам физического подобия между моделью и природными тектоническими деформациями.

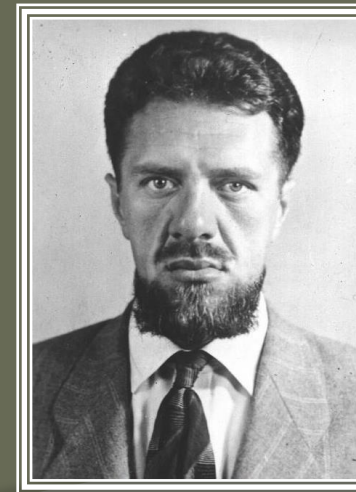
В качестве примера можно привести эксперименты Г. Клооса, Э. Клооса, В. Риделя и других.

Однако лишь в послевоенные годы моделирование стало занимать заметное место среди методов структурной геологии.

Методологическая база экспериментальной тектоники, прежде всего в виде элементов подобия, стала закладываться в 30-40 годы XXв. Начало систематическим экспериментально-тектоническим исследованиям в **нашей стране** положено в 1944г. В.В.Белоусовым, а оформление научного тектонофизического направления можно связать с появлением основополагающих идей М.В. Гзовского



В.В. Белоусов (1907-1990)



М.В. Гзовский (1919-1972)

ПРИНЦИПЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

(по М.В. Гзовскому)

- Принцип подобия моделей реальным объектам. Результаты испытания моделей можно использовать при рассмотрении природных объектов только в том случае, если они подобны. Анализ подобия необходим при каждом испытании моделей.
- Принцип избирательности моделей (селективности) относительно процессов, происходящих в природных объектах. Модели, подобные объектам в отношении изучаемых процессов, не должны и могут не быть подобными в отношении многих других второстепенных и не существенных для нас явлений.
- Принцип раздельного изучения на моделях (сепарации) тех существенных факторов, которые в природных объектах действуют совместно. Для четкого определения роли каждого фактора в исследуемом процессе модели нужно испытывать сериями, в каждой из которых следует последовательно изменять только один фактор, сохраняя действия остальных постоянными. После раздельного изучения нужно испытывать сложные модели, подверженные воздействию совокупности ранее исследованных факторов.
- Принцип последовательных приближений (аппроксимации) к полному подобию моделей и природных объектов.... Степень подобия моделей в ходе исследования должна непрерывно повышаться.
- Принцип статистической обоснованности заключений о результатах испытания моделей. Выводы, получаемые путем испытания моделей, являются чисто эмпирическими, поэтому их достоверность и точность должны оцениваться и проверяться статистически.

Принцип подобия моделей природным объектам

- Физические явления и объекты считаются подобными, если они обладают геометрическим подобием и при этом поля всех одноименных физических переменных соответственно подобны (полем физической величины называют совокупность ее значений во всех точках изучаемого пространства).
- **Подобие полей физических переменных** заключается в том, что величина какой-либо переменной в любой точке одного объекта равна величине той же переменной в сходственной точке другого объекта, умноженной на постоянный коэффициент – множитель подобия
- Сущность метода выявления условий подобия (по М.В. Гзовскому) - эти условия выводятся из дифференциальных или интегральных уравнений, описывающих поля физических переменных величин, характерных для изучаемого процесса
- Основной задачей при установлении условий подобия должен быть выбор исходных уравнений, описывающих главные закономерности деформаций и разрушений горных пород
- Общие закономерности деформирования и разрушения, экспериментально установленные для весьма различных материалов (в том числе некоторых горных пород) кладутся в основу теоретического вывода условий подобия при моделировании тектонических явлений
- Однако в последнее время к базовым идеям традиционной механики деформируемого твердого тела добавились методы, подходы и идеи физической мезомеханики материалов и нелинейной динамики (нагружаемая среда рассматривается как нелинейная иерархически организованная динамическая система, эволюция которой осуществляется по законам нелинейной динамики)

УСЛОВИЯ ПОДОБИЯ

Пример (описан в Гончаров, Талицкий, Фролова Введение в тектонофизику, 2005):

$$C_{\eta} = C_l \times C_t \times C_{\rho} \times C_g; \quad C_i = \frac{i_m}{i_n}$$

Условие физического подобия при физическом моделировании медленных деформаций

Эта формула подходит, например, для моделирования длительного (сотни тысяч и миллионы лет) складкообразования.

Можно принять:

$$C_l \sim 10 \text{ см}/10 \text{ км} = 10^{-5}$$

$$C_t \sim 1 \text{ час}/10^6 \text{ лет} \approx 3,6 \times 10^3 \text{ сек}/(3 \times 10^7) \times 10^6 \text{ сек} \approx 10^{-10}$$

$$C_{\rho} \sim C_g \sim 1$$

Тогда по формуле (2.1.1) получим:

$$C_{\eta} \sim 10^{-15},$$

откуда, при $\eta_n \sim 10^{18} \text{ Па} \cdot \text{с}$ (об этой оценке речь пойдет позже),

получим вязкость модели: $\eta_m \sim 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Такой вязкостью обладают, например, жидкая глина и машинное масло.

Вот это и может служить в качестве **эквивалентного материала**.

Для соблюдения условий подобия
нужна оценка значений параметров
процесса формирования природных структур.

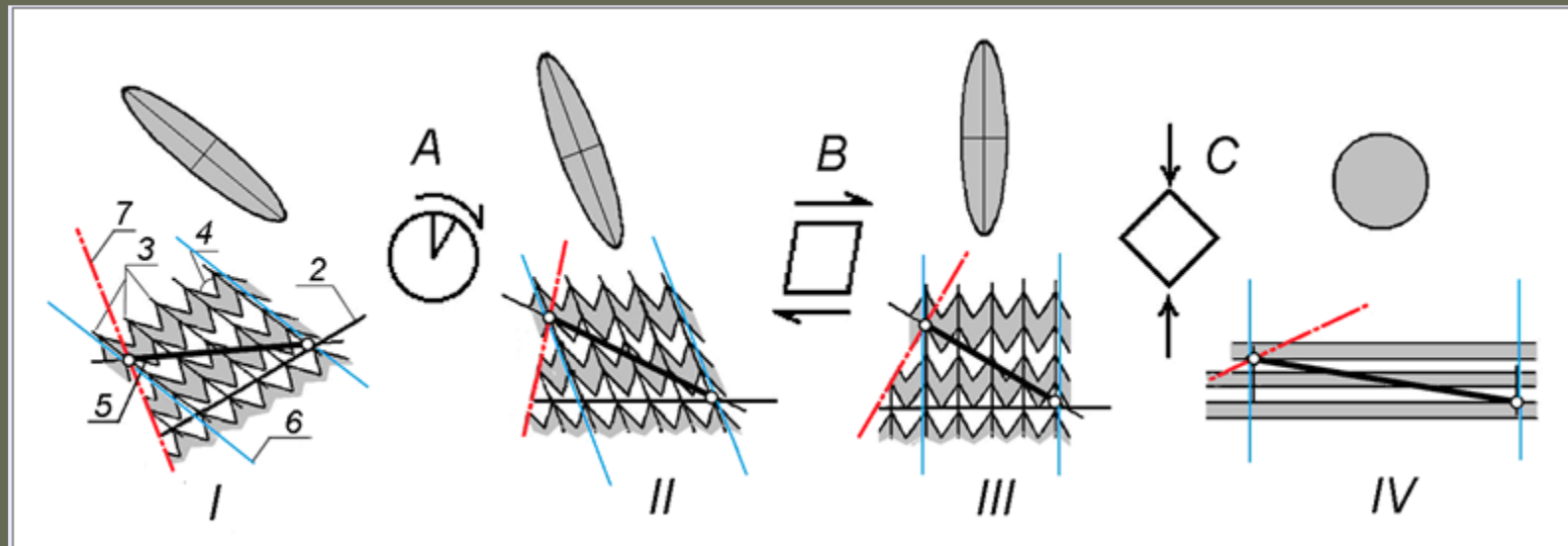
Главные параметры:

1. Размер структур.
2. Время их формирования.
3. Деформационные свойства среды их образования,
в первую очередь вязкость и предел прочности.
4. Величина тектонических напряжений.

Точнее всего можно оценить *размер* структур и вмещающих их геологических тел.

Даже если в процессе деформации их размер существенно изменился, то разработан комплекс методов реконструкции первоначальных размеров.

Одной из последних, наиболее совершенных разработок такого рода является методика, предложенная Ф.Л. Яковлевым [Яковлев, 1997, 2002, 2017].



«Обратные» реконструирующие деформации участков геологического разреза [Яковлев, 2017].

Менее определенной является оценка *длительности* формирования структур.

Например, для складчатости общего смятия обычно принимается оценка в *сотни тысяч и миллионы лет*, основанная на разнице в абсолютном возрасте осадочных толщ, разделенных угловым несогласием.

Однако нет никакой уверенности в том, что данный процесс не является значительно более, на один-два порядка, кратковременным.

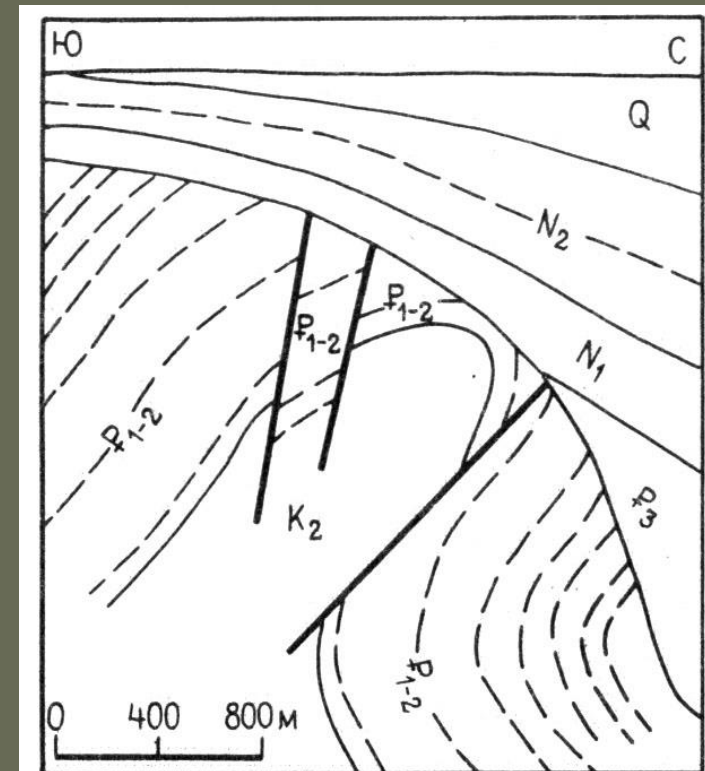


Рис. 22. Антиклиналь в отложениях верхнего мела — эоцена, несогласно перекрытая олигоценовыми и миоценовыми отложениями (северо-западная часть Кавказа).

По В.В. Белоусову, 1986.

Непросто обстоит дело с *вязкостью* и *пределом прочности* среды.

О вязкости подвергающихся деформации больших объемов горных пород говорить не приходится. Геологическая среда является неоднородной и иерархически построенной. Во время деформационного процесса «работают» разные структурные уровни этой среды. Можно привести пример со складкообразованием.

В природных горных толщах вязкость и прочность изменяются с глубиной под влиянием соответствующего изменения температуры и давления, а также из-за влияния присутствующих в толщах флюидов. Это тоже вносит свою долю в неопределенность оценки этих параметров

Никакими лабораторными исследованиями «эффективную» вязкость природной деформируемой среды установить нельзя. То же относится и к прочности. (Вспомните также, что существует «мгновенная» и длительная прочность).

Например, оценка вязкости и прочности верхней мантии, основанная на оценке этих параметров у главного породообразующего минерала – оливина – является заведомо завышенной

Хуже всего обстоит дело с оценкой величины природных *тектонических напряжений*.

Эти оценки у разных авторов различаются на три и более порядков.

Все эти и другие аргументы приводят к весьма скептической оценке возможности точного соблюдения условий подобия

$$C_{\eta} = C_l \times C_t \times C_{\rho} \times C_g$$

Условие подобия для моделирования разрывной (сдвиговой) деформации

$$\tau_s / \rho g h = \text{const},$$

где τ_s – предел прочности на сдвиг, ρ – плотность слоя,
 h – толщина слоя, g – ускорение свободного падения
[Shemenda, 1983]

Невозможность соблюдения условий подобия

- Техническая и принципиальная невозможность задания в модели адекватной – фрактальной, грубодискретной, самоорганизованной – структуры среды
- Нет сведений о размере тектонических сил и скорости деформации. Не знаем параметров природной среды. Кроме того, такие фундаментальные свойства как вязкость и прочность в применении к большим деформируемым объемам горных пород оказываются неоднозначными
- Невозможность по объективным и субъективным причинам соблюсти граничные условия
- Невозможно учесть отношения между деформирующими тектоническими напряжениями и литостатической нагрузкой (пример со сколами Риделя)

Автоматическое выполнение условий подобия во многих случаях физического моделирования (по М.А. Гончарову)

В ситуации неопределенности оценок главных параметров природного структурообразования остаются две возможности

Во-первых, стремление к получению чисто *качественного* результата моделирования, без претензий на *количественную* оценку параметров процесса структурообразования

Во-вторых, принятие, в первом приближении, постулата о том, что, особенно в простейших случаях физического моделирования, условия подобия выполняются автоматически, независимо от выбора эквивалентного материала [Белоусов, Гончаров, 1991, см. также Гончаров, Талицкий, Фролова Введение в тектонофизику, 2005].

Ситуация, когда можно не учитывать силу тяжести и использовать закон вязкого течения:

Если мы проводим физическое моделирование для исследования структур, формирующихся в результате больших необратимых деформаций (медленно протекающий процесс), то по мнению М.А. Гончарова и Ю.Л. Ребецкого, для установления условий подобия нужно использовать закон вязкого течения:

$$\sigma = 2\eta\dot{\epsilon}$$

проведя некоторые преобразования (какие именно, можно посмотреть в *Гончаров, Талицкий, Фролова, 2005*) можно получить интегральную форму этого закона

$$\eta = \sigma t / 2 \ln k.$$

Из этого уравнения можно вывести условие подобия для длительных пластических (в широком смысле этого слова) деформаций

$$C_\eta = C_\sigma \cdot C_t$$

$$\frac{\eta_m}{\eta_n} = \frac{\sigma_m}{\sigma_n} \cdot \frac{t_m}{t_n}$$

Подобрав эквивалентный материал с вязкостью η_m , мы посредством напряжения σ_m за время t_m получили требуемую величину деформации k .

Если теперь, например, использовать другой материал с вязкостью, скажем, на порядок (в 10 раз) выше, то для получения той же величины деформации k потребуется, в соответствии с (1), в 10 раз большее время.

Это означает, что условие подобия (3) все равно соблюдается.

Следовательно, мы можем использовать материал любой вязкости, т.к. условие подобия соблюдается автоматически.

Только для указанного типа деформаций

О пользе аналогового моделирования

- Существование непреодолимых сложностей и противоречий
- От модели требуется отражение некоторых исходных закономерностей деформаций и разрушения тел. Мы должны решать задач не в абсолютной, а в относительной форме

Пример с формированием трещин – общие закономерности и развитие зон деструкции

- Возможность решать не только простые, но и весьма сложные вопросы. Однако мы должны точно формулировать вопрос, который мы ставим перед данной моделью и создавать модель специально для ответа на него
- С помощью экспериментов можно проверять, могут или нет работать наши модели изучаемых объектов

Пример складок скалывания или формирования складчатости общего смятия под действием только силы тяжести

- В результате проведения многих тысяч экспериментов были получены результаты, которые хорошо воспроизводили тектонические структуры и были полезны для понимания процесса их развития. Часто иными способами сделать это было невозможно
- Наглядность результатов. Стимулирование мысли исследователя

Можно констатировать, что сегодня за методом физического моделирования прочно закрепился статус полноценного методического инструмента, широко используемого наряду с другими методами в тектонических исследованиях. О его значимости для них свидетельствует тот факт, что с 2002 года с двухлетней периодичностью проводится специализированная международная конференция, посвященная физическому и математическому моделированию в геологических науках Geomod Conference: 2002г - Милан, Италия; 2004г - Люцерн, Швейцария; 2008г - Флоренция, Италия; 2010г - Лиссабон, Португалия; 2012г - Лозанна, Швейцария, 2014 – Потсдам, Германия; 2016 – Монпелье, Франция; 2018 – Барселона, Испания (1-4 октября)

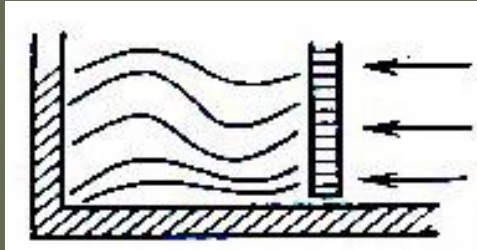
Техника аналогового моделирования

Природные аналоги лабораторных приборов

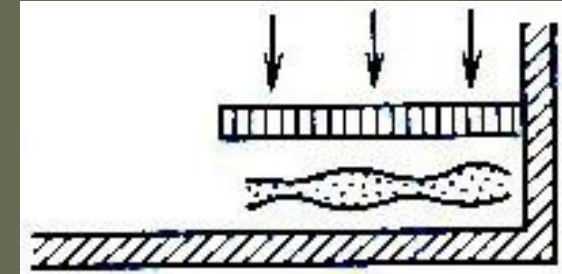
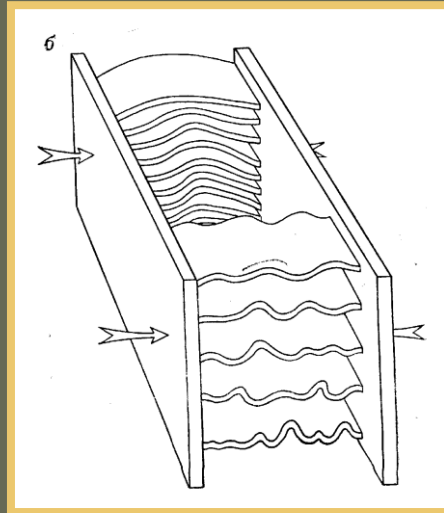
- Существуют объекты и силы, вызывающие тектонические деформации
- Поверхностные силы приложены к границам объектов и представляют собой механическое воздействие на эти границы со стороны пограничных геологических тел
- Объемные силы приложены к каждой точке изучаемого объекта, а пограничные тела играют роль упоров
- Имеется система, состоящая из изучаемого объекта и пограничных с ним тел. Эти тела «задают» граничные условия (механические, тепловые и т.д.) при которых осуществляются тектонические деформации изучаемых объектов
- Характер границ моделируемых тел:
 - естественные границы (необходим учет граничных условий)
 - условные границы
- Три возможных способа воздействия со стороны лабораторного прибора на эквивалентное вещество:
 - механически активный способ (воздействие на модельный образец поверхностными силами, приложенными непосредственно со стороны прибора)
 - механически пассивный способ – удержание образца против его расползания, обусловленного действием силы тяжести
 - немеханический способ – сообщение образцу некоторого количества энергии, вызывающего его расширение

Примеры лабораторных приборов

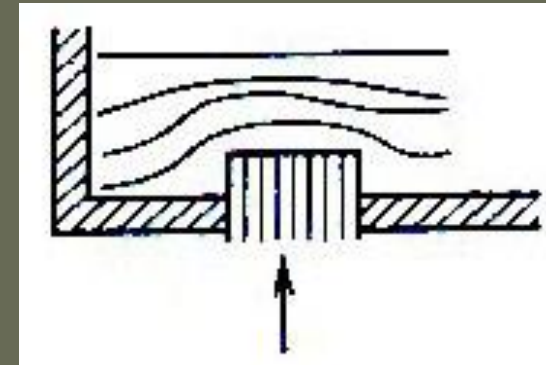
Схемы простейших приборов для механически активного воздействия на образцы



Горизонтальное сжатие



Вертикальное сжатие



Дифференцированное вертикальное воздействие

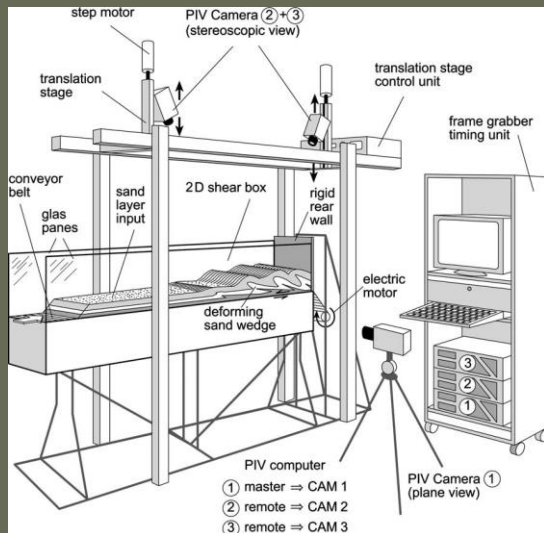
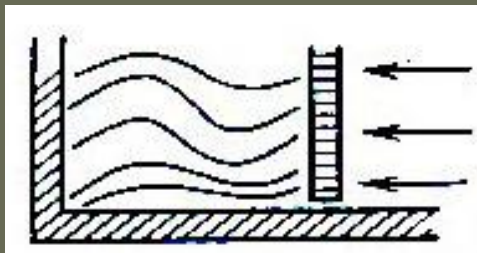
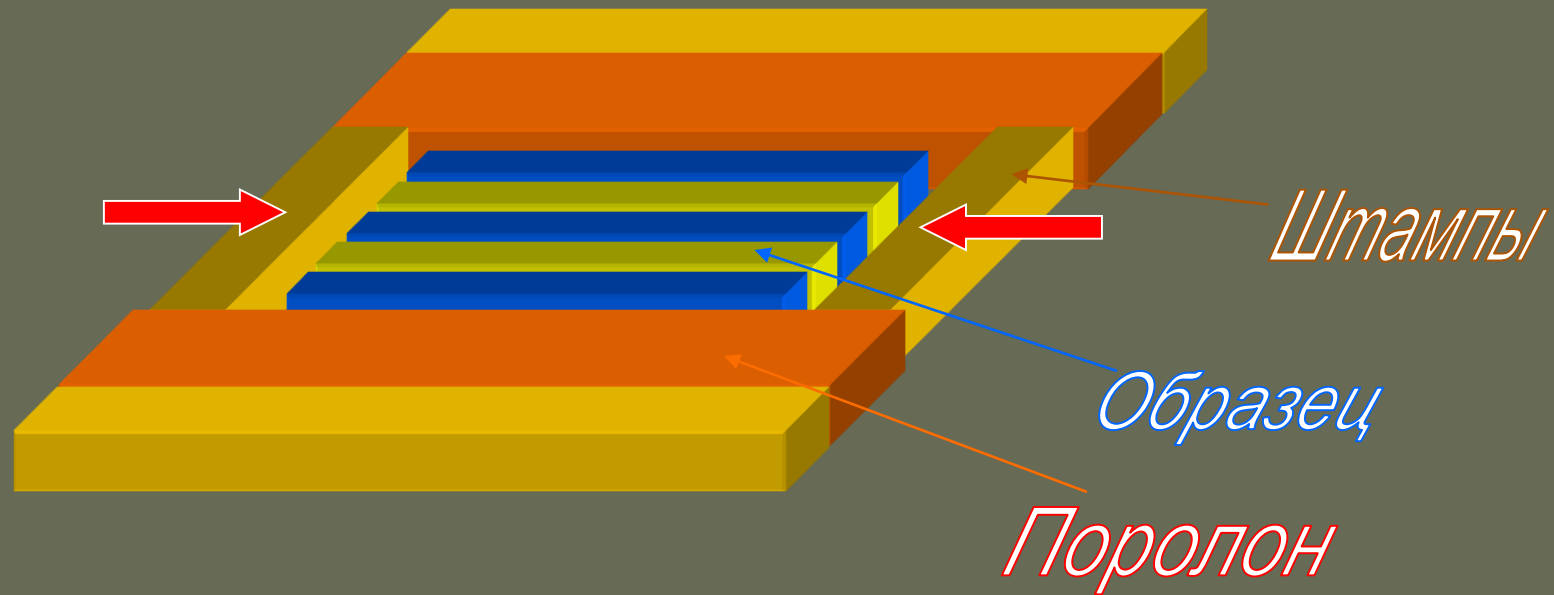
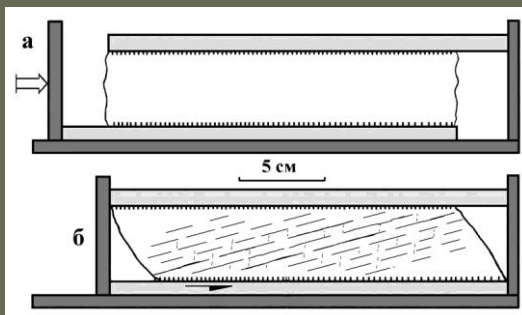


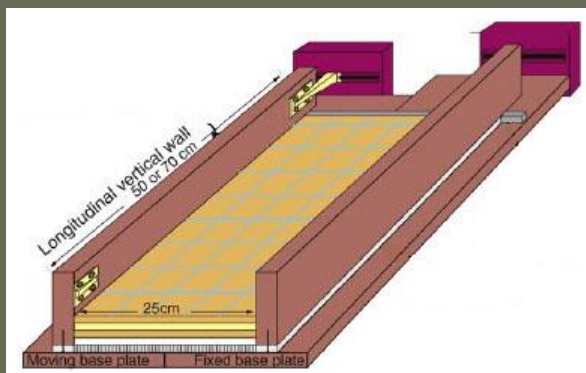
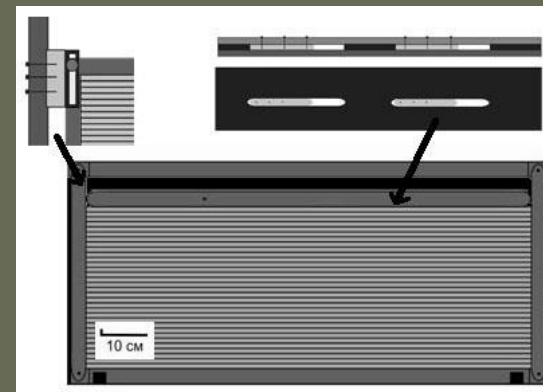
Схема прибора для моделирования складок продольного укорочения и других структур горизонтального сжатия



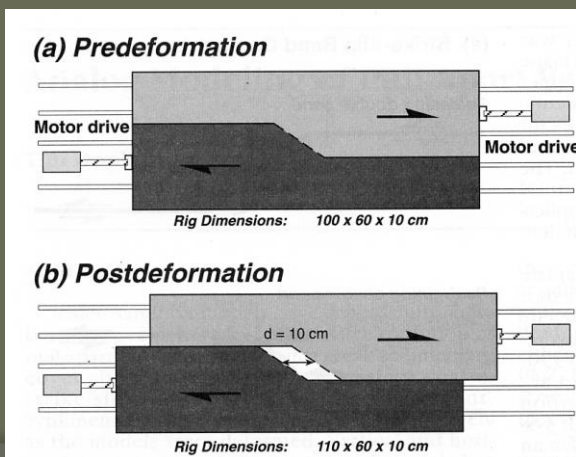
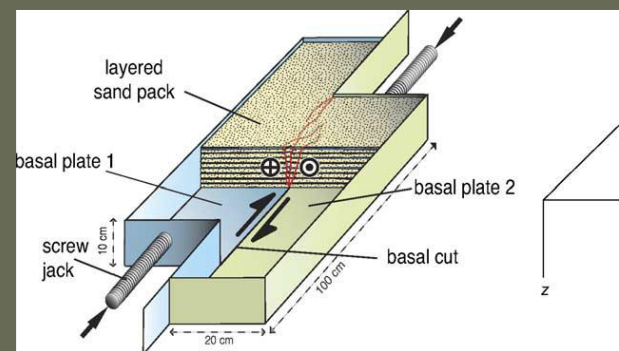
Приборы для моделирования сдвиговых деформаций



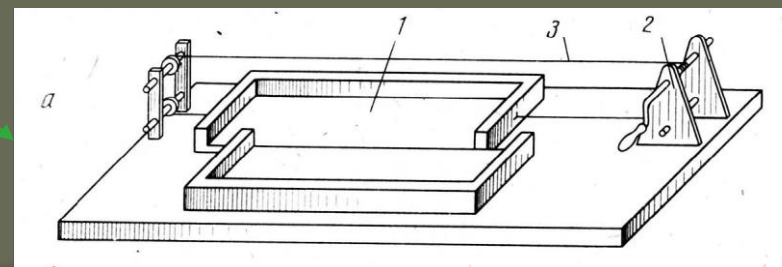
Однородный сдвиг



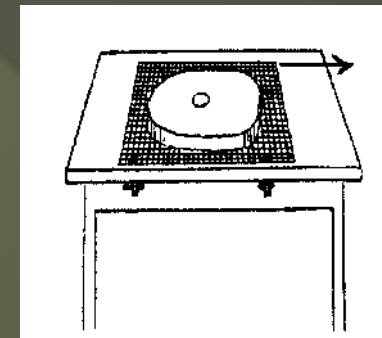
Неоднородный сдвиг



Транстенсия



Общий вид установки экспериментальной
установки «РАЗЛОМ» для физического
моделирования процессов разломообразования

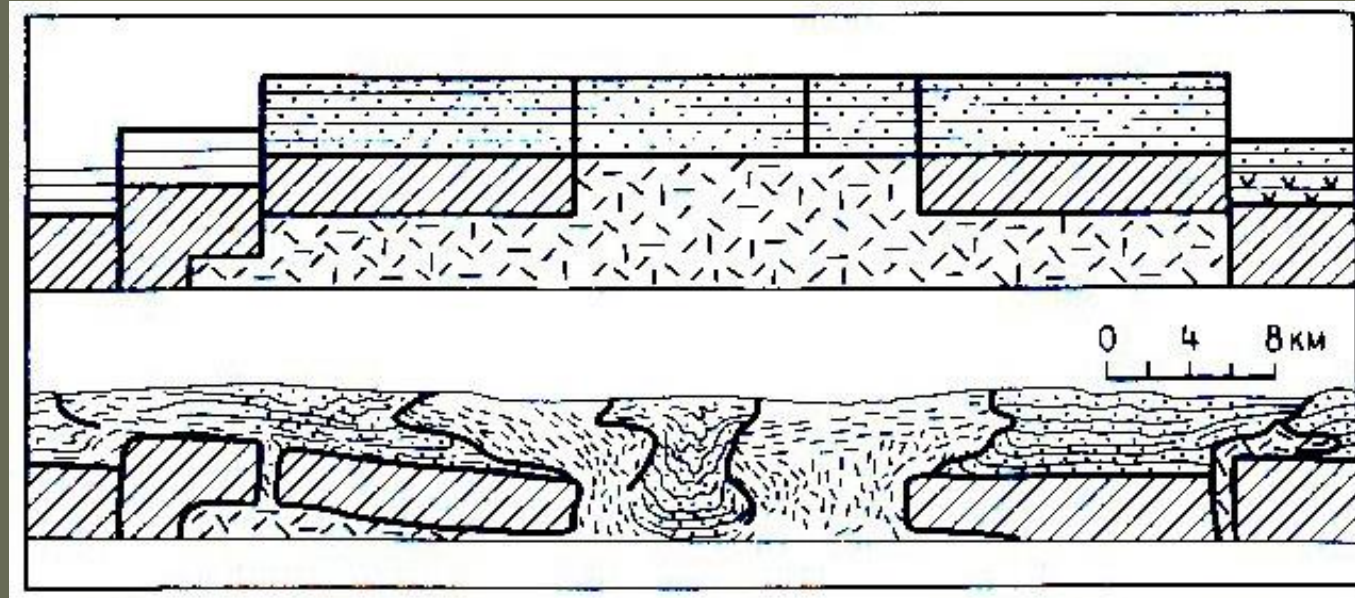


Лаборатория тектонофизики
ИЗК СО РАН, Иркутск

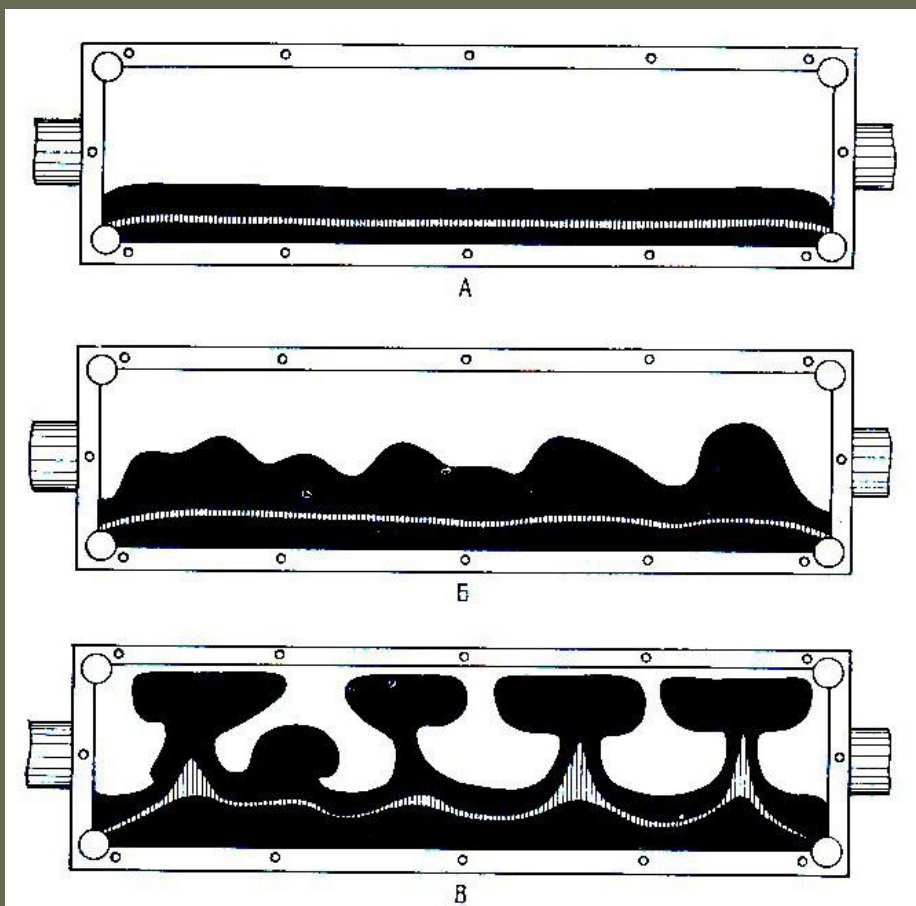


Моделирование зоны сдвига

Примеры приборов для механически пассивного воздействия на модельные образцы



Комплексная модель складчатой области, формирующейся под действием силы тяжести без участия внешних сжимающих усилий (по Н.Б. Лебедевой). Образец представлял собой систему разновысоких разделенных разрывами блоков, состоящих из неодинаковых по плотности и вязкости материалов. Блоки, из которых состоял образец, первоначально имели разную высоту и разделялись перегородками. Когда перегородки были изъяты, образец оказался предоставлен «сам себе».



Последовательные стадии роста поднятий нефти в тяжелом сиропе. Имитирует развитие гравитационных солянокупольных структур.
(по Х. Рамбергу)

В приборы, показанные на слайдах, помещаются образцы с уже имеющейся или созданной в самом начале опыта гравитационной неустойчивостью

Приборы для немеханического способа воздействия на образцы (внесение в модельный образец энергии в немеханической форме).
Пример: при нагревании нижней части образца в нем может возникнуть инверсия плотности - одна из разновидностей механически неустойчивого состояния

В настоящее время существует множество разновидностей приборов для аналогового моделирования

- ⦿ Все экспериментальные установки, исключая серийно выпускаемые центрифуги, конструируются и изготавливаются в единичных экземплярах специально под решаемые задачи. Как правило они состоят из емкостей разных форм и размеров для закладки моделей и системы горизонтальных и вертикальных штампов для их деформирования.
- ⦿ В некоторых случаях установки оснащаются гидравлическими системами для внедрения в основание моделей вязких жидкостей, имитирующих внедрение магматических расплавов.
- ⦿ В последнее десятилетие начал проводиться интересный цикл экспериментов по изучению влияния геоморфологии поверхности на протекание тектонических процессов. При таких экспериментах установки оснащаются душевыми системами полива моделей для имитации денудационных процессов.

Выбор или создание эквивалентных веществ

Эквивалентное вещество (материал) – это такое вещество, свойства которого эквивалентны соответствующим свойствам моделируемой геологической среды

- Первый шаг – отбор определяющих свойств. Подбор тех параметров, которые входят в уравнения, описывающие конкретный процесс. Примеры
- Второй шаг – количественная оценка определяющих свойств. Производится с использованием условий подобия
- Третий шаг - оценка технологических свойств. Эквивалентные вещества должны обладать качествами, создающими определенные удобства при работе с модельными образцами.
- Кроме того, необходимо, чтобы модельные структурные формы были похожи на природные

Вещества, используемые в качестве эквивалентных

- До 80-х годов прошлого века использовались консистентные смазки, битумы, петролатум, воск, парафин, некоторые сорта мыла, смолы, канифоль и другие материалы.
- Считалось, что особенно близка по свойствам к необходимому эквивалентному материалу влажная глина, особенности деформации которой были тщательно изучены во многих физических и тектонофизических лабораториях.

Классические эксперименты на влажной глине, получившие мировую известность и не потерявшие до сих пор своей актуальности, были осуществлены такими исследователями, как Г. Клоос (1928 и др.), Э. Клоос (1955), В. Ридель (1929) и другими. Эти исследователи эмпирическим путем пришли к выводу о том, что влажная глина ведет себя в условиях лабораторного эксперимента весьма сходно с горными породами в природных условиях

Эквивалентные материалы, используемые в настоящее время

В экспериментах в качестве модельного материала для имитации **хрупкого разрушения** консолидированных осадочных толщ или верхней части литосферы в подавляющем большинстве случаев используется разные типы песка. Реже применяют такие материалы как кварцевый порошок, дробленое стекло, тальковая пудра, ил, пластмассовая пудра, пудра полугидрата сульфата кальция, канифоль и другие. С точки зрения теории подобия эти материалы по своим прочностным свойствам и способности разрушаться хрупко при небольших деформациях хорошо подходят для моделирования.

Для имитации деформации и разрушения массивов горных пород или нижней части литосферы, обладающих **повышенной пластичностью**, чаще всего используют силикон и разные типы глины - каолиновую, монтмориллонитовую, или бентонитовую. Среди других материалов, близких по реологическим свойствам, следует отметить пластилин, специальные полимерные пасты, канифоль в смеси со скипидаром, графитовая мазь или специальный состав (MatIV) из кремневой, стеклянной и пластической пудры и графита, разработанный в экспериментальной лаборатории Университета Монпелье (Франция). Все перечисленные материалы обладают свойствами упругости, пластичности и вязкости и в пределах используемых в экспериментах скоростей деформации проявляют необходимое по условиям подобия значение вязкости в интервале $10^4 - 10^8$ Па·с. Из материалов с меньшей вязкостью, эквивалентных модельных аналогов текучей астеносферы, используются мед, густой сахарный сироп, глицерин, полидиметилсилоксан (PDMS) *(из доклада С.А. Борнякова на тектонофизической конференции)*. *А еще каучук-НФ*

Кстати, силикон и PDMS - это одно и то же



Способы регистрации и обработки результатов экспериментов

- Констатация исходного состояния образца

 - Часто используется нанесение окружностей и сеток

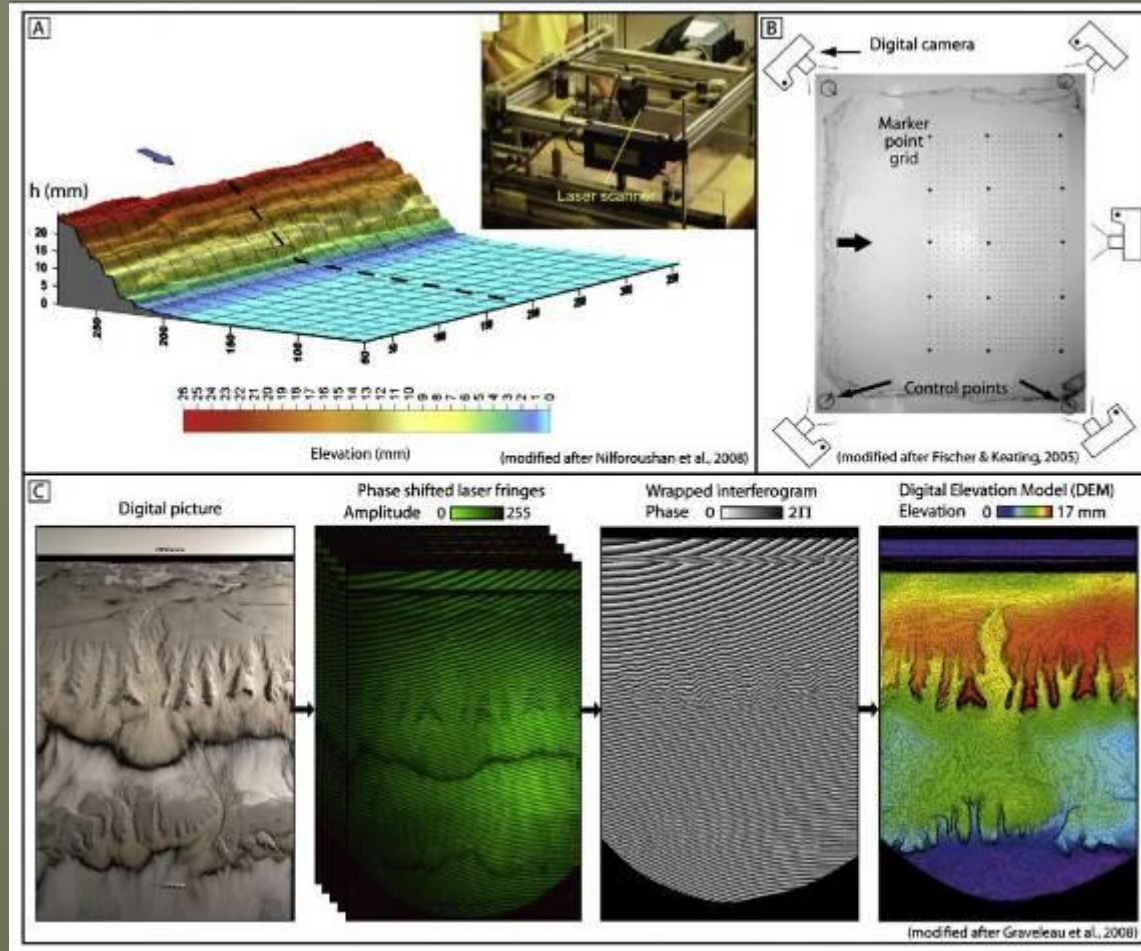
- Наблюдение за развитием деформаций в образце

 - непосредственное наблюдение за непрерывным процессом
 - остановка опыта на отдельных стадиях процесса деформации

- Регистрация результатов эксперимента

Для регистрации результатов используется стандартная цифровая фото и видео аппаратура для получения двумерных изображений. Прогрессивным моментом в этом плане является получение трехмерных изображений моделей с помощью сканеров. Техническим новшеством представляется использование большого медицинского X-лучевого сканера для получения объемных изображений внутренней структуры многослойных моделей, имеющих в своем составе слои со специальным контрастным веществом.

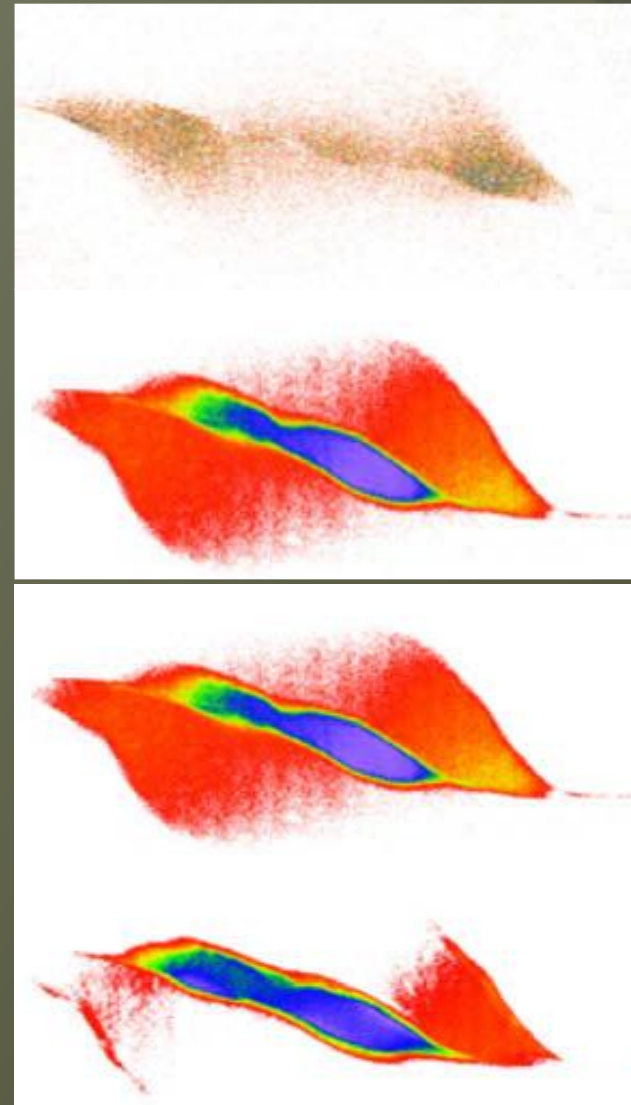
Примеры регистрации результатов Изучение рельефа моделей



(Graveleau et al., 2012)

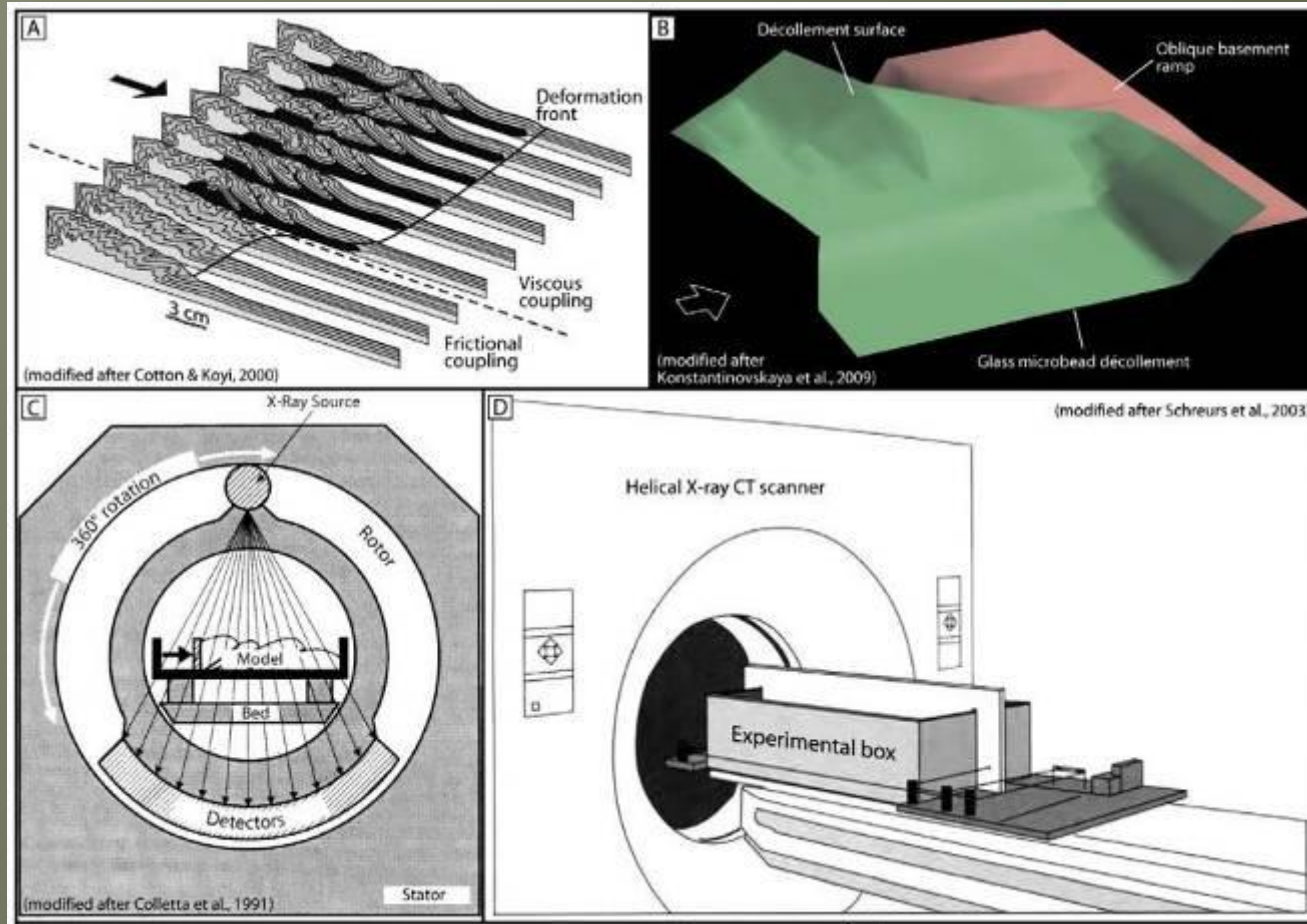
А – лазерное сканирование, Б – стереофотограмметрия, С – лазерный интерферометр

Моделирование транстенсии (пул-аппарт бассейна) с лазерным сканированием рельефа



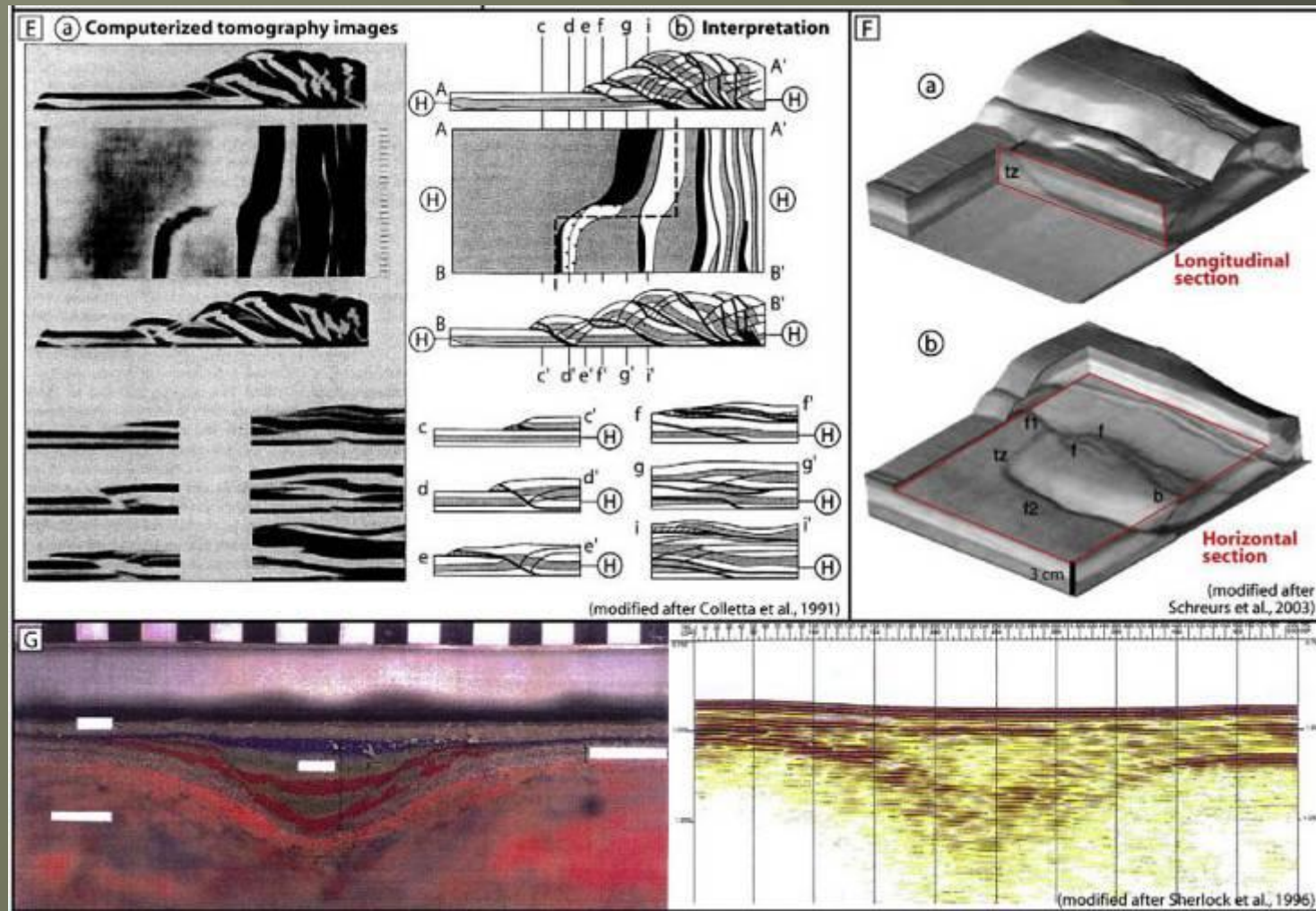
4D analogue modelling of transtensional pull-apart basins Jonathan E. Wu ^{a,*}, Ken McClay ^a, Paul Whitehouse ^{a,1},
Tim Dooley ^b ^a Fault Dynamics Research Group, Department of Earth Sciences, Royal Holloway University of London,
Egham, Surrey, TW20 OEX, UK

Примеры регистрации результатов Изучение внутренней структуры моделей



(Graveleau et al., 2012)

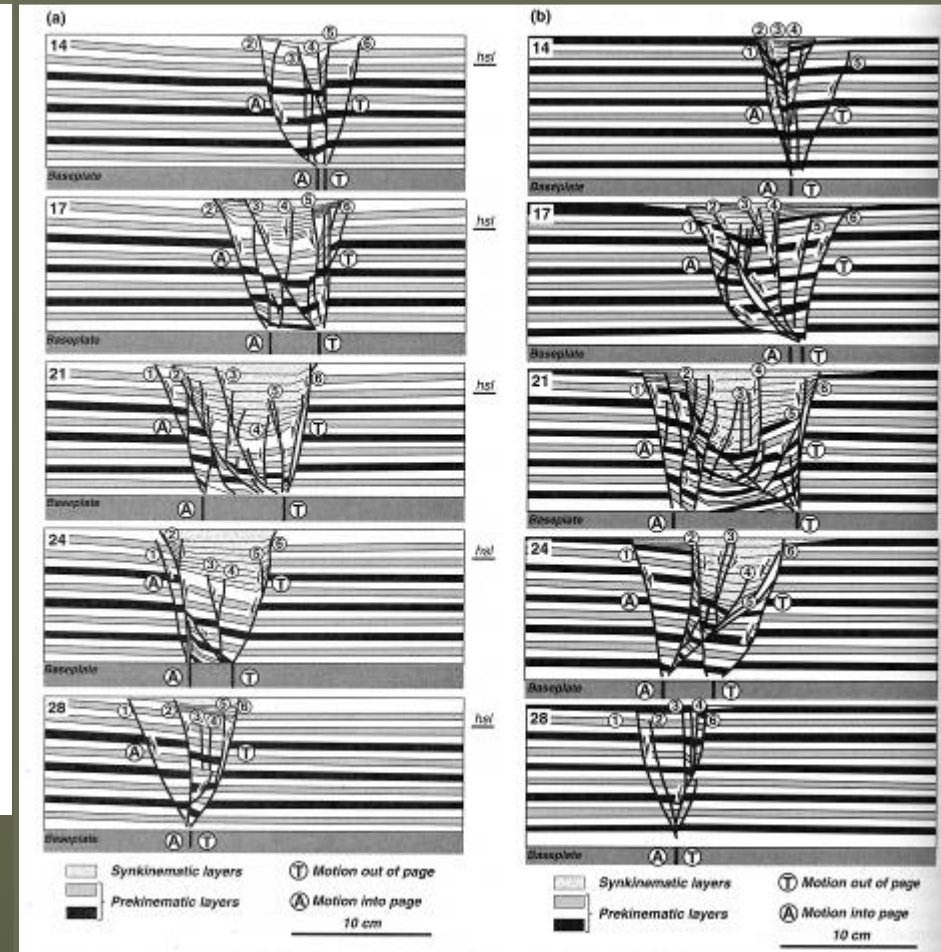
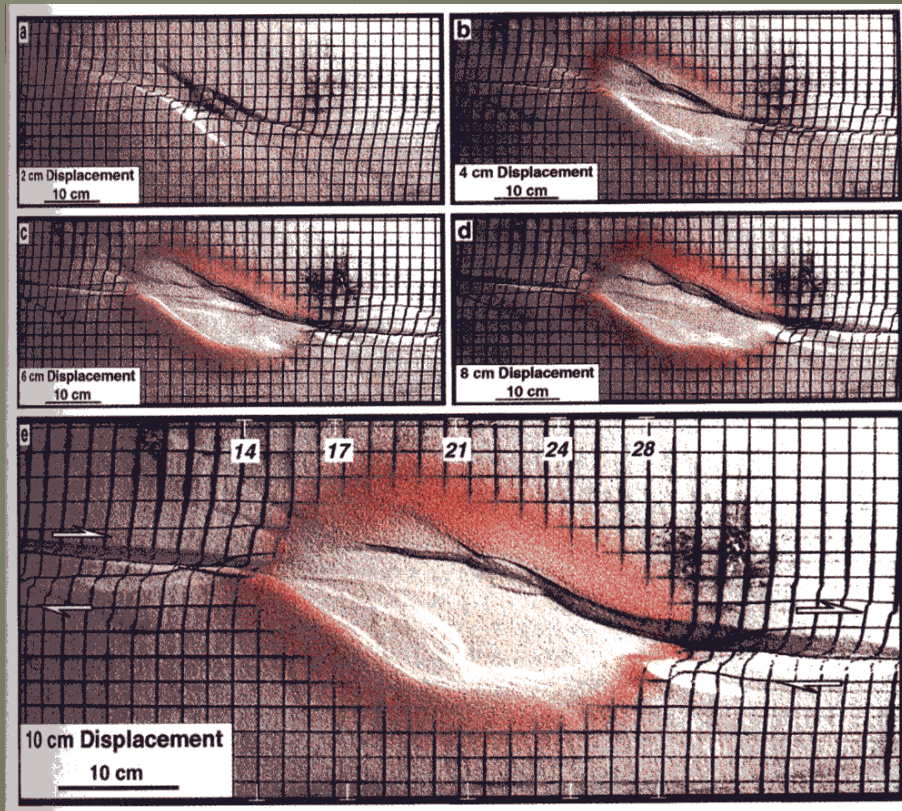
А - серия разрезов, В –оцифровка и обработка, С – X-лучевой (рентгеновский) компьютерный томограф, D – спиральный рентгеновский компьютерный томограф



Е – полученные картинки и их интерпретация, F - 4D обзор эволюции модели,
 Г – метод отраженных сейсмических волн

(Graveleau et al., 2012)

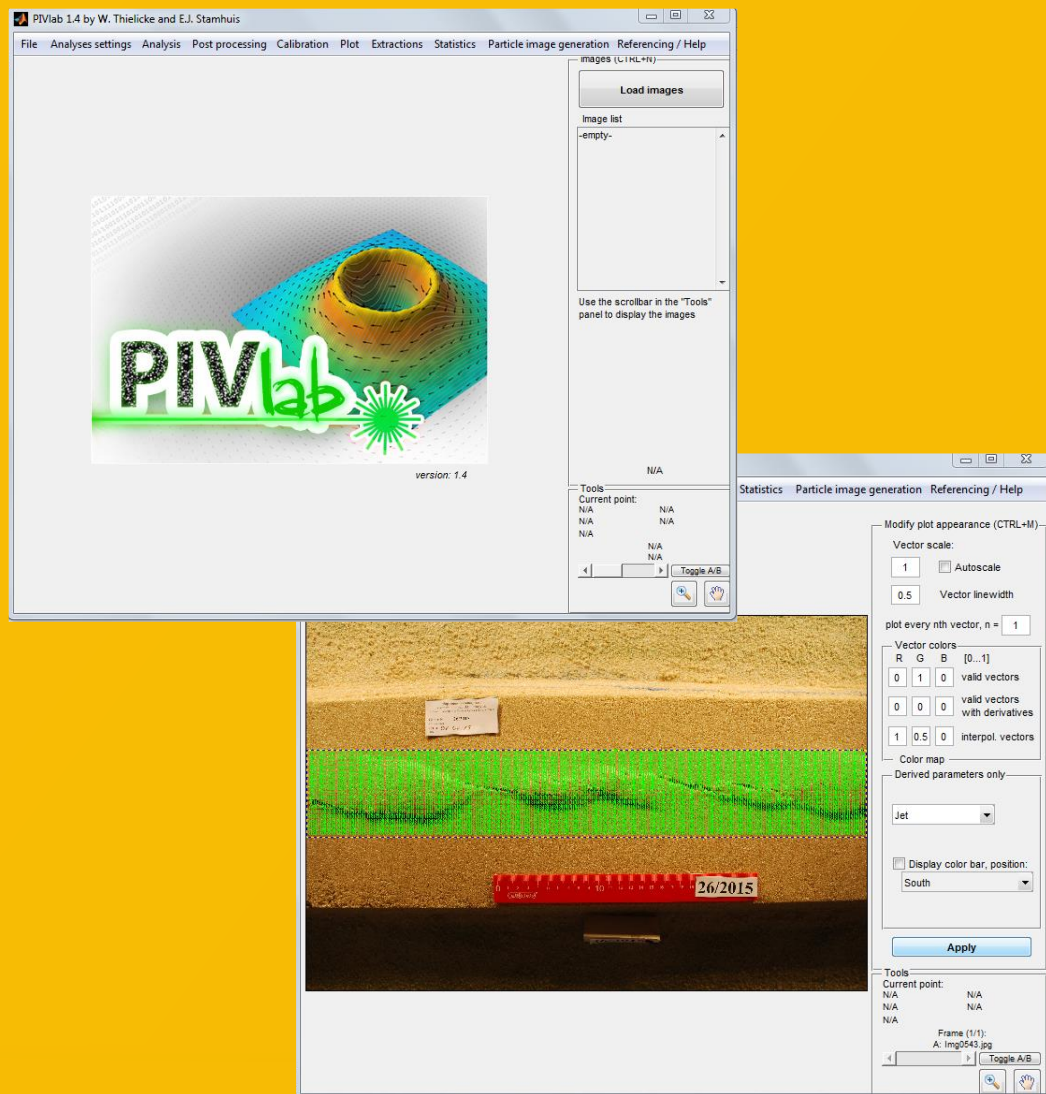
Примеры регистрации результатов. Моделирование транстенсии



1. На поверхности – сетка
2. Фото через небольшие интервалы
3. Пропитка желеобразным веществом и разрезание
4. Оцифровка и обработка в программе 3-D Move

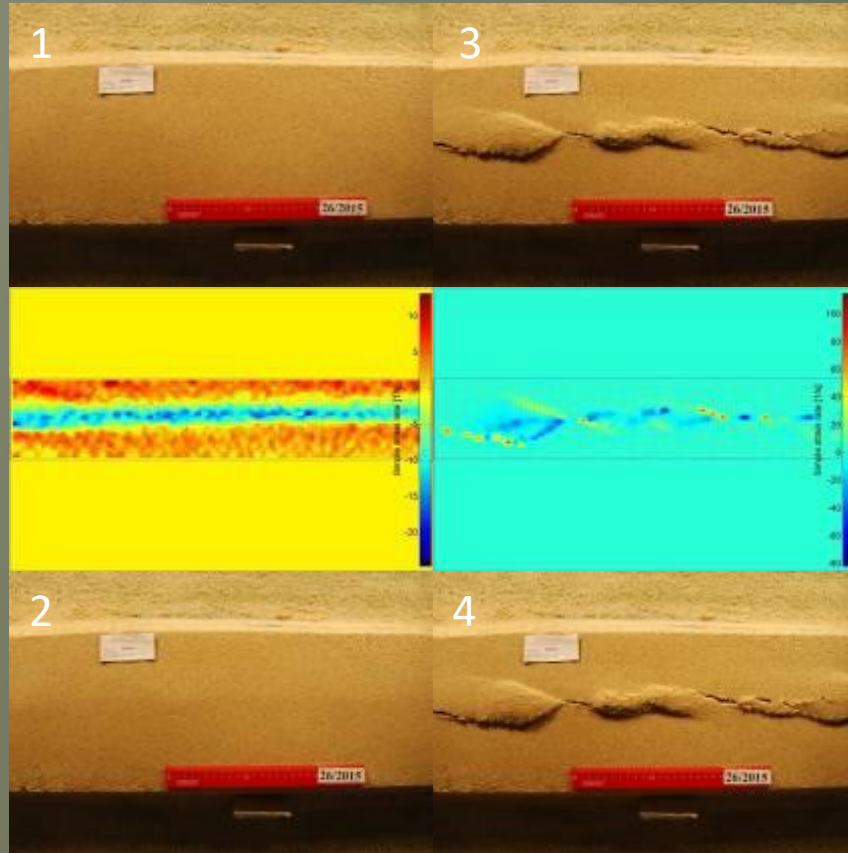
Dooley & McClay, 1997

Метод PIV (Particle Image Velocimetry)

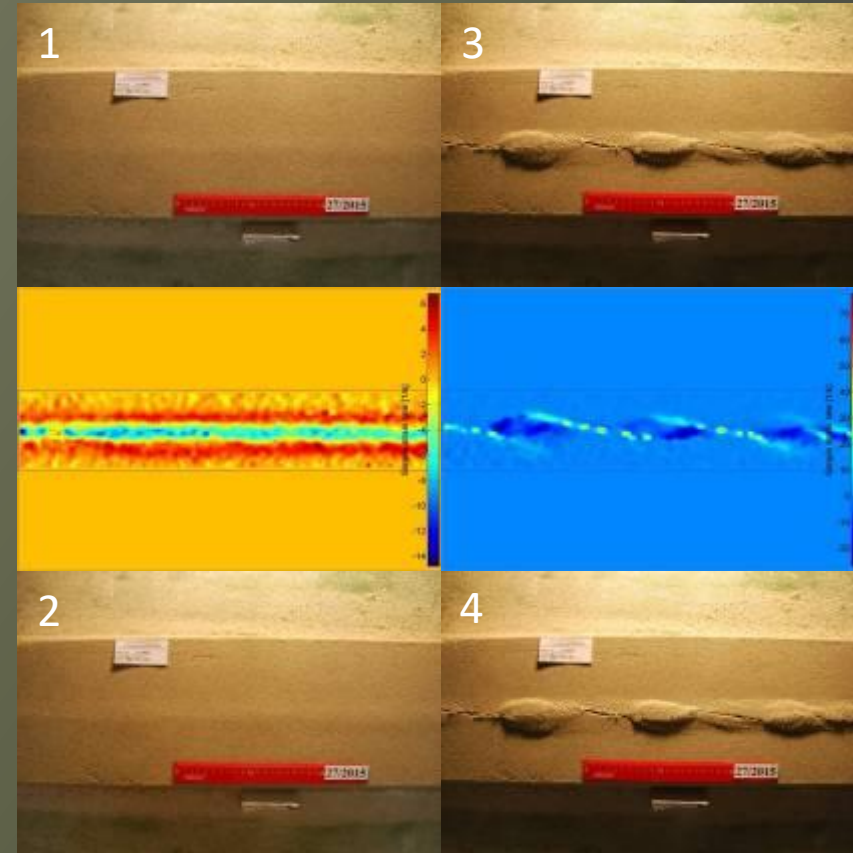


- Программа позволяет находить на двух фотографиях одну и ту же точку и рассчитывать вектор ее перемещения.

Анализ опытов в программе PIVlab



- Анализ опыта 26.
1-2 – начало; 3-4 – конец.



- Анализ опыта 27
1-2 – начало; 3-4 – конец.