Аналоговое тектонофизическое моделирование для целей структурного анализа и прогноза рудных ловушек

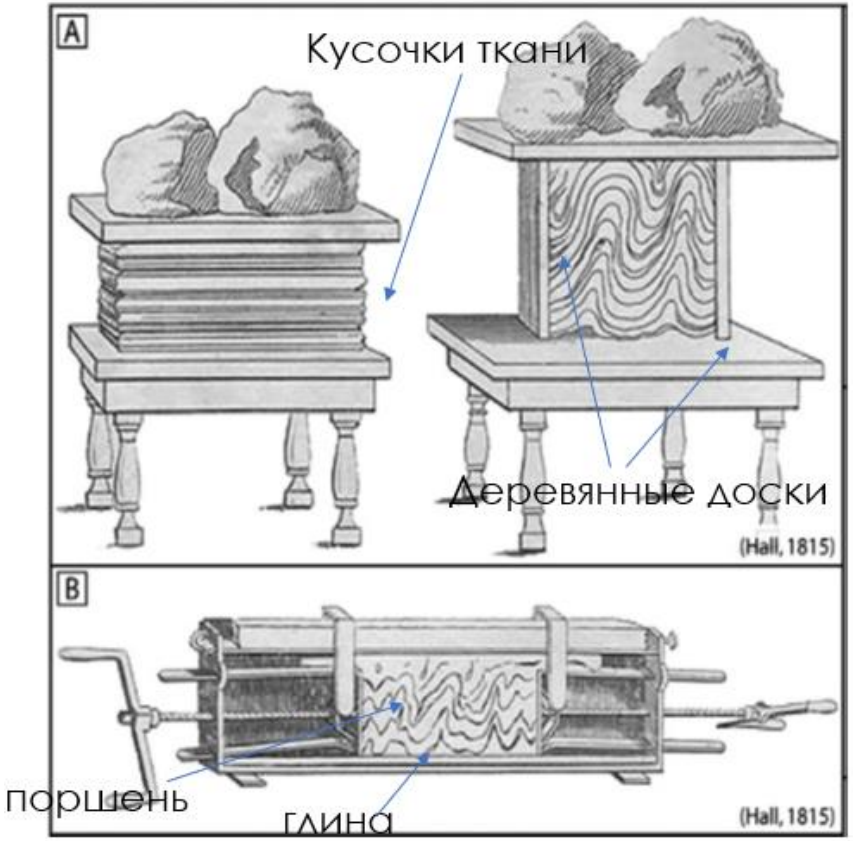
Читалин А.Ф.
ООО «Институт геотехнологий»

2023 г

ТЕКТОНОФИЗИКА

- XIX век. Первый опыт:

Sir James Hall (1815 г.)



Hall, J., 1815. ***On the vertical position and convolutions of certain strata and their relation with granite****. Transactions of the Royal Society of Edinburgh 7, 79–108.*

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ им. О. Ю. ШМИДТА

М. В. ГЗОВСКИЙ

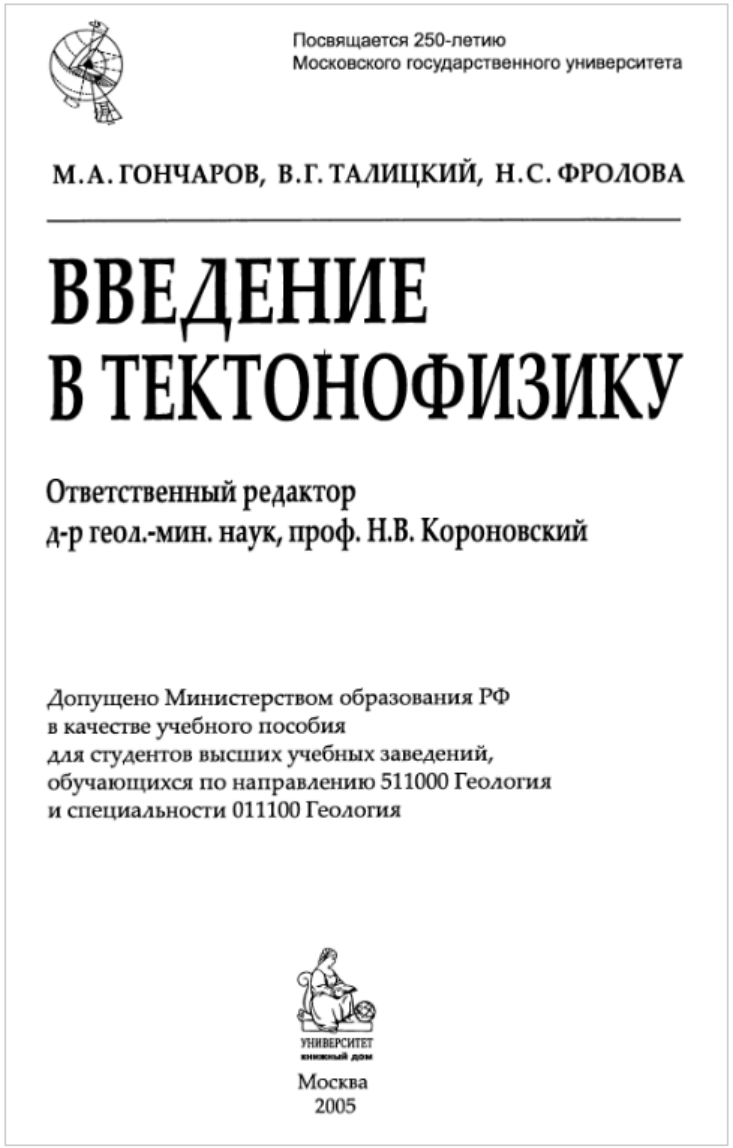
ОСНОВЫ ТЕКТОНОФИЗИКИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА
1975

Тектонофизика изучает физические основы деформации геологических тел в литосфере и динамические геологические процессы.

Охватывает изучение как отдельных минералов, так и тектонических плит и процессов (сил и напряжений), происходящих в коре и мантии Земли, геодинамическую обстановку и структурные парагенезы.

ТЕКТОНОФИЗИКА



Посвящается 250-летию
Московского государственного университета

М.А. ГОНЧАРОВ, В.Г. ТАЛИЦКИЙ, Н.С. ФРОЛОВА

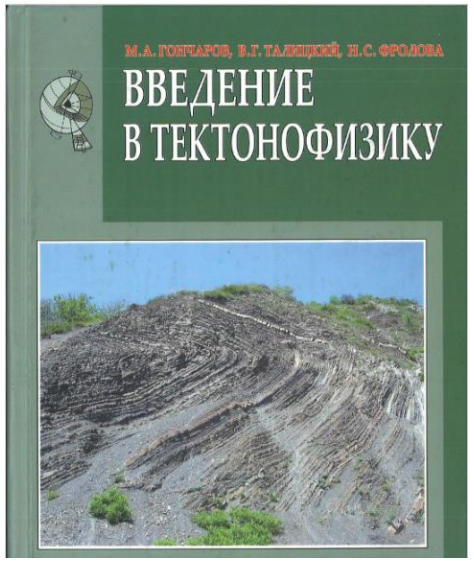
ВВЕДЕНИЕ
В ТЕКТОНОФИЗИКУ

Ответственный редактор
д-р геол.-мин. наук, проф. Н.В. Короновский

Допущено Министерством образования РФ
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению 511000 Геология
и специальности 011100 Геология

УНИВЕРСИТЕТ
книжный дом

Москва
2005



Методы тектонофизики

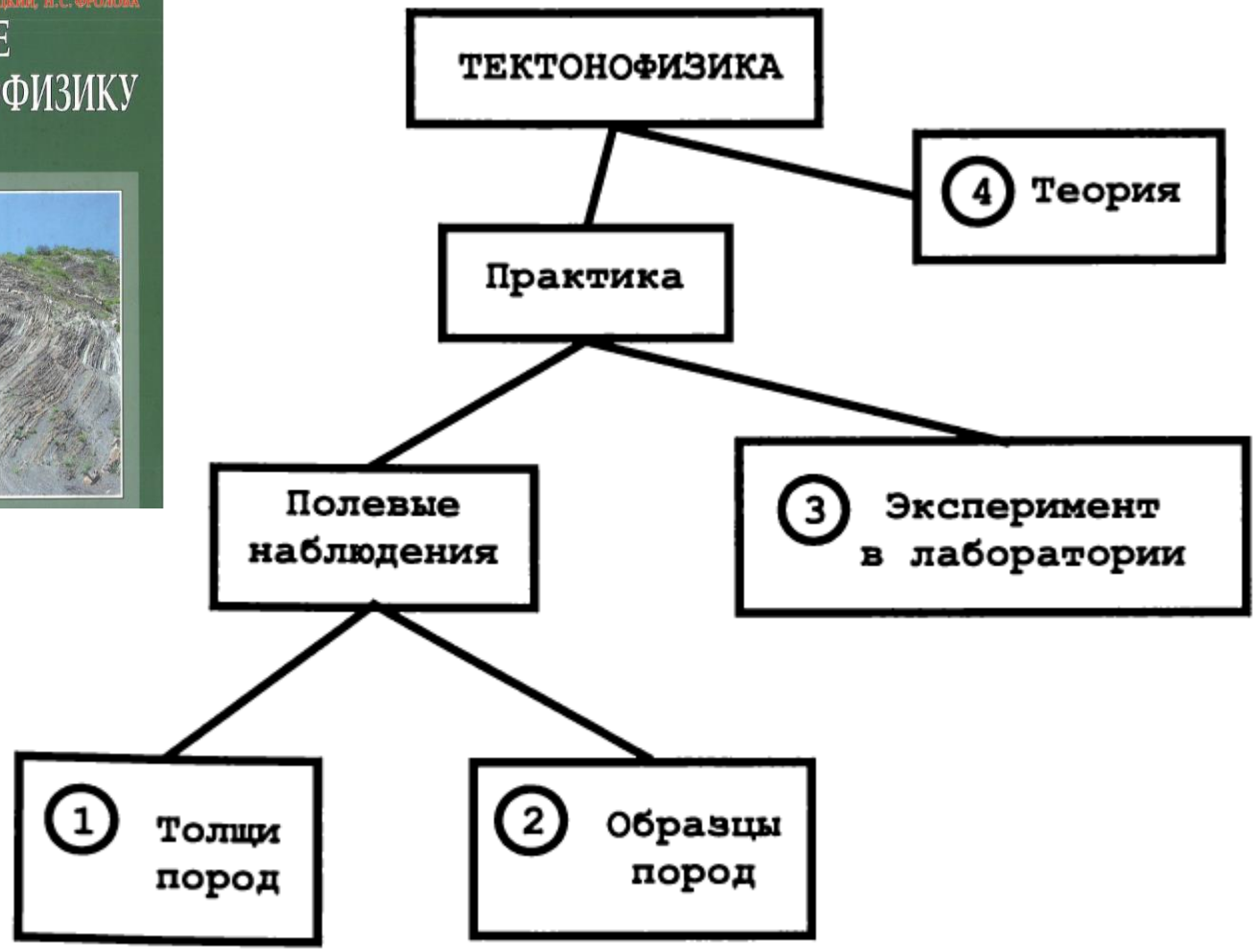
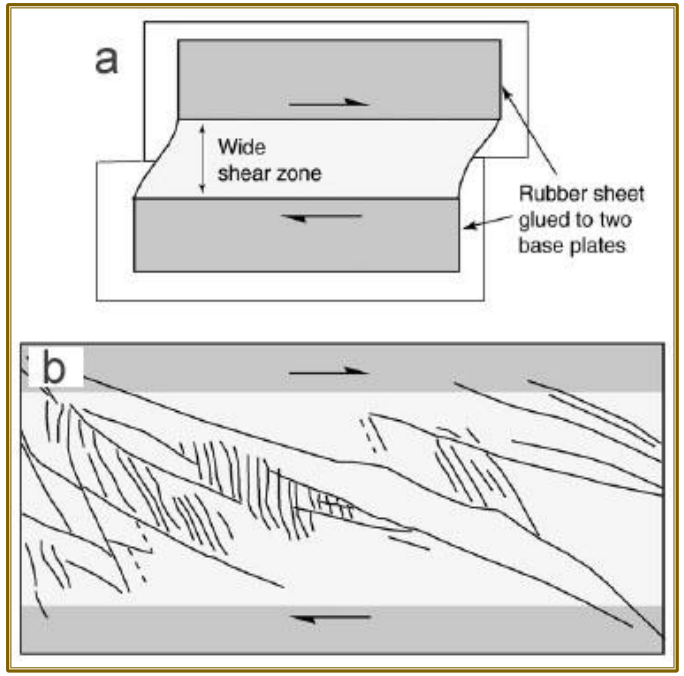
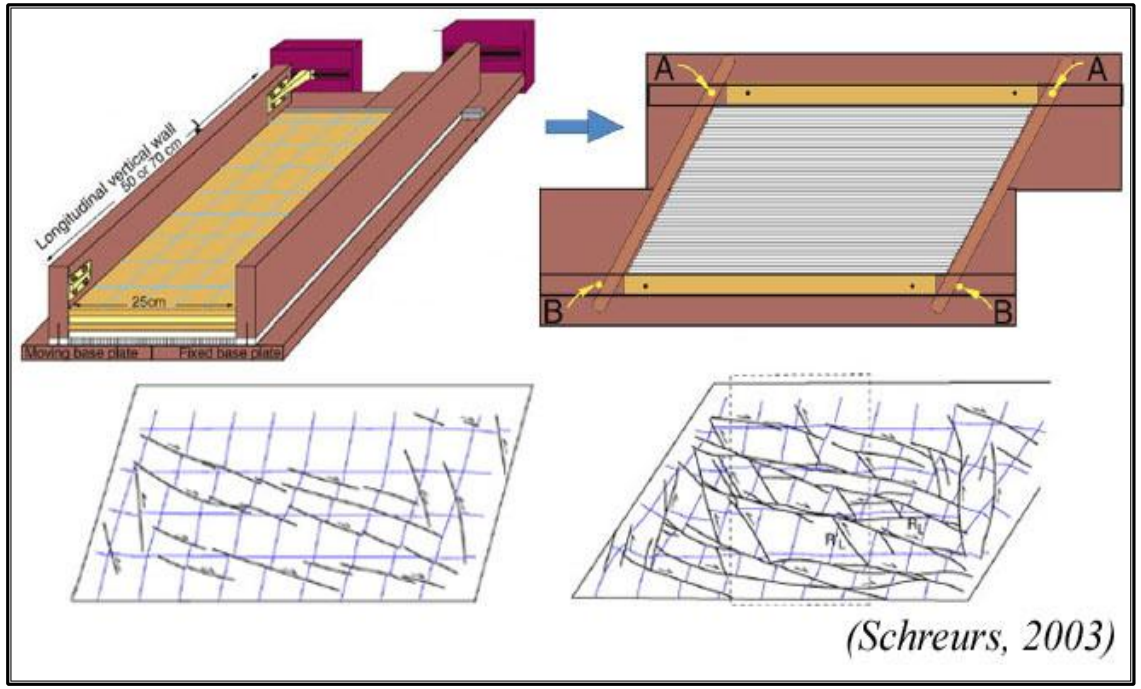


Рис. 4. Методы тектонофизики (пояснения в тексте)

Модели однородного простого сдвига. Песок



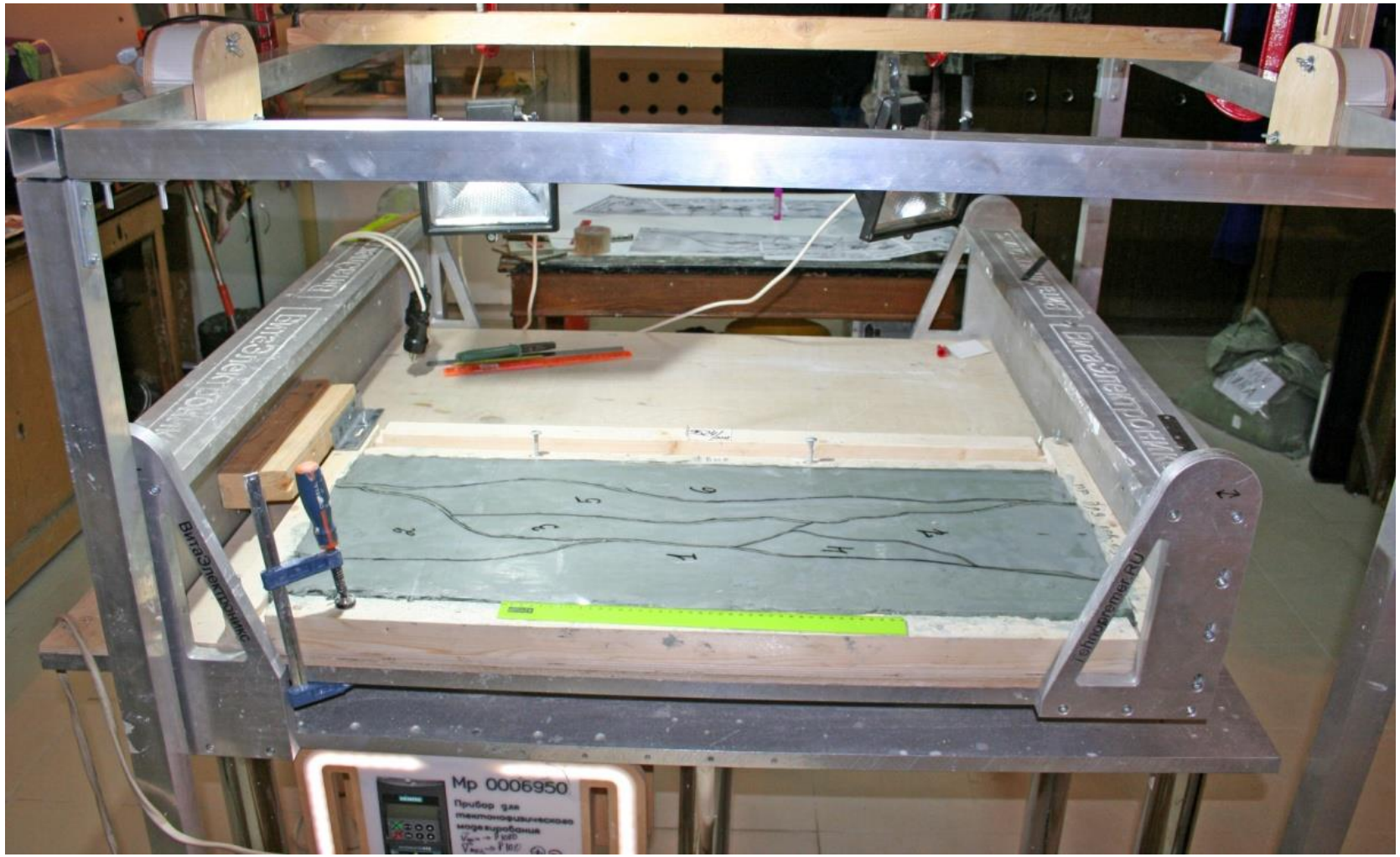
(Naylor from Mandl, 1988)

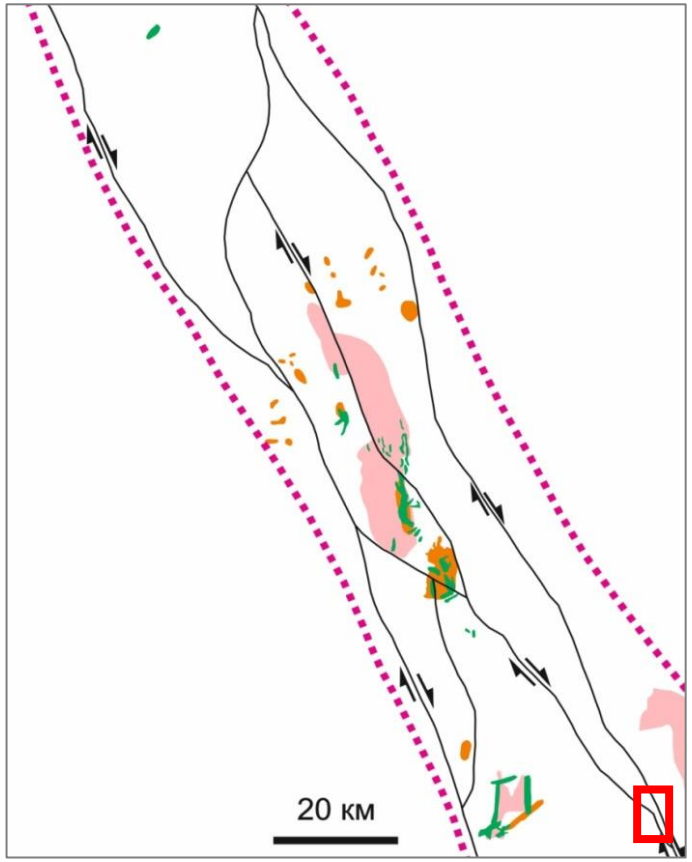


ПРИБОРЫ ДЛЯ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аналоговое моделирования Баимской сдвиговой зоны

Фролова и др. 2018





Сдвиги Баимской сдвиговой зоны (по А.Читалину)

Лаборатория тектонофизики и геотектоники геологического факультета МГУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЫВОВ НА УПРУГО-ПЛАСТИЧНОМ МАТЕРИАЛЕ

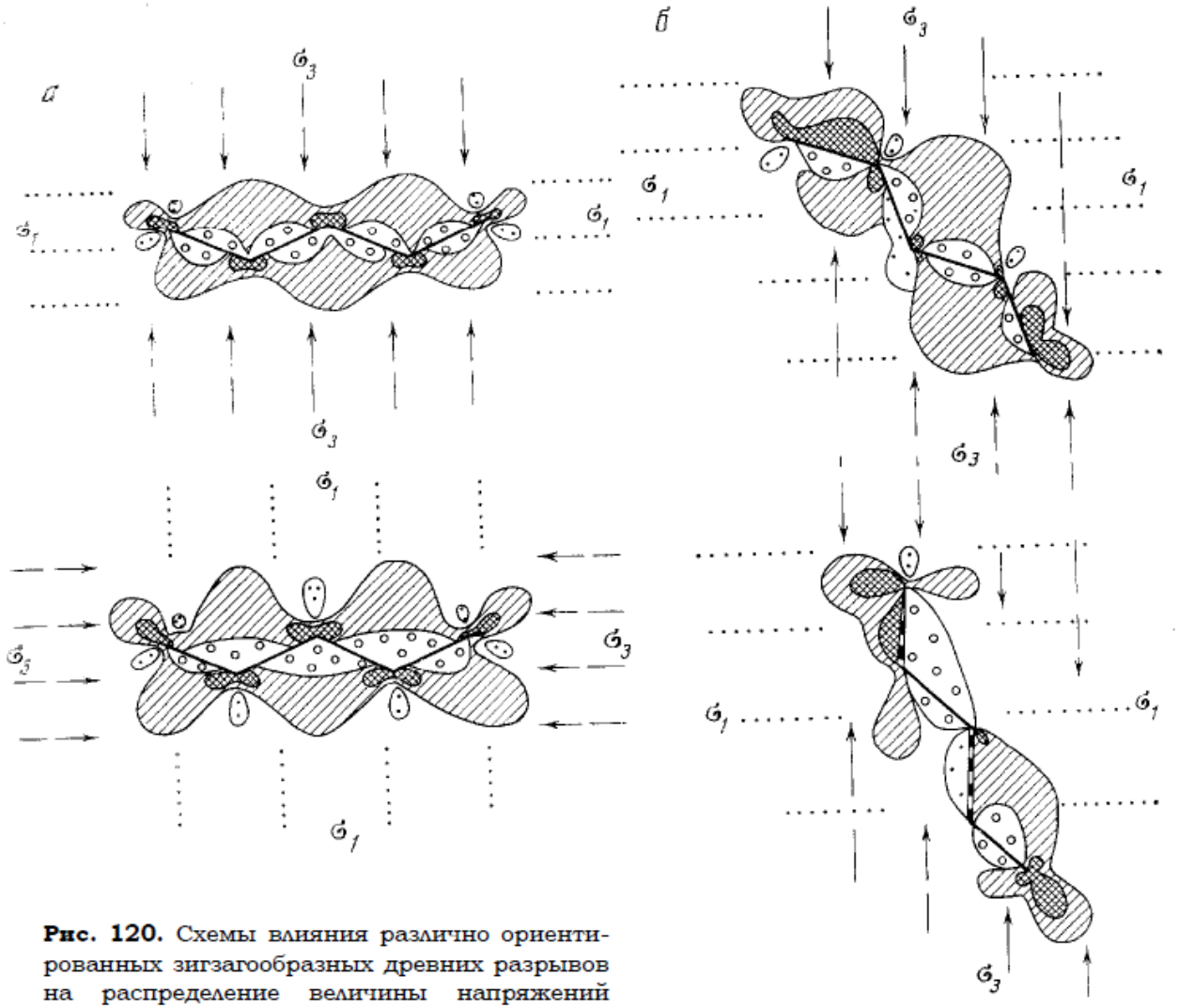


Рис. 120. Схемы влияния различно ориентированных зигзагообразных древних разрывов на распределение величины напряжений τ_{max} в модели

Прогноз рудной минерализации в изгибах разлома

Высокие касательные напряжения локализованы на участках изгиба разрыва – участки концентрации трещин – структурные ловушки для рудной минерализации

ПРИМЕРЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Модели складок поперечного изгиба

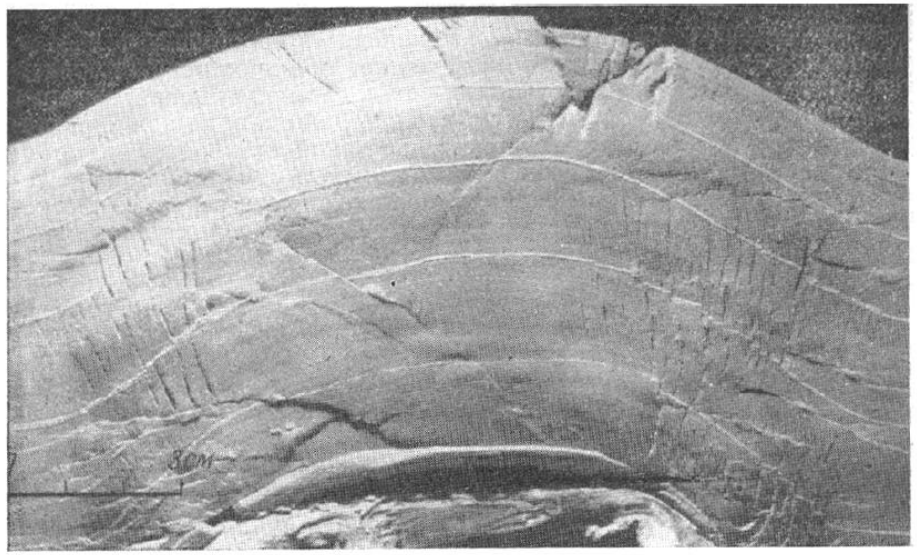


Рис. 24. Модель антиклинали, созданной вертикальными силами

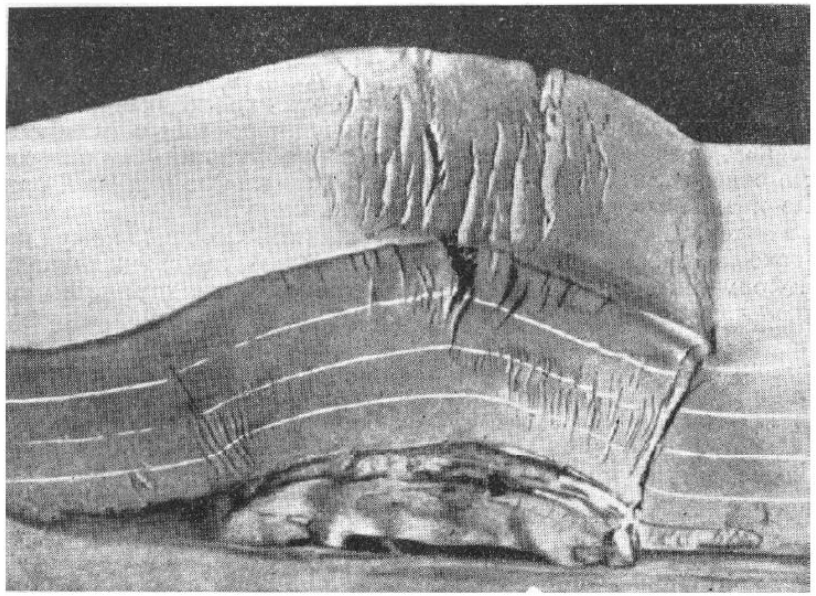


Рис. 26. Модель асимметричной антиклинали, созданной вертикальными силами

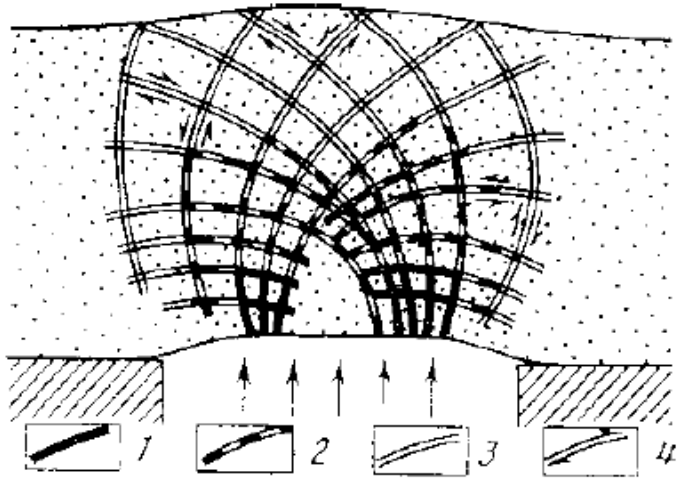


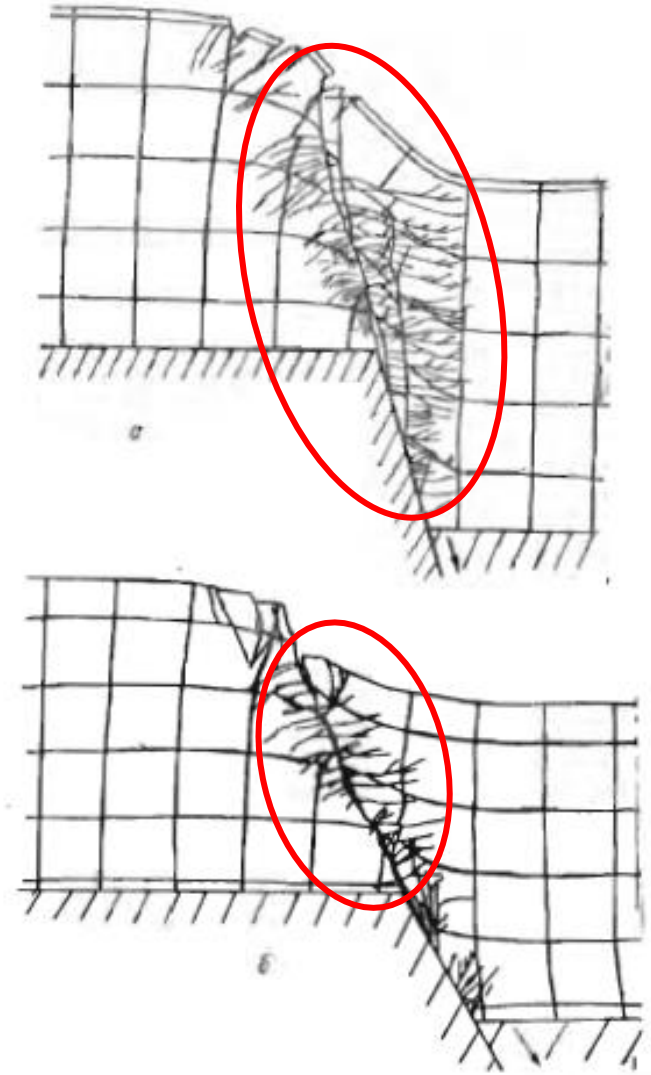
Рис. 25. Схема ориентировки поверхностей действия максимальных касательных напряжений, связанных с ростом антиклинали, созданной вертикальными силами

1 – поверхности в участках с наибольшими касательными напряжениями; *2* – поверхности в участках со средними по величине касательными напряжениями; *3* – поверхности в участках с наименьшими касательными напряжениями; *4* – направление действия касательных напряжений

Гзовский, 1975

ПРИМЕРЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Модель сброса



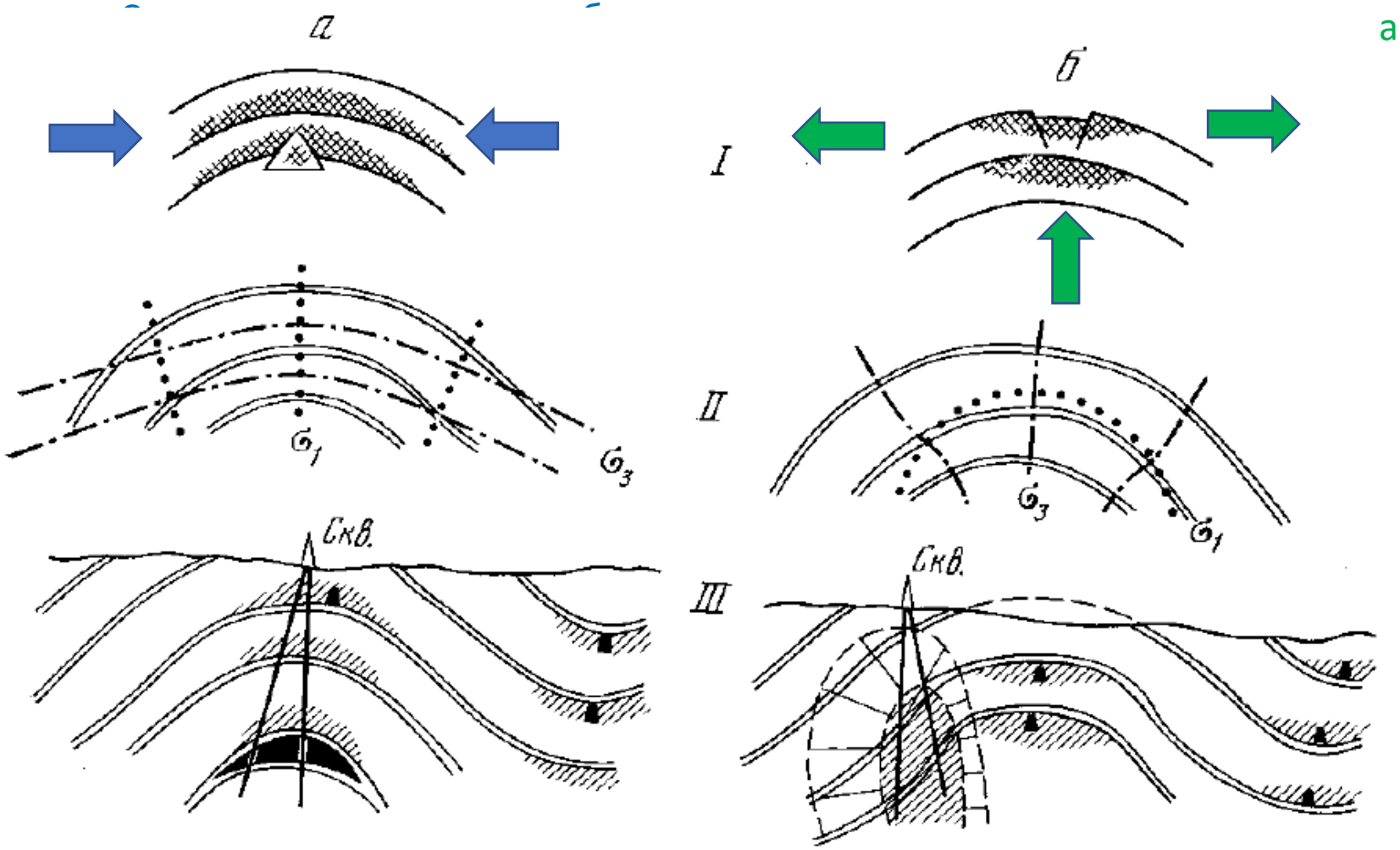
Пологие сбросы и надвиги оперения

Пологие разрывы в сбросовой зоне могут быть ОШИБОЧНО проинтерпретированы как зона тектонического покрова

Важно откартировать область их распространения и установить связь с материнским сбросом

ПРИМЕРЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Прогноз рудной минерализации в структурных ловушках в складках разного типа



а

Трещиноватость

Оси главных нормальных напряжений

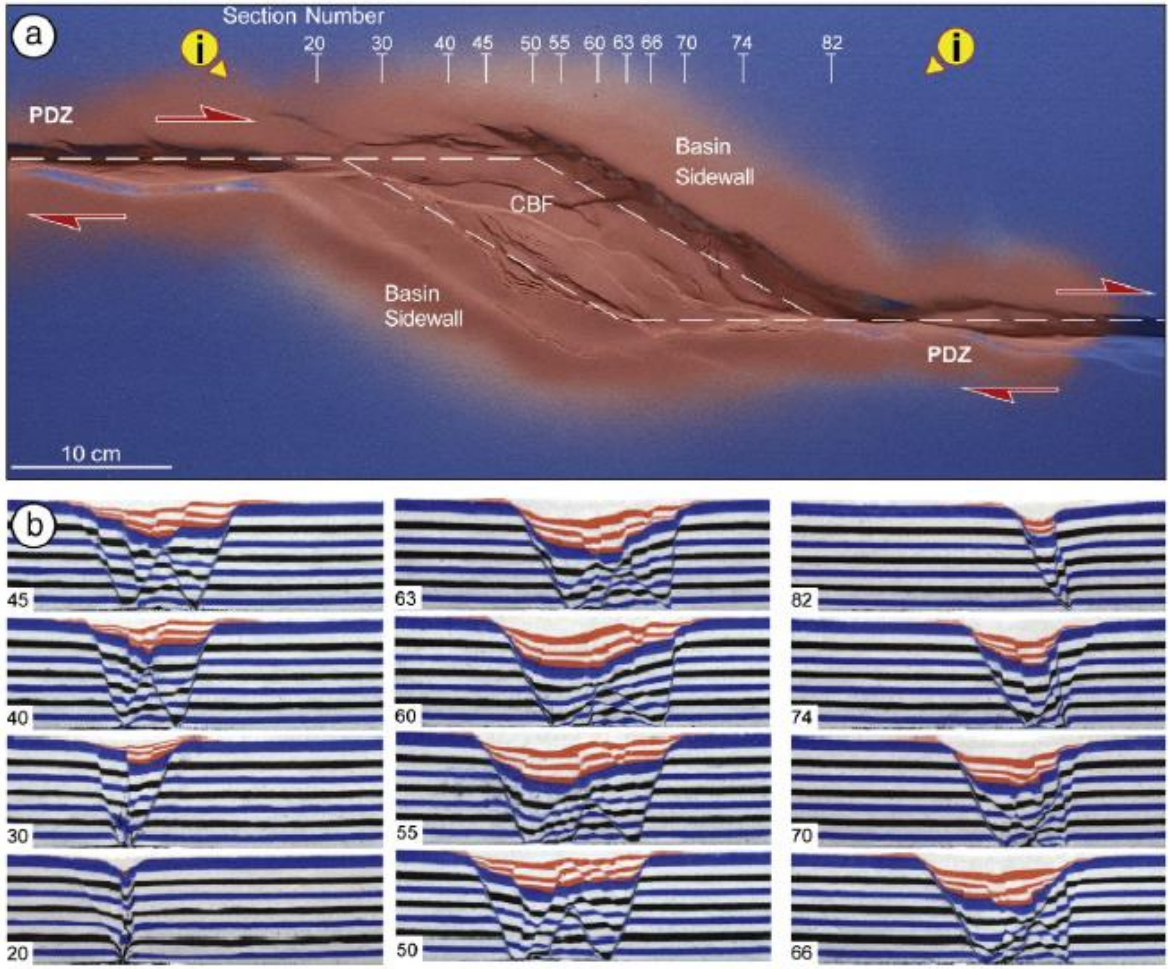
Благоприятные для оруденения участки

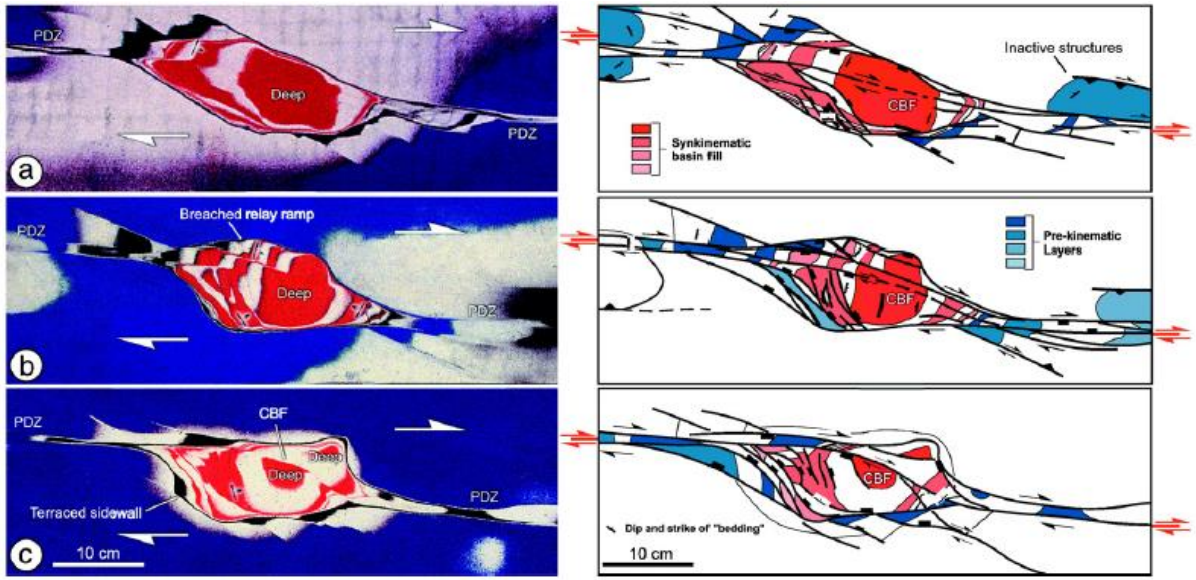
Минерализация в полостях отслоения в выпуклых частях слоя в замке складки

Минерализация на крыле складки и в замке в вогнутых частях слоев

ПРИМЕРЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Моделирование сдвиговой структуры растяжение pull-apart



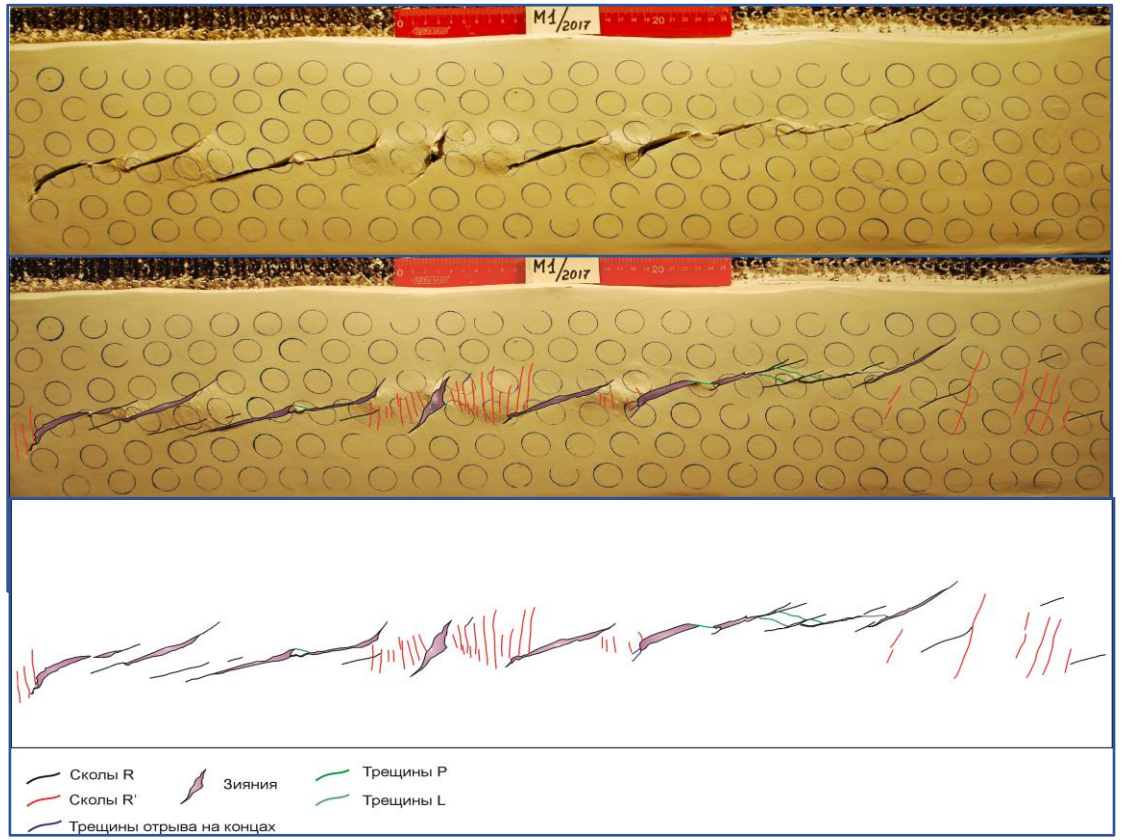


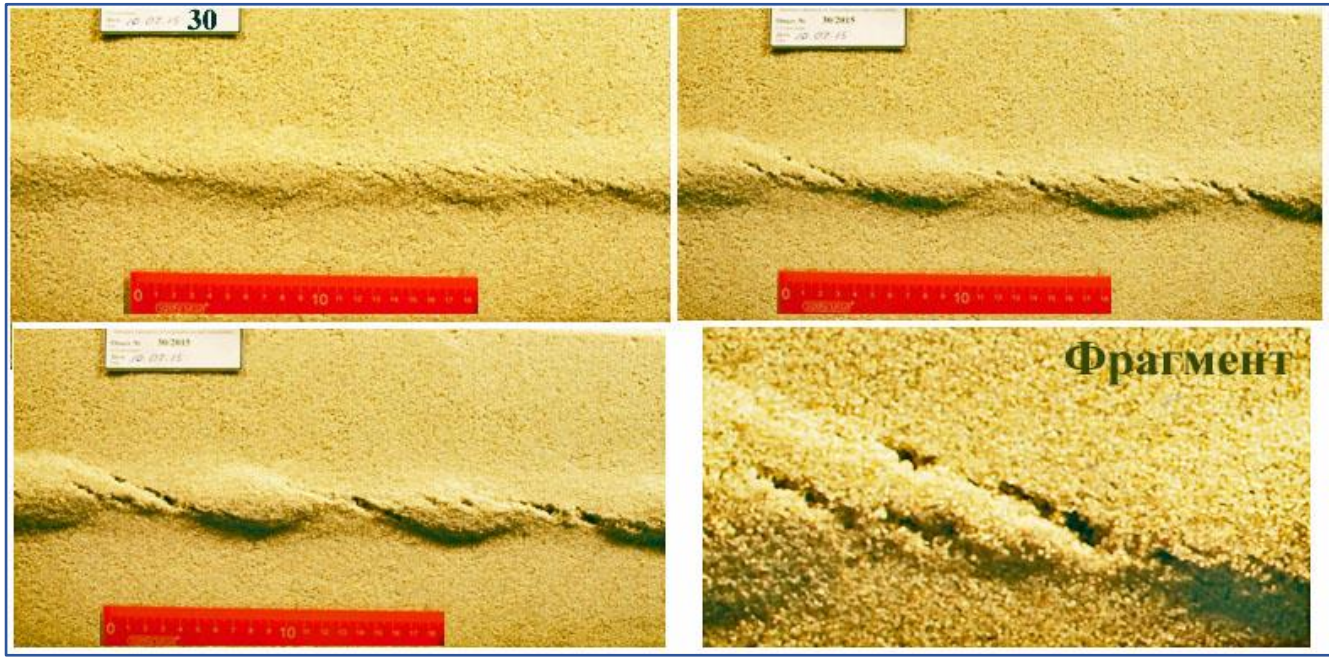
(Tim P. Dooley, Guido Schreurs, 2012)

ПРИМЕРЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Примеры моделей зон сдвига с использованием глины и песка

Фролова и др. 2018.
Лаборатория тектонофизики и геотектоники геологического факультета МГУ

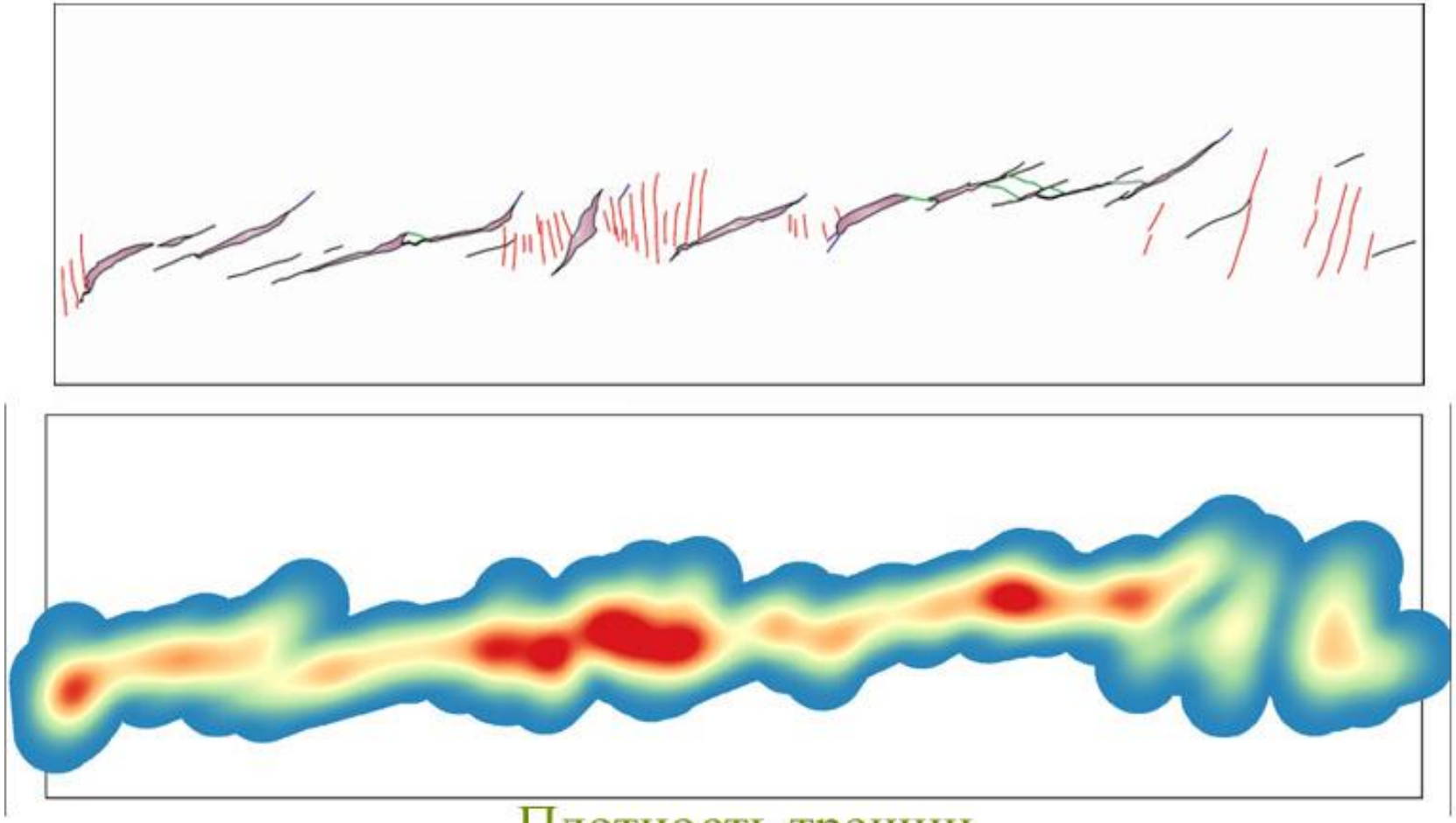




Фролова и др. 2018

ПРИМЕРЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Простой сдвиг. Количественная оценка густоты трещин

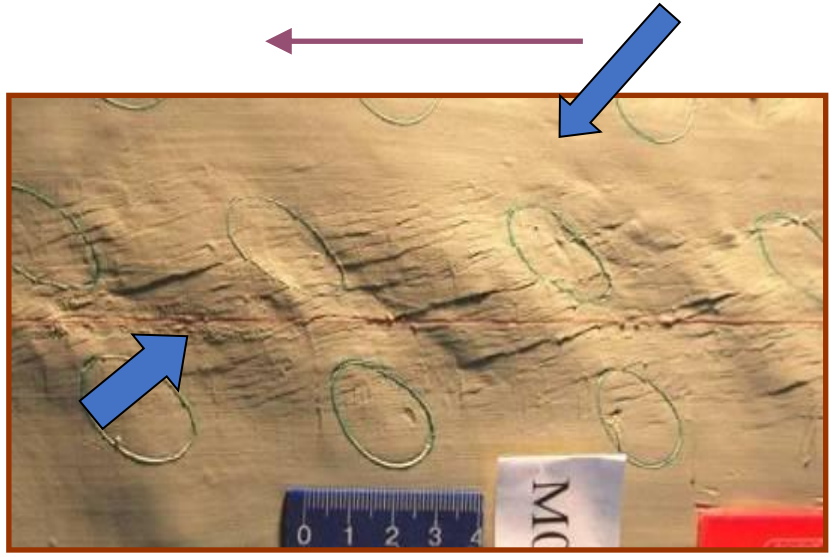


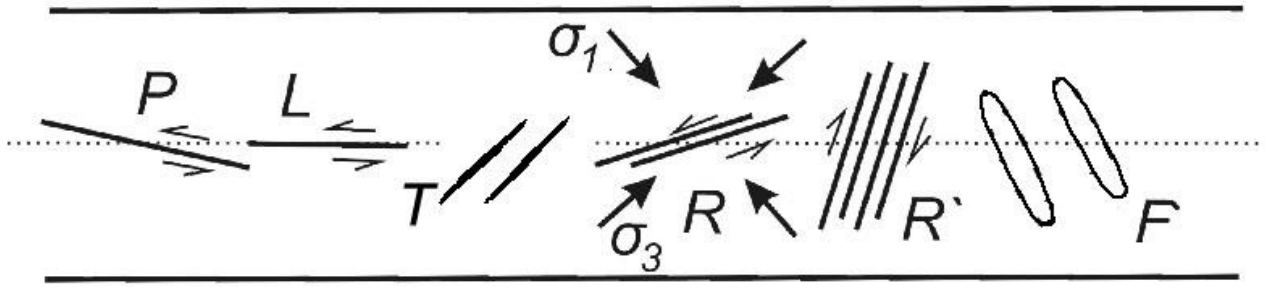
Фролова и др. 2018

ПРИМЕРЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Эшелонированные складки над сдвигом в фундаменте

Отчетливо выраженные эшелонированные складки в модели из влажной глины со слабой горизонтальной неоднородностью.
Оси складок перпендикулярны оси максимального сжатия.
Лаборатория тектонофизики и геотектоники геологического факультета МГУ.





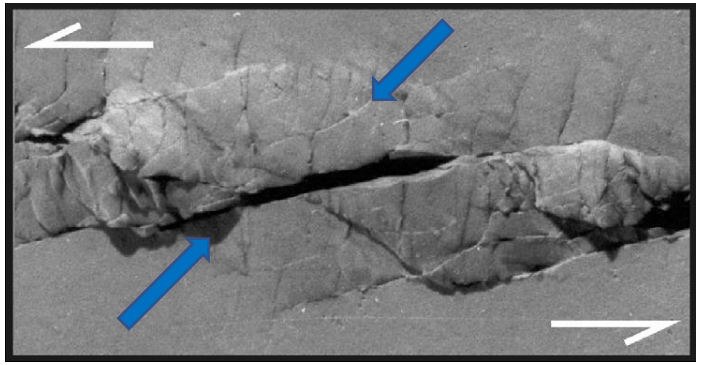
Структурный парагенез сдвиговой зоны *(по Ребецкому, 2008)*

Это общепринятые представления о формировании эшелонированых валообразных поднятий (складок) в зонах сдвига

Фролова и др. 2018

ПРИМЕРЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

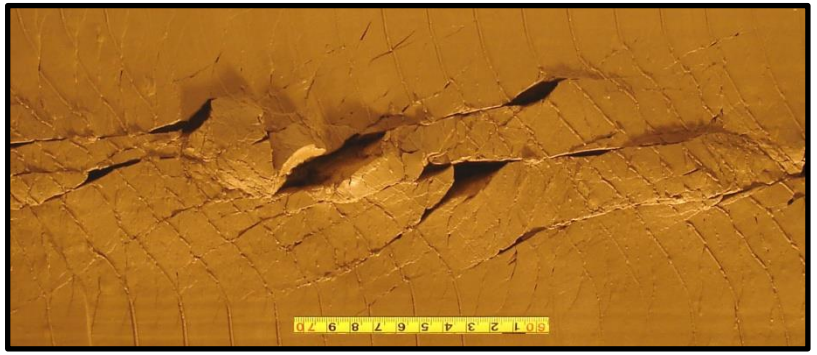
Валообразные поднятия над сдвигом в фундаменте



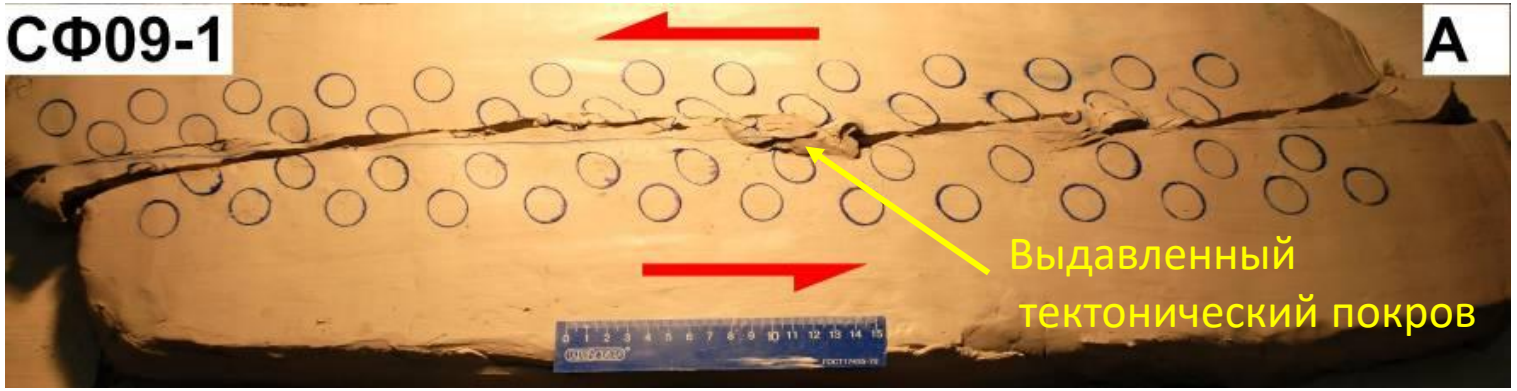
(Atmaoui, 2005)

(МГУ)

У этих поднятий другая ориентировка
и иной механизм формирования



(Черемных, 2015)



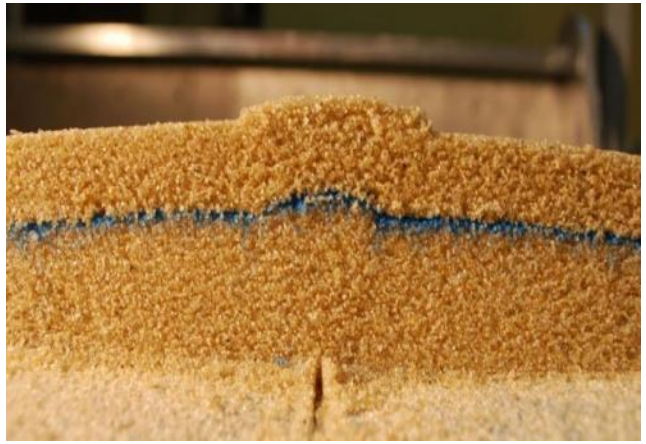
(МГУ)

Фролова и др. 2018

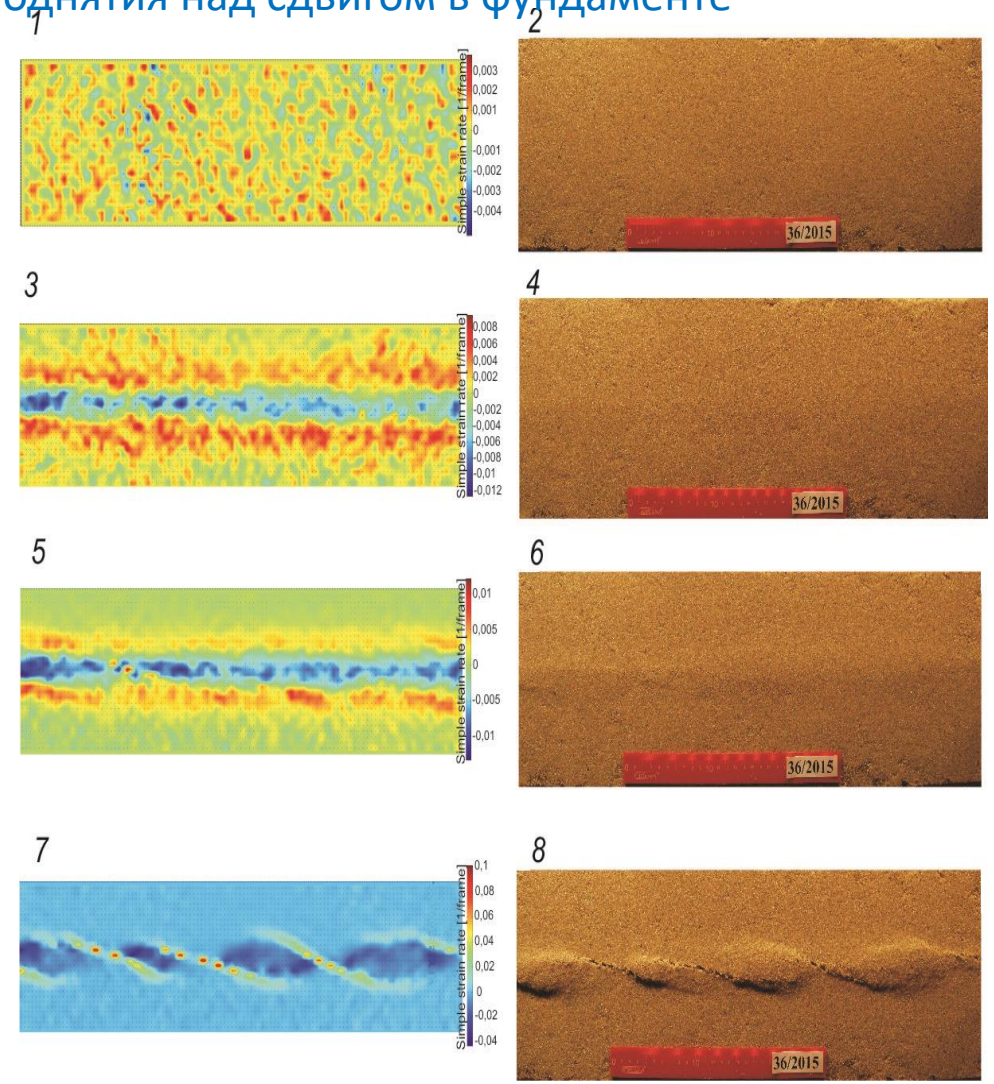
ПРИМЕРЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Валообразные поднятия над сдвигом в фундаменте

Цветковые структуры



Опыт 26. Разрезы. Хорошо видна цветковая структура и асимметрия вала

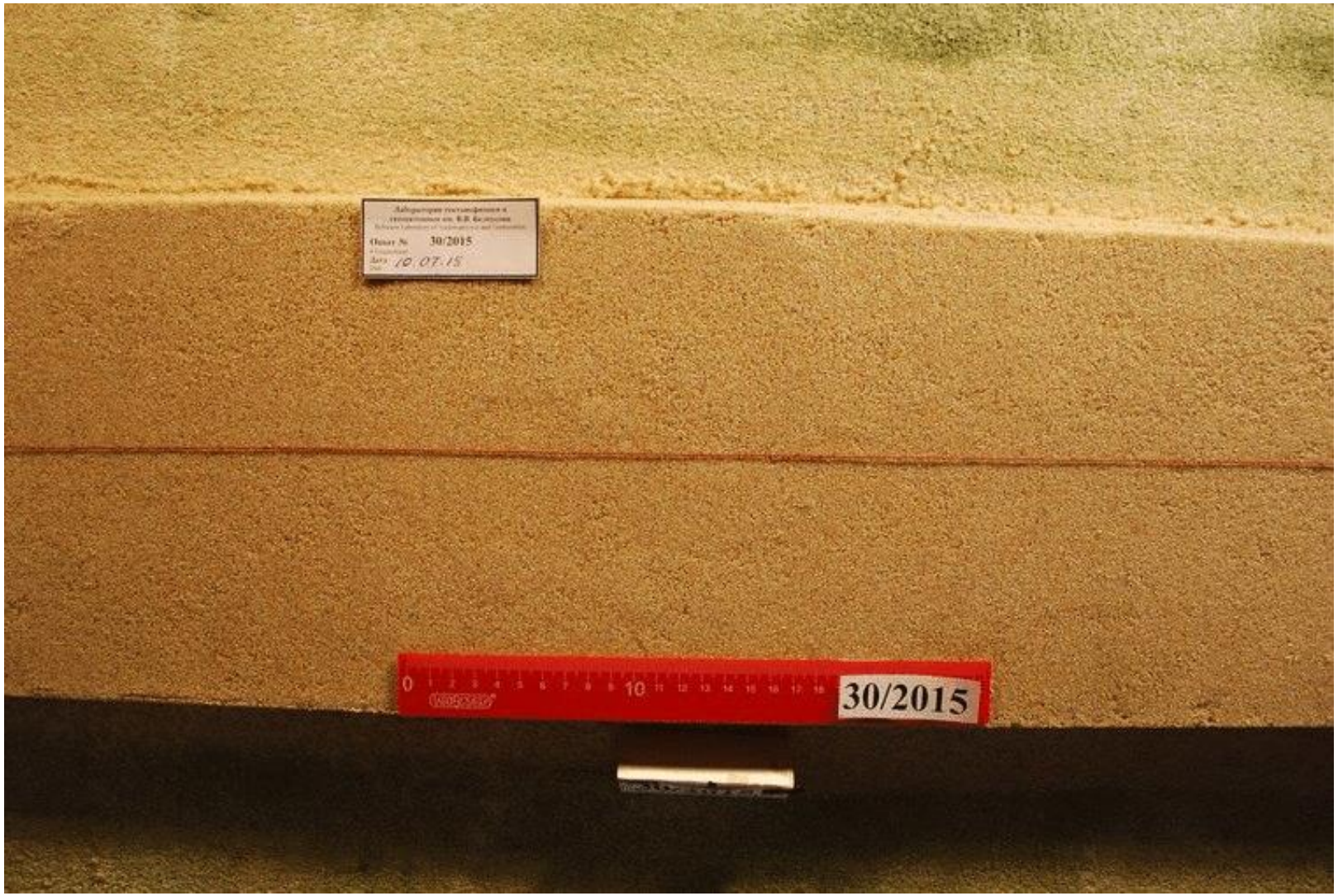


Фролова и др. 2018

Опыт 36. Развитие структуры. Справа – фото, слева – изображения, полученные после обработки фотографий с использованием метода PIV (цифровая трассерная визуализация точек – измерение перемещения частиц за интервал времени, холодные цвета – точки сближаются, теплые – удаляются)

ПРИМЕРЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Push-Up- структуры горизонтального отжимания

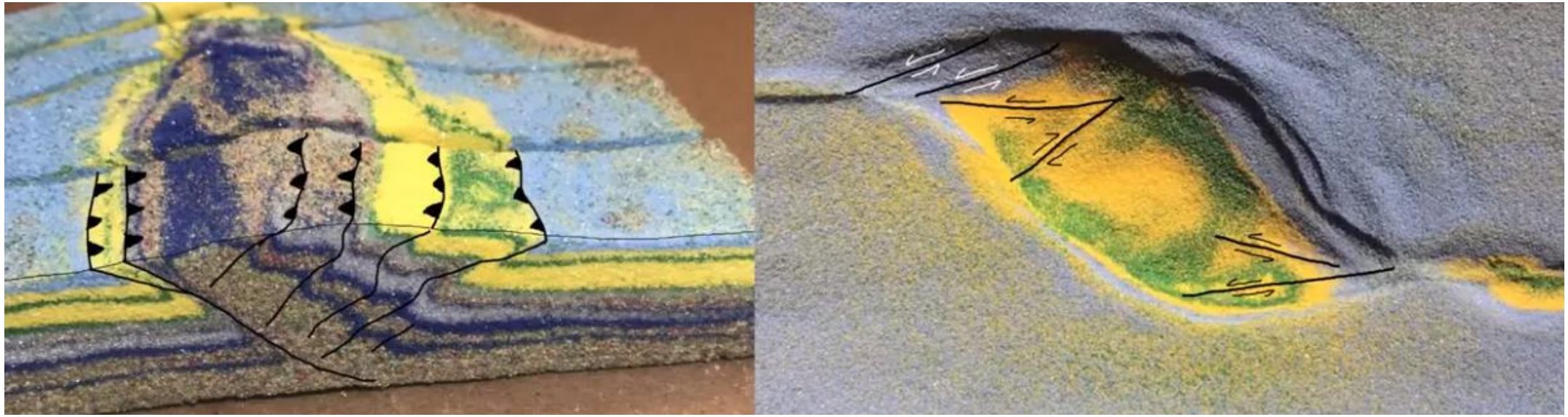


Развитие деформационного процесса формирования кулисных сдвигов и валообразных поднятий Push-Up в песчаной модели

Фролова и др. 2018

ПРИМЕРЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Структуры сжатия и выдавливания Push-Up
в зоне сочленения кулисных сдвигов

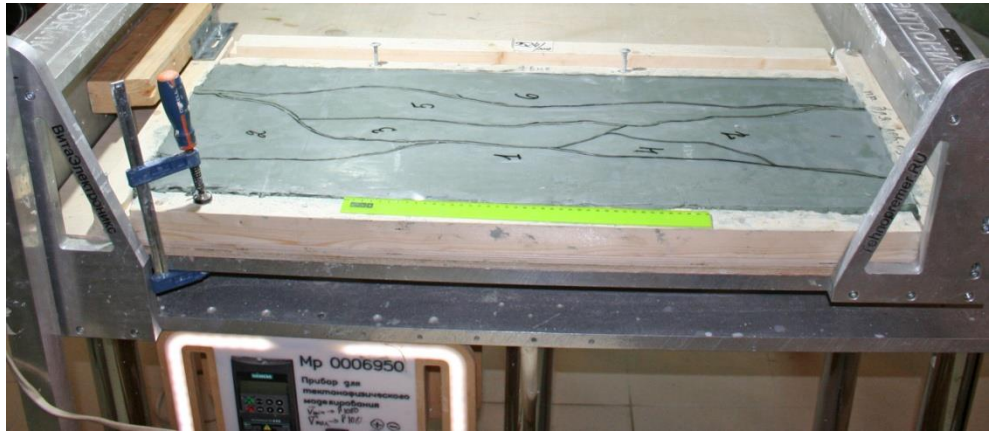


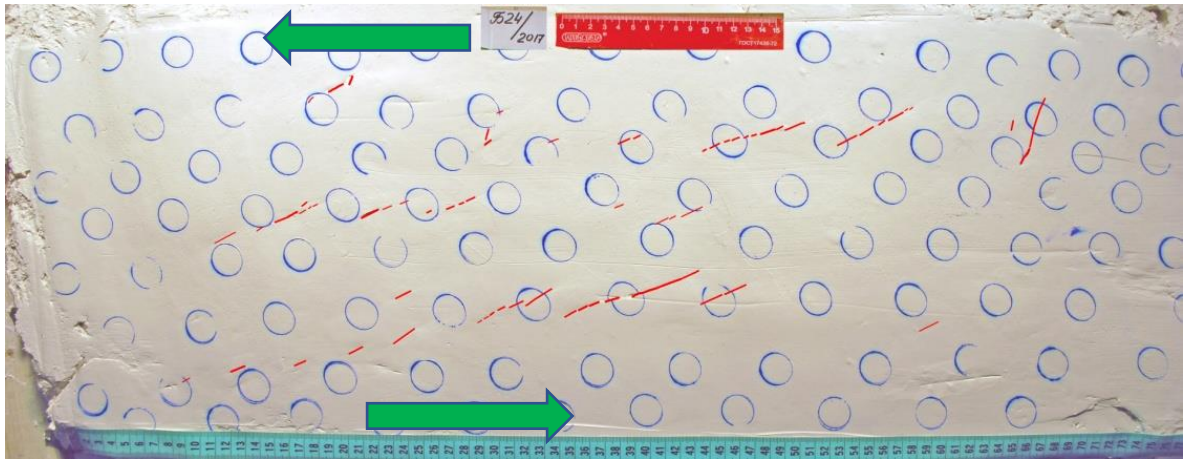
TheGeoModels

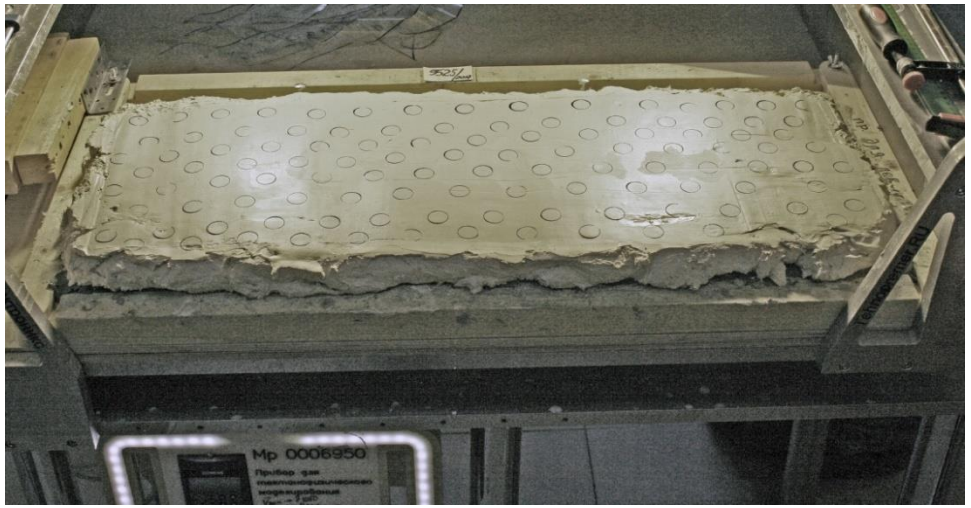
АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БАИМСКОЙ СДВИГОВОЙ ЗОНЫ

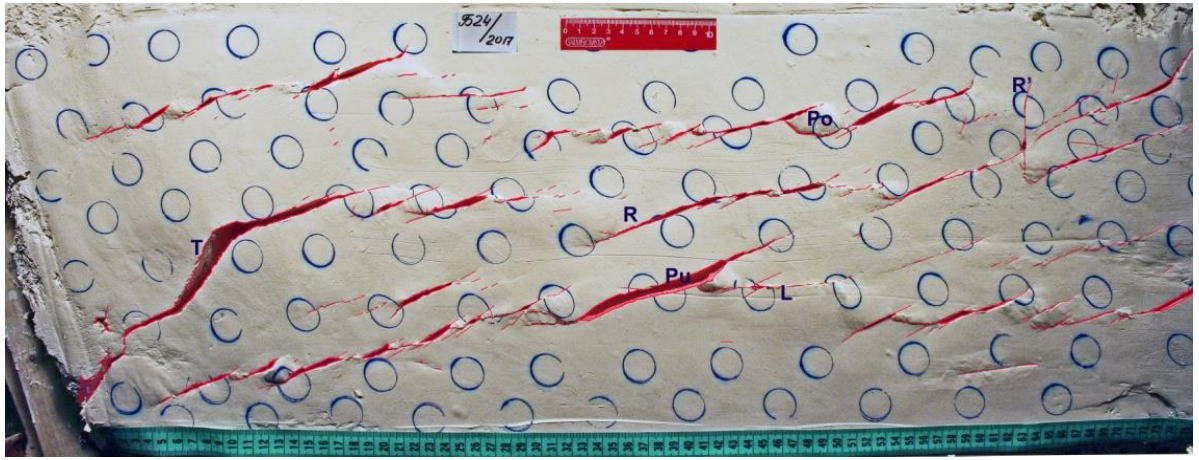
1 фаза – левый сдвиг (дорудный)

Модель: Перемещение блоков в широкой зоне сдвига с «чехлом» над блоками







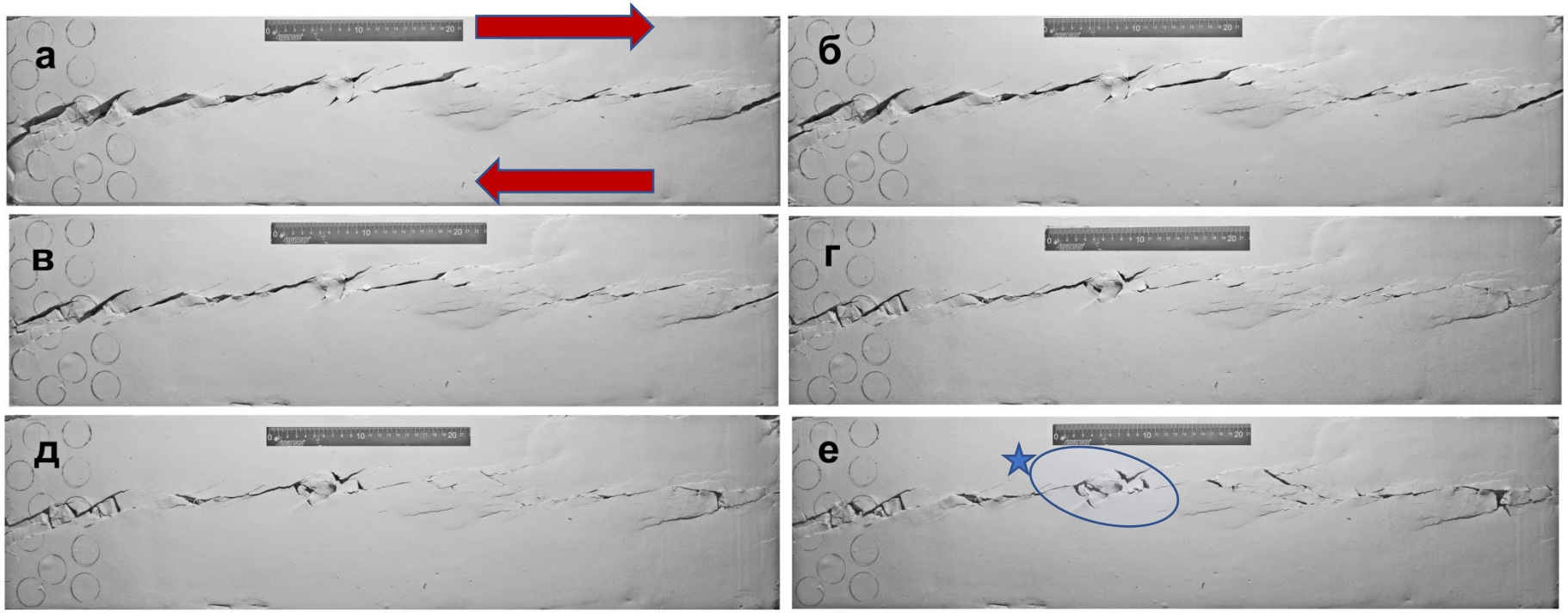


«Чехол»: каолиновая глина 40%влажности.h=3,5 см.V=2,7 см/час.γ_{max}=0,2

АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БАИМСКОЙ СДВИГОВОЙ ЗОНЫ

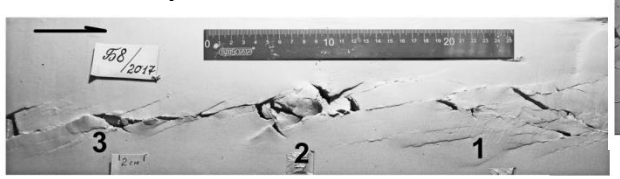
2-я фаза – рудоконтролирующий правый сдвиг

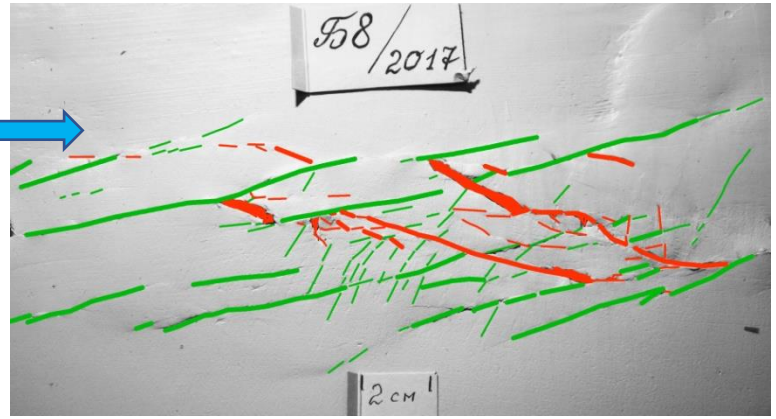
Формирование трещин отрыва во время второй фазы деформации



а-е стадии развития структуры при увеличении амплитуды правого сдвига

Фрагменты

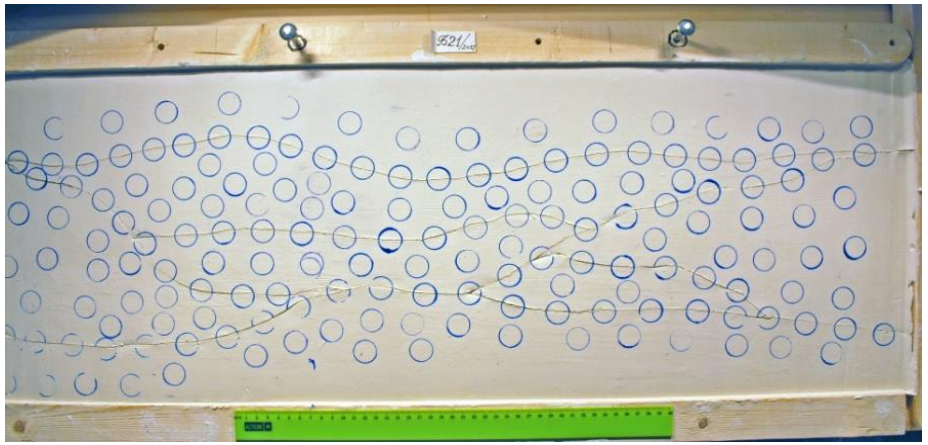


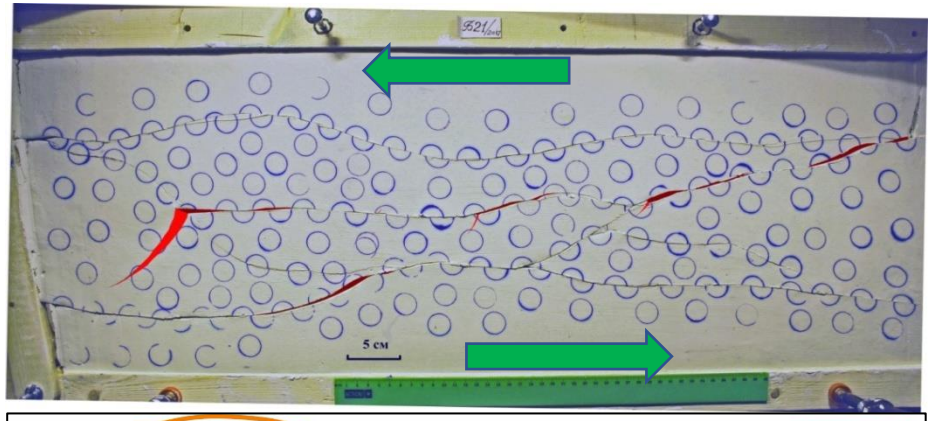


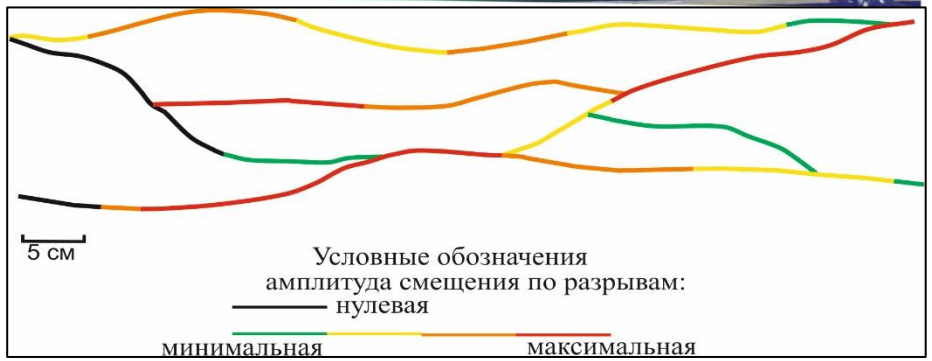
Фрагмент. Зеленым показаны трещины первой фазы, красным – второй

АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БАИМСКОЙ СДВИГОВОЙ ЗОНЫ

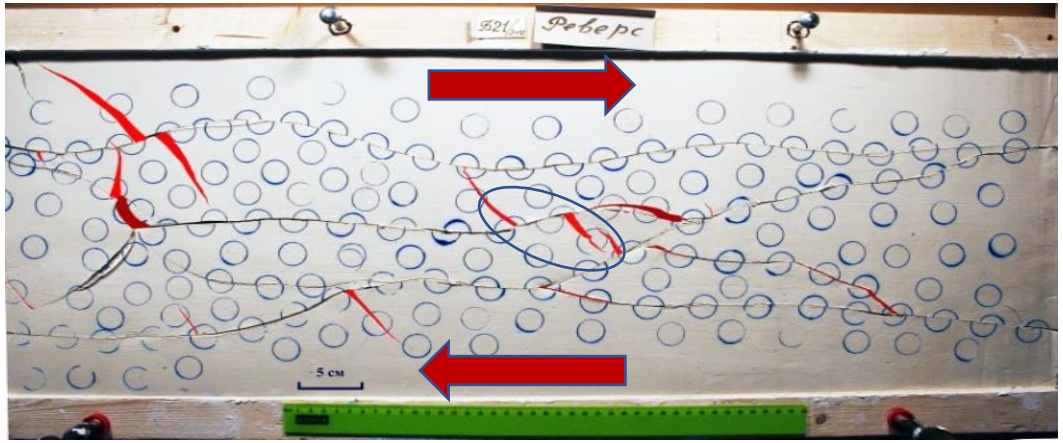
Оценка величины деформации и амплитуд смещения по разрывам

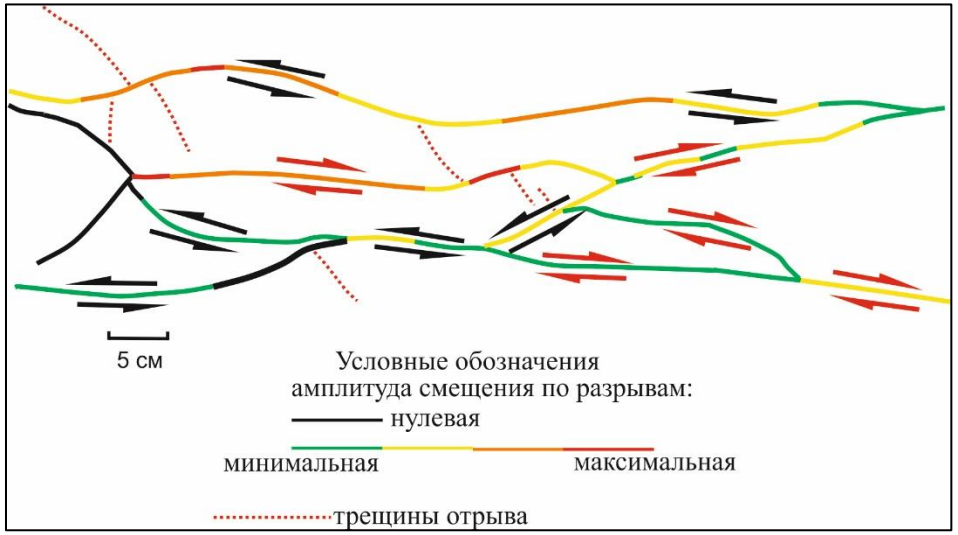






Первая фаза – левый сдвиг





Вторая фаза – правый сдвиг

Глина каолиновая влажность 40%. V=3,25 см/час. γ_{max}=0,21

Место пересечения интрузивного тела с Егдыгкычским сдвигом

АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БАИМСКОЙ СДВИГОВОЙ ЗОНЫ

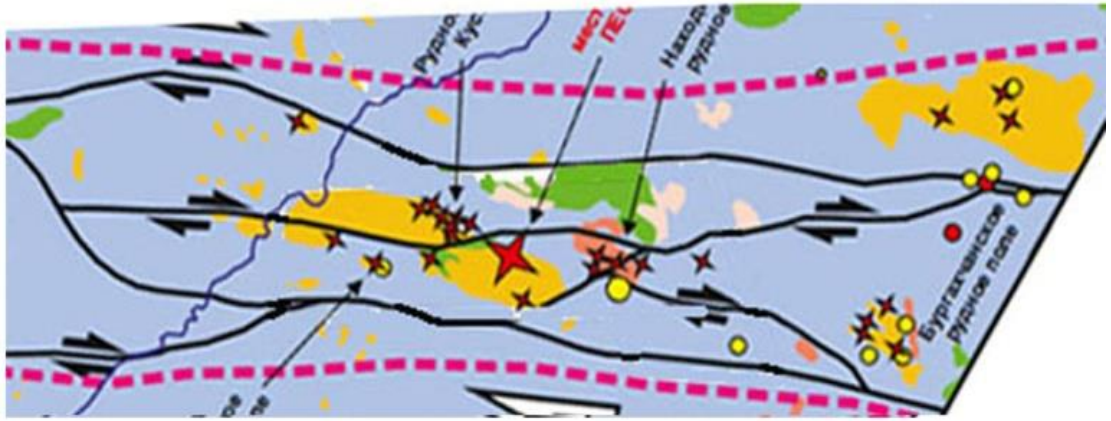
Сдвиговая зона с «интрузивными телами»

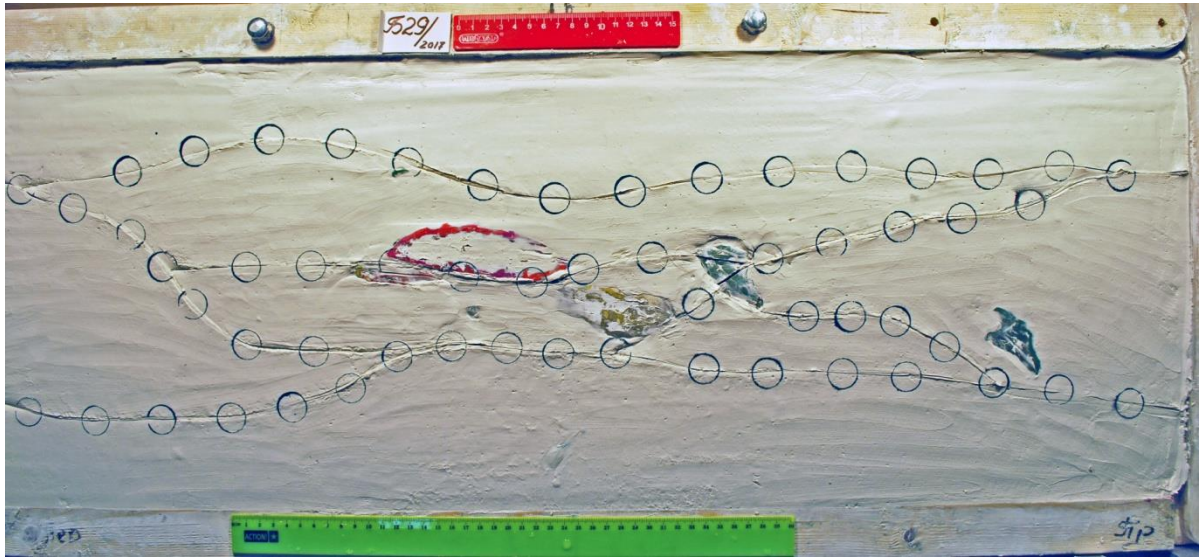
Неоднородности, имитирующие интрузивные тела

Влажная глина.
Только правый сдвиг

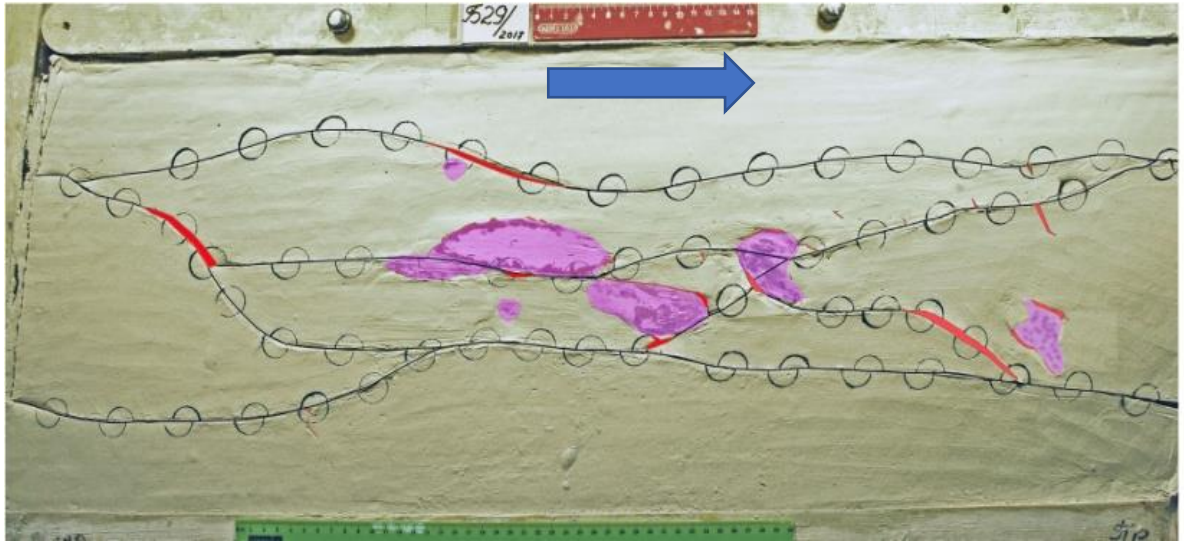
Каолиновая глина 38% влажности.
h=3 см. V=4,7 см/час. γ_{max}=0,24

Геологическая схема Баимской зоны





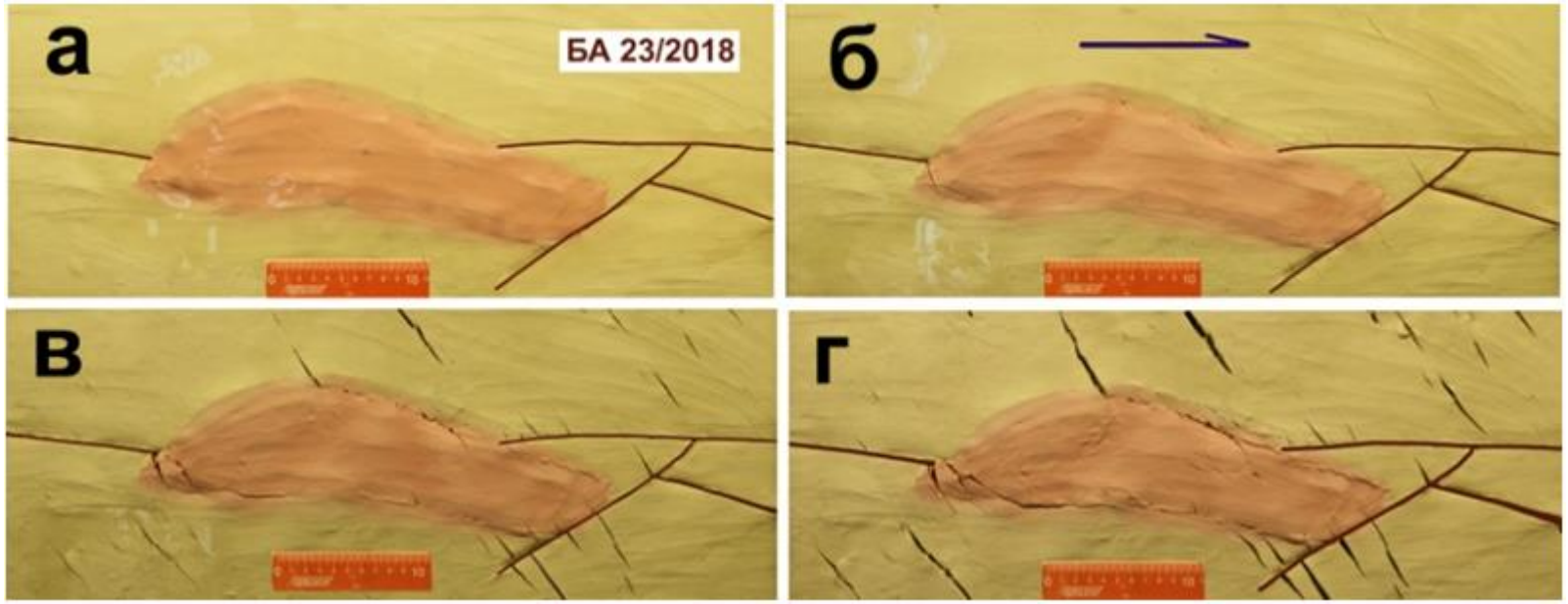
До деформации



После деформации

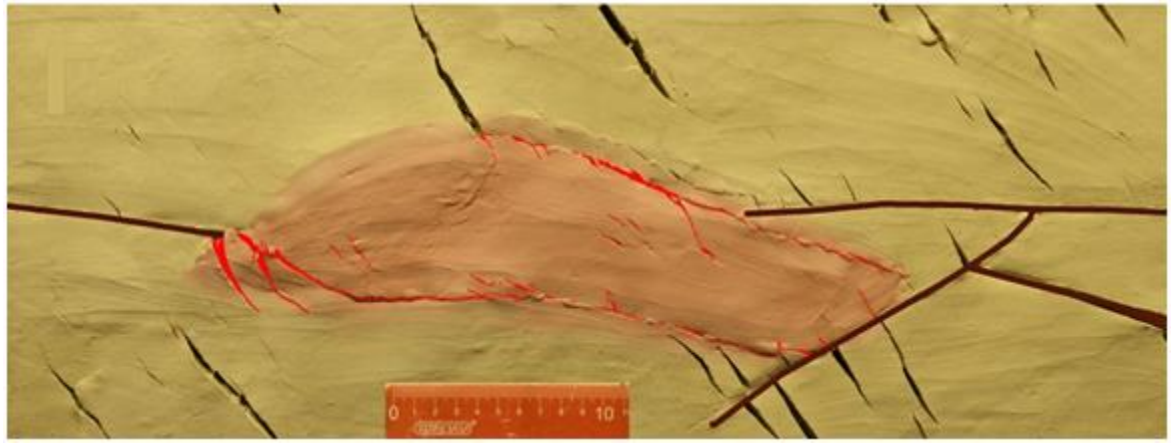
АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БАИМСКОЙ СДВИГОВОЙ ЗОНЫ

Сдвиговая деформация в теле из влажной глины – аналоге Егдыгкычского интрузивного массива.



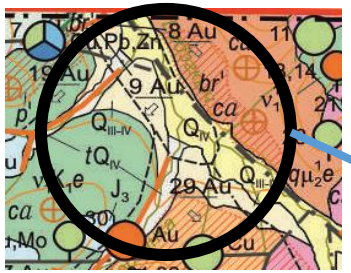
Деформированные приконтактовые участки интрузива – участки растяжения – структурные ловушки рудной минерализации

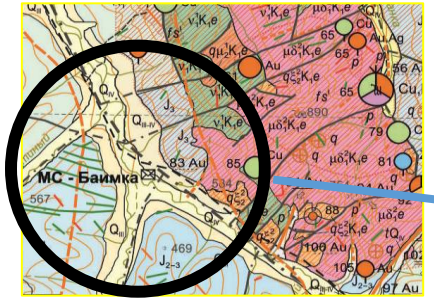
Кулисные трещины скалывания с растяжением соответствуют природным разрывам и дайкам



БАИМСКАЯ СДВИГОВАЯ ЗОНА - ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. ПРОГНОЗ РУДНЫХ ШТОКВЕРКОВ

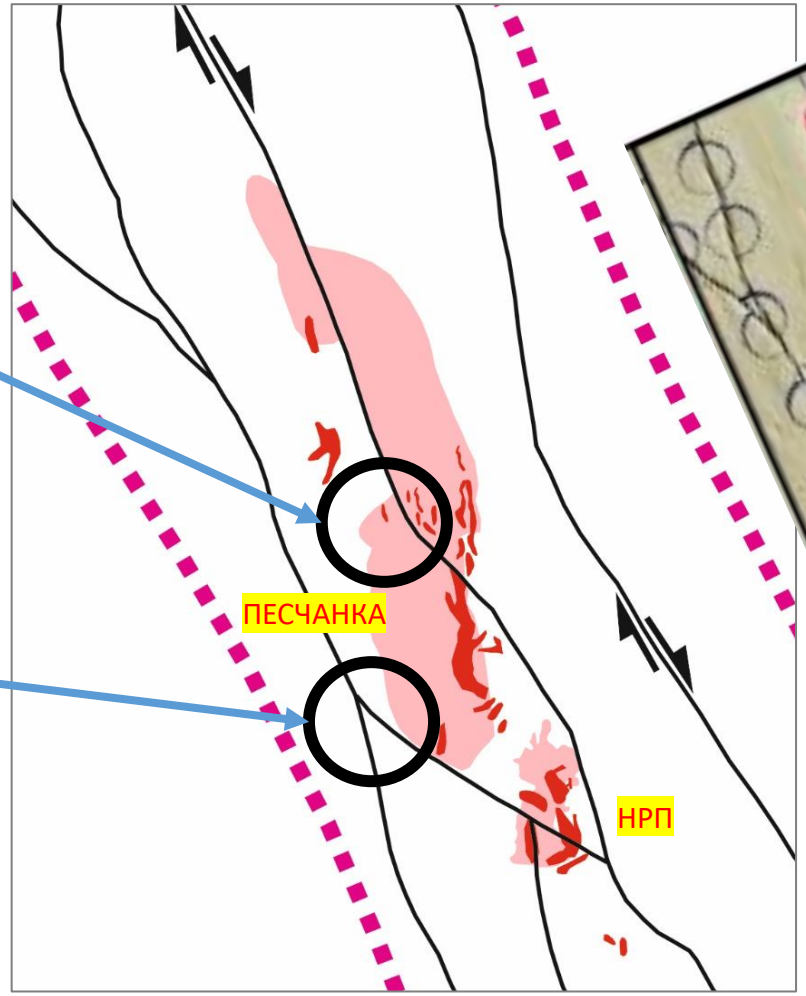
В долине р. Егдыгкыч прогнозируется слепой рудный штокверк





В долине р. Баимка есть предпосылки обнаружения медного штокверка: узел разломов, порфировые штоки, проявления меди и золота

Медные штокверки Баимской сдвиговой зоны



Тектонофизическая модель правого сдвига с интрузиями. Красное - структуры растяжения

ФАЗЫ ДЕФОРМАЦИИ:

а – окончание 1-фазы деформации левого сдвига и внедрение интрузивных тел

б – завершение 2-фазы деформации правого сдвига

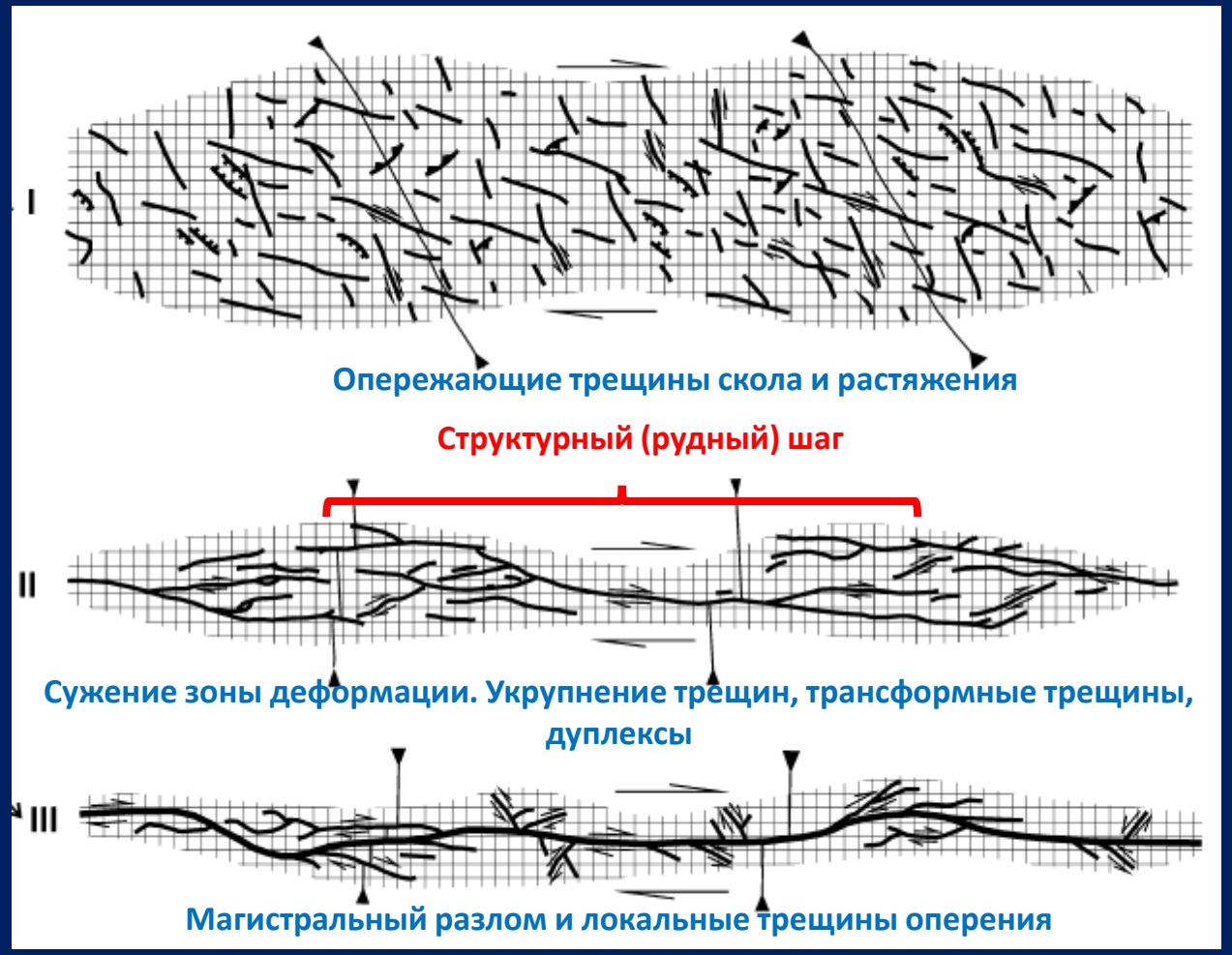
Структуры растяжения на модели соответствуют в натуре потенциальным рудным полям в узлах пересечения сдвигов под аллювиальными отложениями в долине р.Баимка – необходимо проведение поисковых работ

Выводы по моделированию Баимской сдвиговой зоны

Результаты моделирования реверсной сдвиговых зоны показывают, что наличие второй фазы деформации (реверсное движение по сдвигам) приводит к формированию трещин отрыва, и, соответственно, к повышению флюидопроницаемости.

В Баимской сдвиговой зоне правому сдвигу предшествовал левый, что и обусловило развитие зон декомпрессии – структурных ловушек, с которыми связаны месторождения и рудопроявления.

СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗЛОМА. СТАДИИ РАЗВИТИЯ



Семинский К.Ж.
ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ РАЗЛОМНЫХ ЗОН. ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ АСПЕКТ. 2003

Публикации: Шерман, Борняков, Семинский и др, 1986-2014;

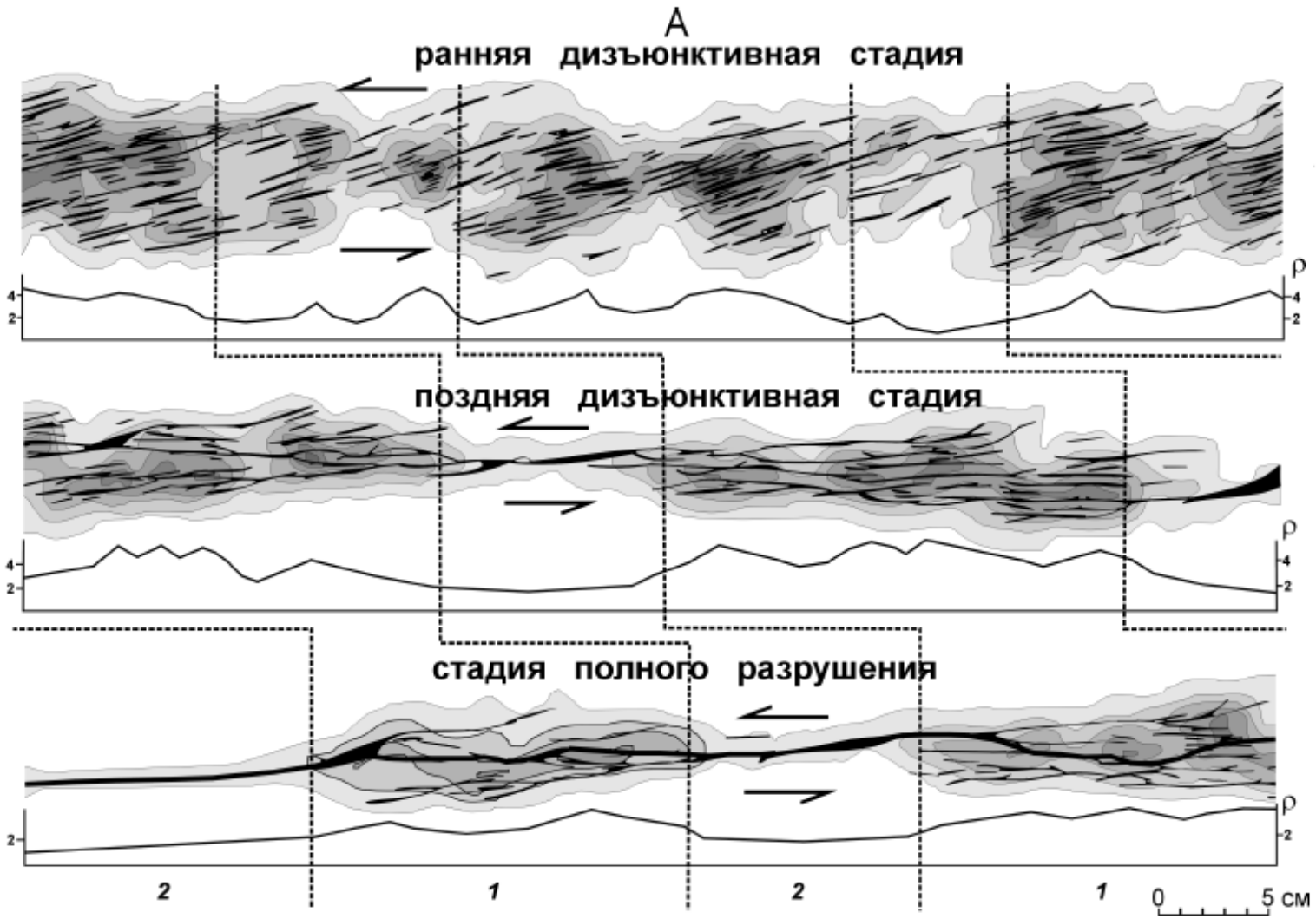
Стадии развития разлома:

I – Ранняя дизъюнктивная

II – Поздняя дизъюнктивная

III –Полного разрушения (Магистральный Сместитель)

СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СДВИГА



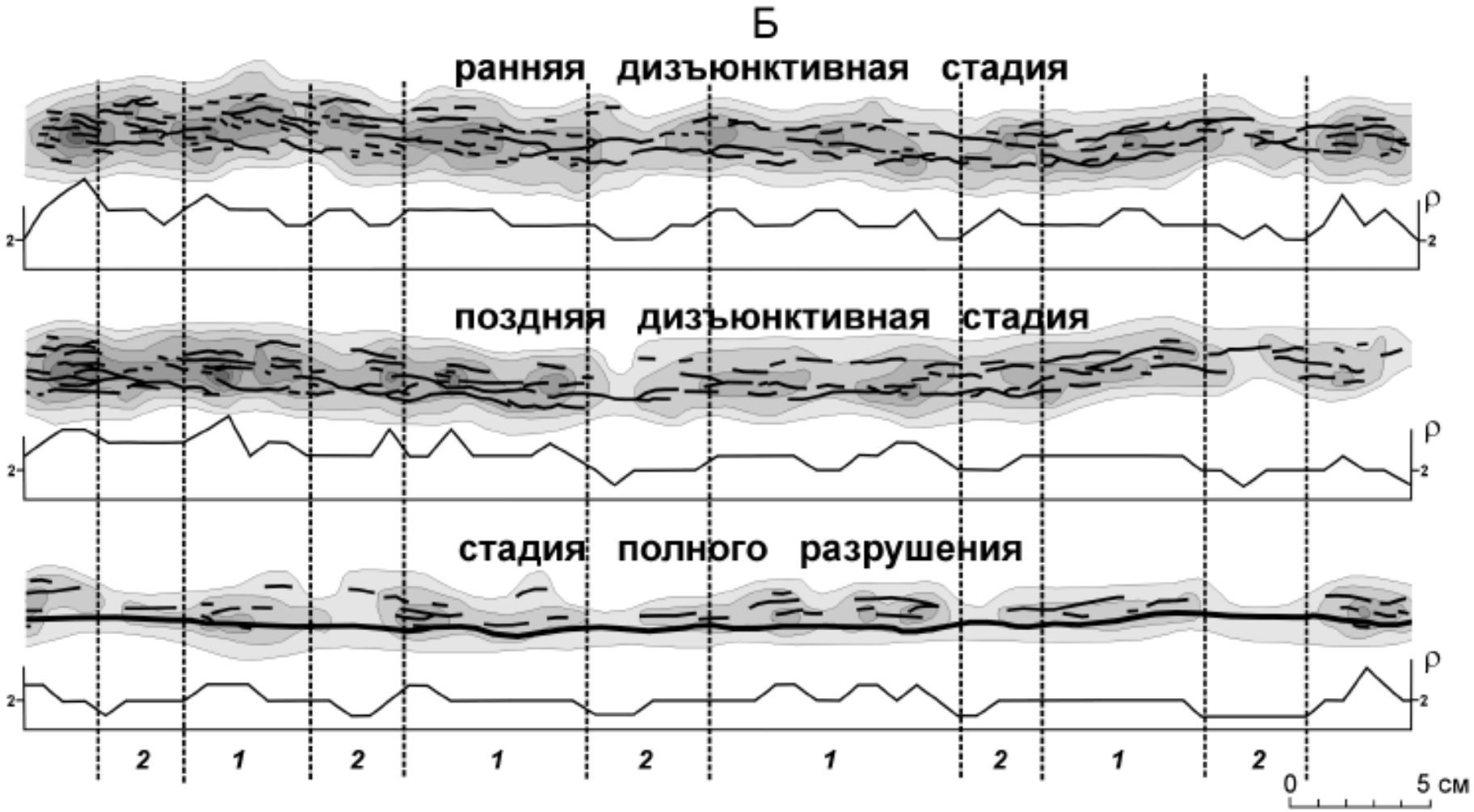
Структурная схема разрывов, график и карты распределения их плотности (r) в изолиниях, соответствующие главным стадиям развития **СДВИГОВОЙ** разломной зоны в упруго-пластичной модели.

Пунктирные линии разделяют участки (1 и 2) разного структурного развития.

1 – разрывы с незначительной (**а**) и значительной (**б**) раздвиговой составляющей смещения;
2 – области с количеством разрывов в единице площади, равным 1, 2, 3, 4, 5 и 6.

(Семинский, 2012)

СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАДВИГА



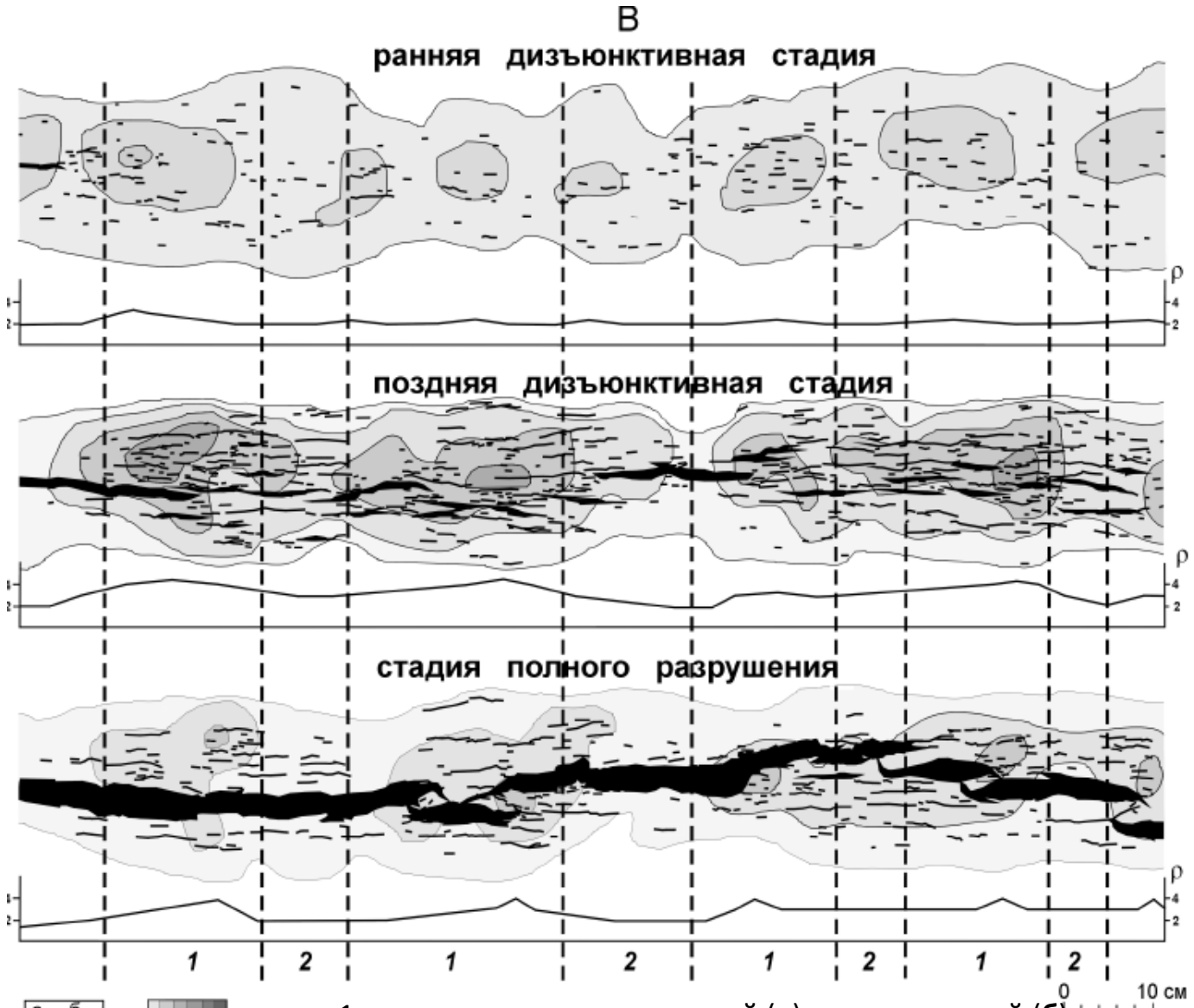
Структурная схема разрывов, график и карты распределения их плотности (r) в изолиниях, соответствующие главным стадиям развития **НАДВИГОВОЙ** разломной зоны в упруго-пластичной модели.

Пунктирные линии разделяют участки (1 и 2) разного структурного развития.

1 – разрывы с незначительной (**а**) и значительной (**б**) раздвиговой составляющей смещения;
2 – области с количеством разрывов в единице площади, равным 1, 2, 3, 4, 5 и 6.

(Семинский, 2012)

СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СБРОСА



Структурная схема разрывов, график и карты распределения их плотности (r) в изолиниях, соответствующие главным стадиям развития **СБРОСОВОЙ** разломной зоны в упруго-пластичной модели.

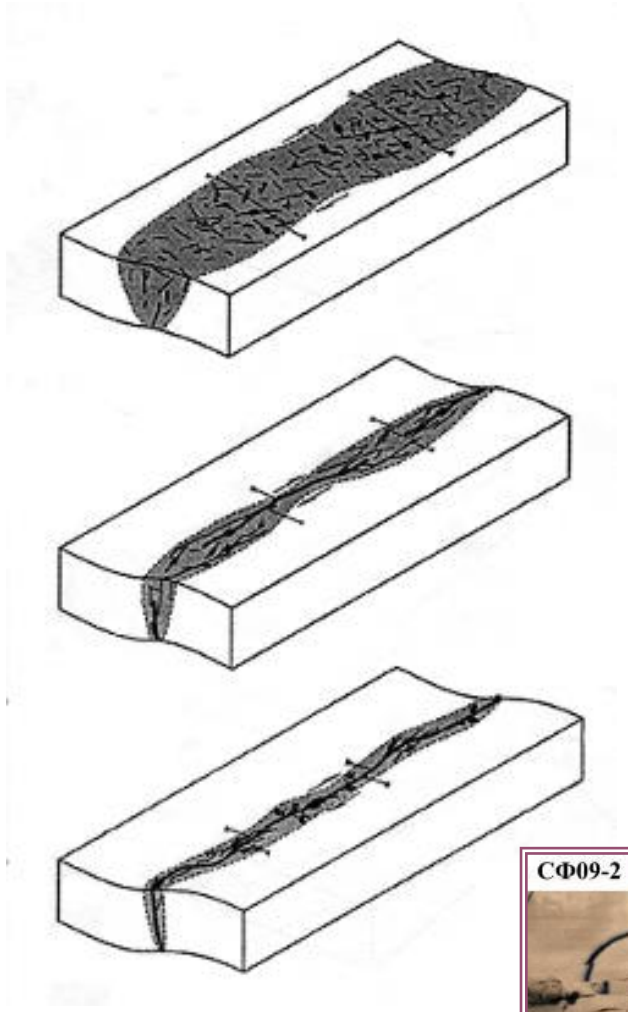
Пунктирные линии разделяют участки (1 и 2) разного структурного развития.

а б 1 2

1 – разрывы с незначительной (**а**) и значительной (**б**) раздвиговой составляющей смещения;
2 – области с количеством разрывов в единице площади, равным 1, 2, 3, 4, 5 и 6.

(Семинский, 2012)

СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗЛОМА



Зона динамического влияния разлома

1. Максимальная ширина этой зоны (М) **для конца первой стадии развития** зависит, прежде всего, от толщины чехла и связана с ней прямой зависимостью. Коэффициент пропорциональности зависит от условий моделирования.

2. Существенно меньший вклад в параметр М вносят вязкость и скорость деформирования

3. Зона динамического влияния сдвигового разлома с течением времени сужается. Процесс структурообразования локализуется во все более узкой области. Эта область, кроме толщины чехла, обратно пропорционально зависит от амплитуды смещения по разлому

Сужение зоны динамического влияния разлома Одновременно с поворотом сколов R’ приводит к S-образному искривлению этих сколов

СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗЛОМА

Структурные парагенезы опережающих и оперяющих трещин

Сдвиг

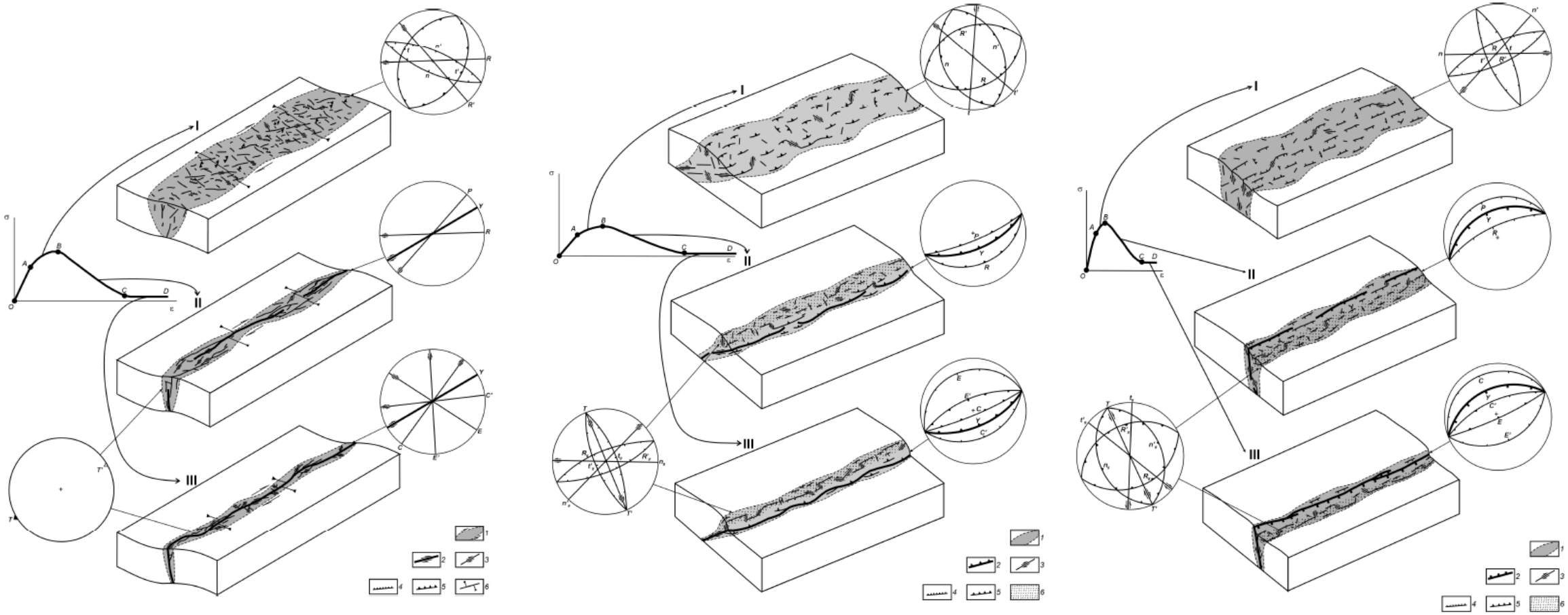
Надвиг

Сброс

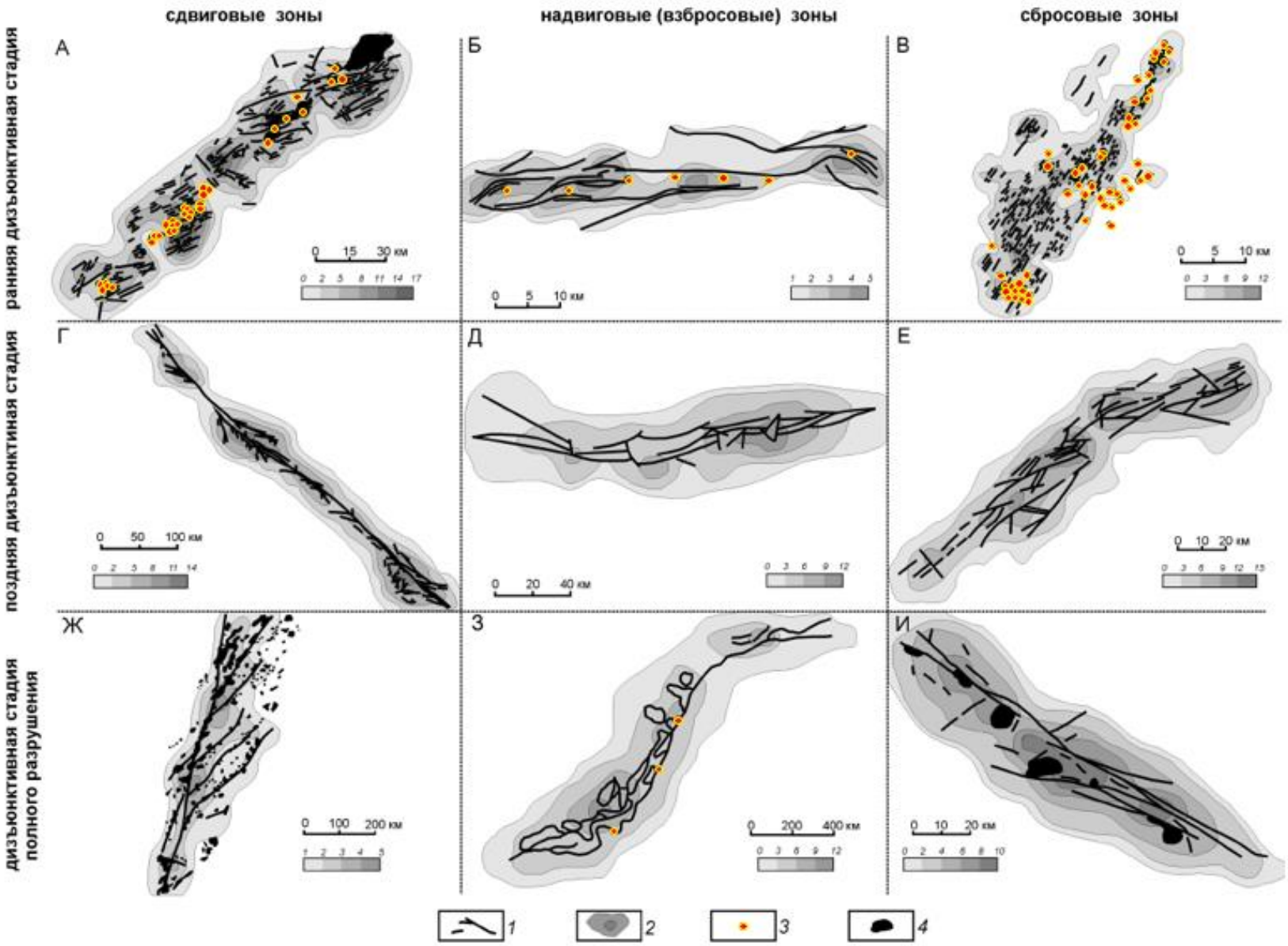
Стадия 1

Стадия 2

Стадия 3



СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗЛОМА



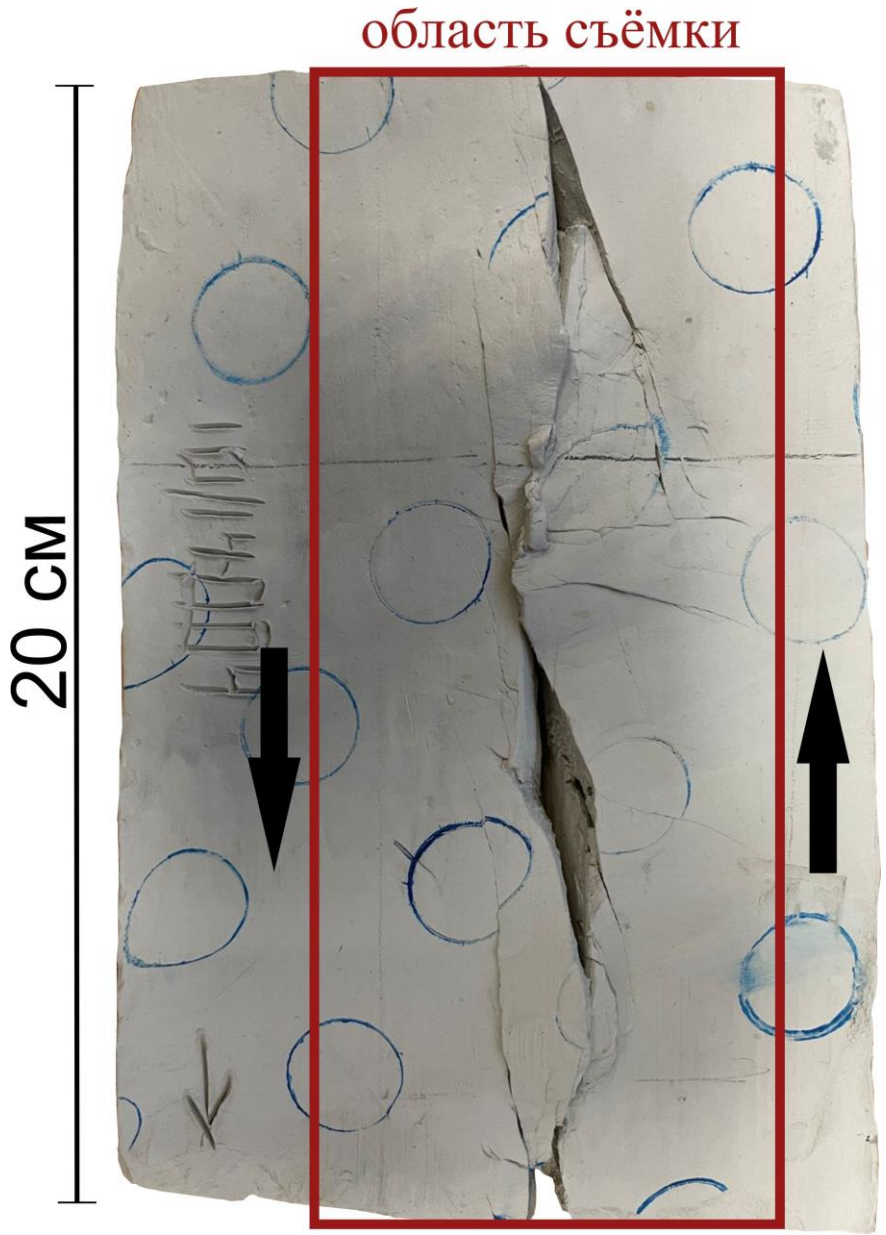
Региональные разломные зоны разных стадий развития

А. Дербеке-Нельгехинская сдвиговая зона в Верхоянье
Б. Фрагмент Никитовской надвиговой зоны на Донбассе
В. Узон-Гейзерная сбросовая зона на Камчатке
Г. Чингизская сдвиговая зона в Центральном Казахстане
Д. Туркестанская взбросовая зона в Тянь-Шане
Е. Кичеро-Джялоканская сбросовая зона на Северо-Байкальском нагорье
Ж. Сихотэ-Алинская сдвиговая зона в Приморье
З. Скандинавская надвиговая зона по
И. Сбросовая зона Ло во Вьетнаме

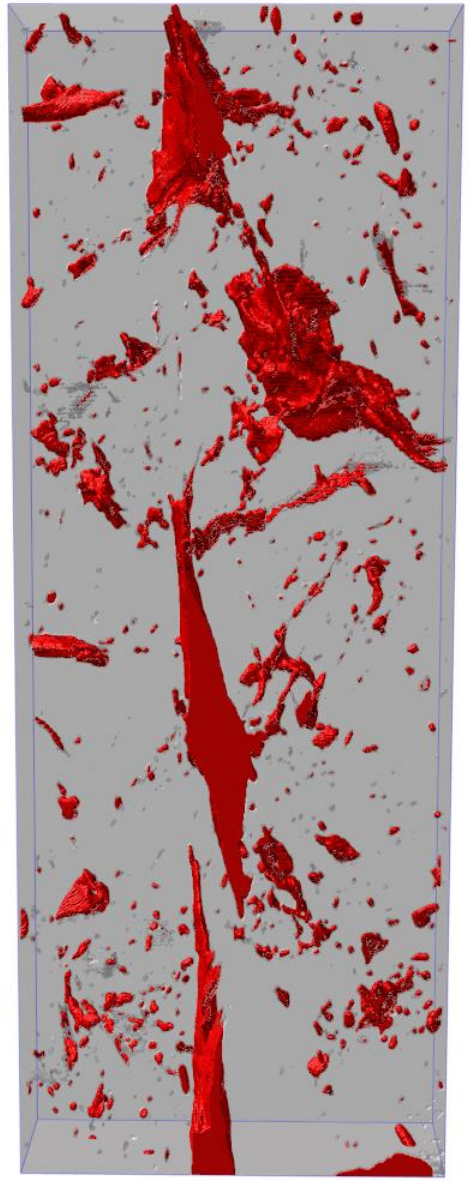
1 – разломы; ***2*** – изолинии плотности разломов; ***3*** – рудопроявления и месторождения; ***4*** – интрузивные массивы

КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ АНАЛОГОВОЙ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СДВИГА

(ИГТ и Лаборатория тектонофизики и геотектоники геологического факультета МГУ)



Общая стереологическая модель образца



КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Компьютерная томография тектонофизических моделей открывает большие перспективы изучения структур в объеме и сравнения их с природными аналогами

Изучение морфологии и локализации структурных ловушек позволит более эффективно прогнозировать рудные скопления