



# РОЛЬ СТРУКТУРНОЙ ГЕОЛОГИИ В ПОИСКАХ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ

Читалин А.Ф.

*ООО «Институт геотехнологий»*

*ВИМС*

*Москва*

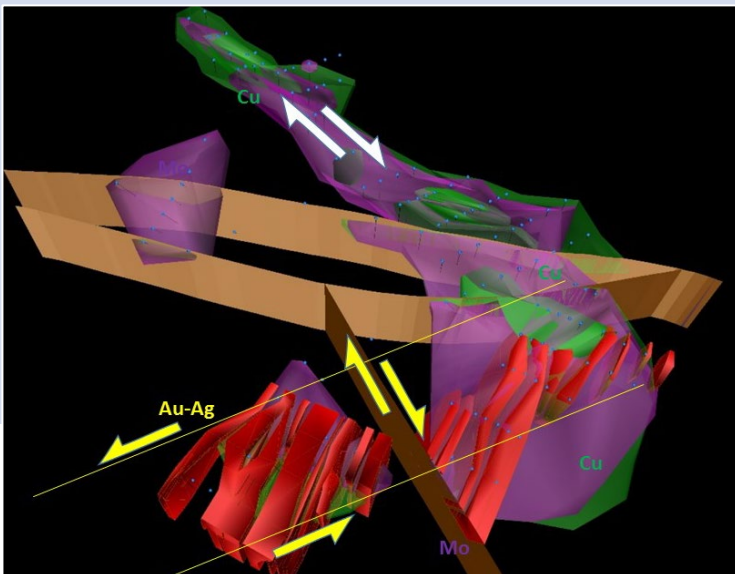
*22 ноября 2023 г*

- Выделение **рудоконтролирующих структур и трендов минерализации**
- Определение **морфологии и кинематики** рудоконтролирующих разломов и зон разломов на разных этапах их эволюции
- Выделение **структурно-минеральных парагенезов** – дорудных, рудных, пострудных
- Определение возможных **типов структурных ловушек** рудной минерализации
- Определение размера и направления **структурного шага** рудных залежей - богатой минерализации (**рудный шаг**)
- Создание **геолого-структурной модели**

## ЦЕЛЬ-СОЗДАНИЕ ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ РУДНОГО ОБЪЕКТА

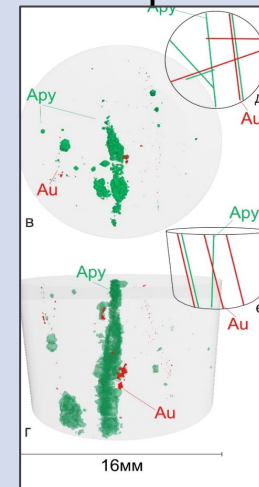
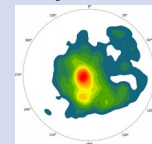
### ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ

- Основа комплексной генетической модели месторождения
- Основа блочной модели запасов/ресурсов
- **Основа прогнозно-поисковой модели** прогноз структурных ловушек минерализации: рудных зон и узлов, рудных полей, месторождений, рудных залежей, рудных столбов и лент

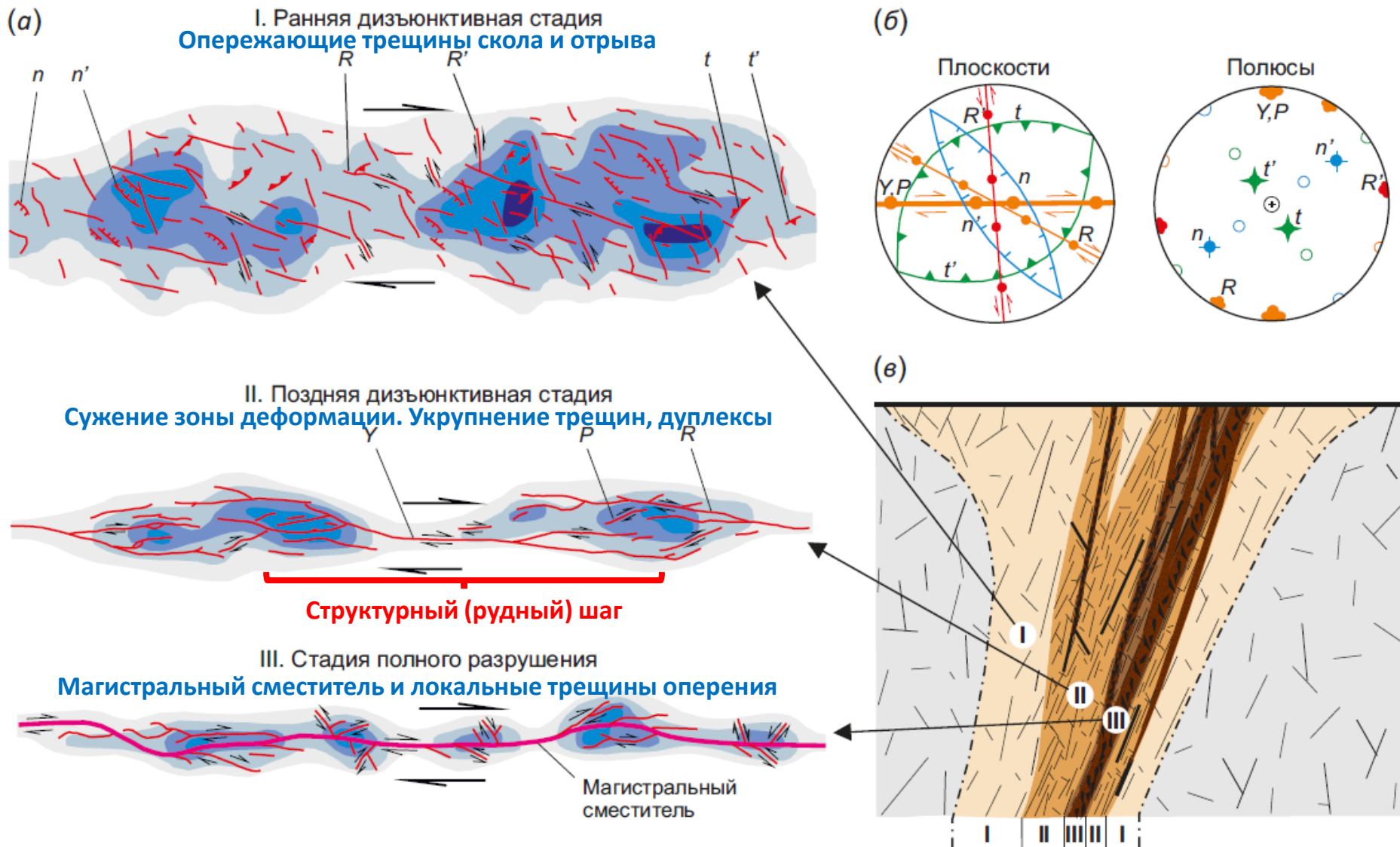


### МЕТОДЫ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

- **Полевые методы – основа структурного анализа**  
Структурное картирование на основе детальных БПЛА-съемок, тектонофизические методы. Выделение разновозрастных структурных парагенезов;
- Микроструктурные исследования – детализация полевых данных, новая информация: микроструктуры, оптические узоры,
- Компьютерная томография ориентированного керна и образцов – 3D-анализ рудной структуры;
- Лидарная съемка обнажений - 3D-анализ трещиноватости;
- Структурная интерпретация карт,
- Компьютерный линеаментный анализ
- Структурная интерпретация мультиспектральных аномалий
- Тектонофизическое моделирование



# СТАДИИ РАЗВИТИЯ РАЗЛОМА-ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ



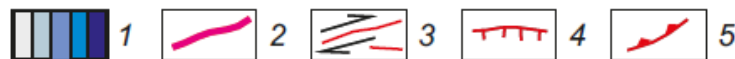
## Структура разломной зоны правого сдвига

(a) – строение разломной зоны на трех главных стадиях развития: 1 – участки с различным количеством разрывов в единице площади; 2 – магистральный сместитель (разрыв 1-го порядка); 3–5 – сдвиги (3), сбросы (4) и надвиги (5) 2-го порядка. Латинские буквы – разнотипные разрывы 2-го порядка ( $n'$ ,  $n$ ,  $R'$ ,  $R$ ,  $t'$ ,  $t$ ,  $P$ ) и магистральный сместитель 1-го порядка ( $Y$ ).

(б) – эталонные парагенезисы (трафареты) разрывов 2-го порядка для сдвиговой зоны, представленные на круговых диаграммах в плоскостях и полюсах. (в) – модель поперечной зональности разлома, прошедшего в своем развитии все три стадии разрывообразования

(Семинский и др, 2023; публикации: Шерман, Борняков, Семинский и др, 1986-2023).

Институт Земной Коры СО РАН, Иркутск



Соотношение этапов рудного процесса со стадиями развития разлома ?

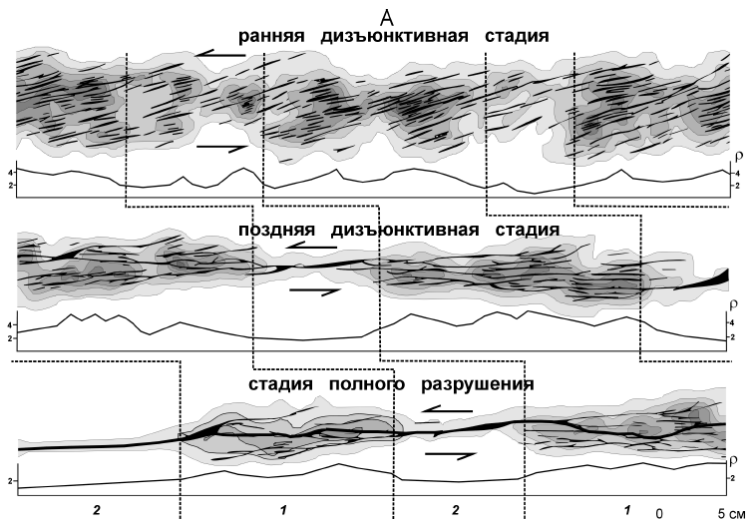


# СТРУКТУРА РАЗЛОМНЫХ ЗОН -ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

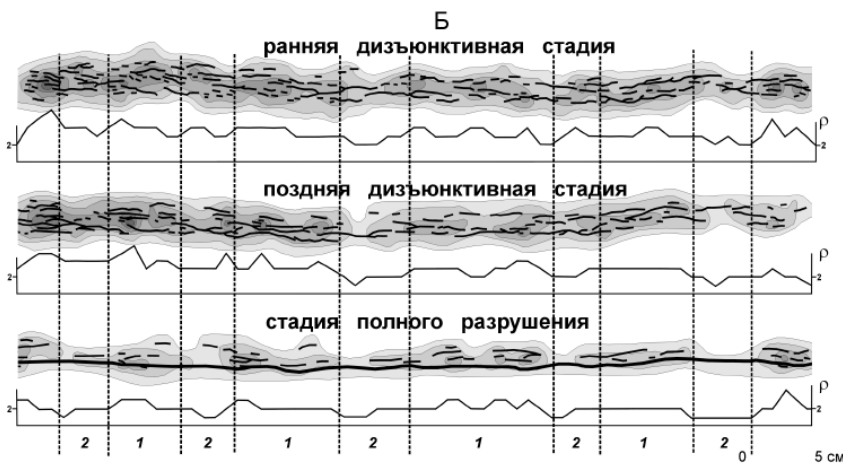
## ЗОНА СДВИГА

## ЗОНА НАДВИГА

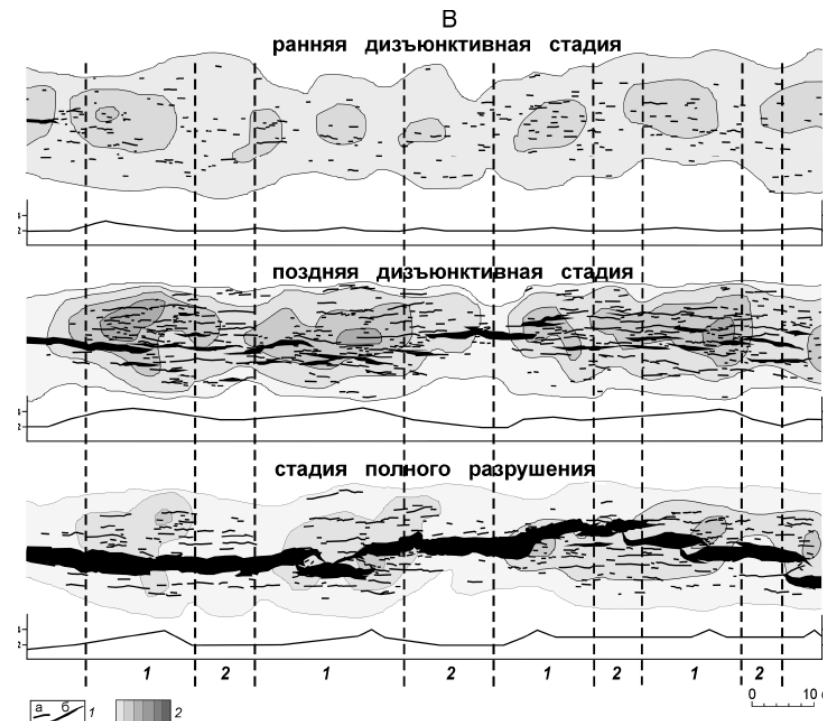
## ЗОНА СБРОСА



Кулисные в плане разрывы



Кулисные в разрезе разрывы



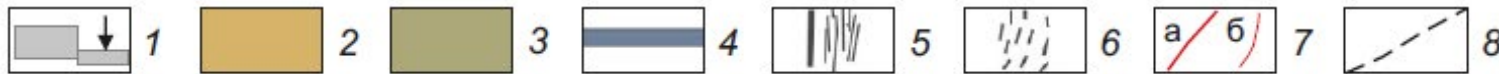
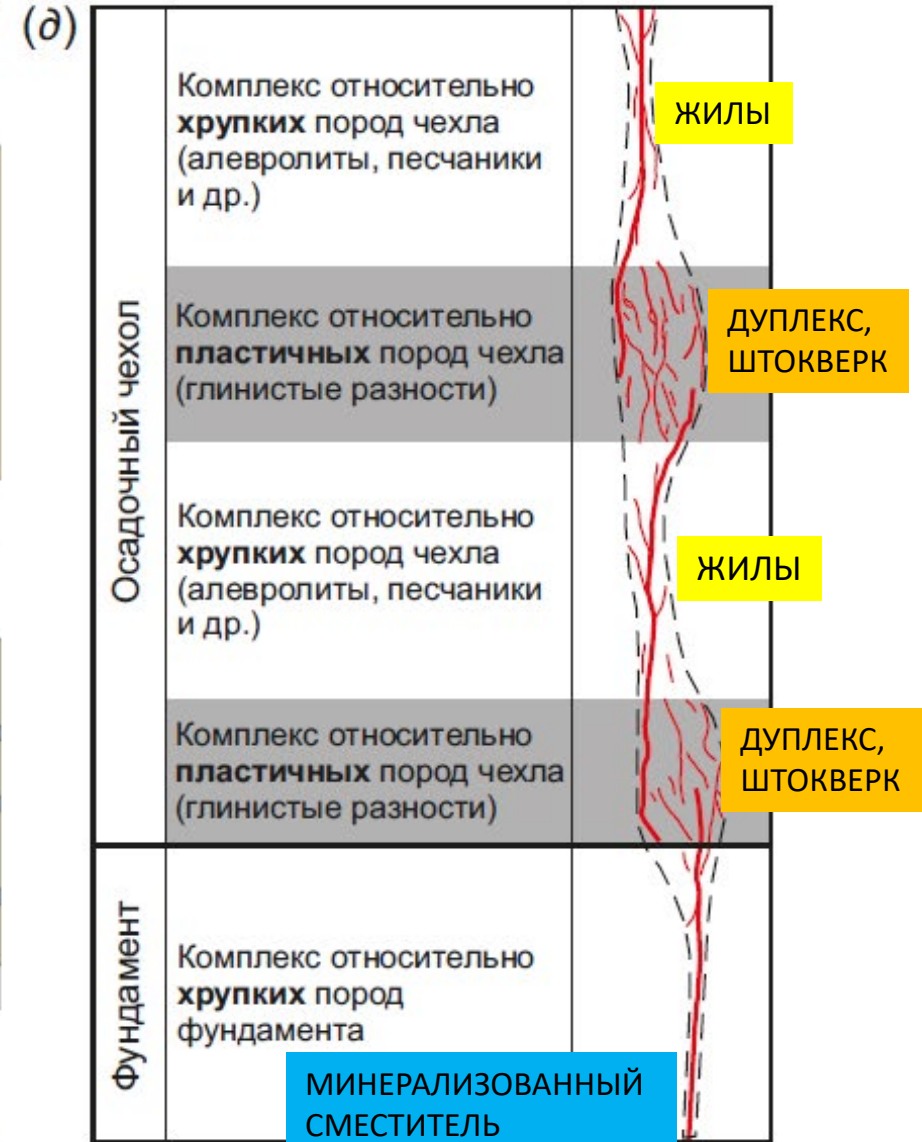
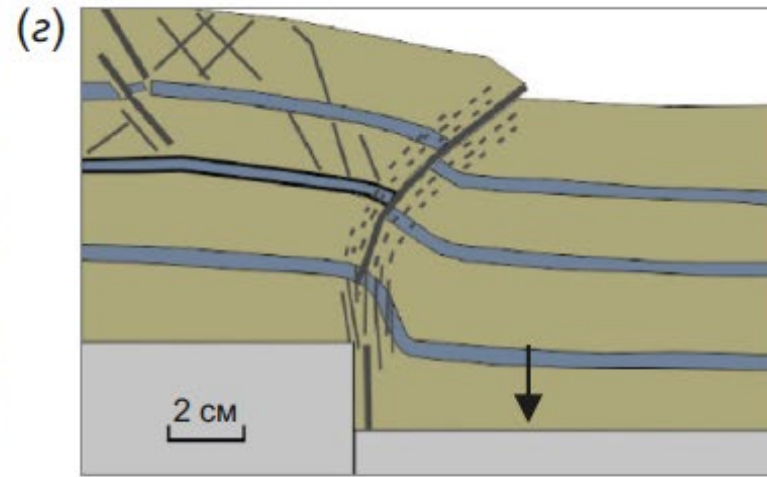
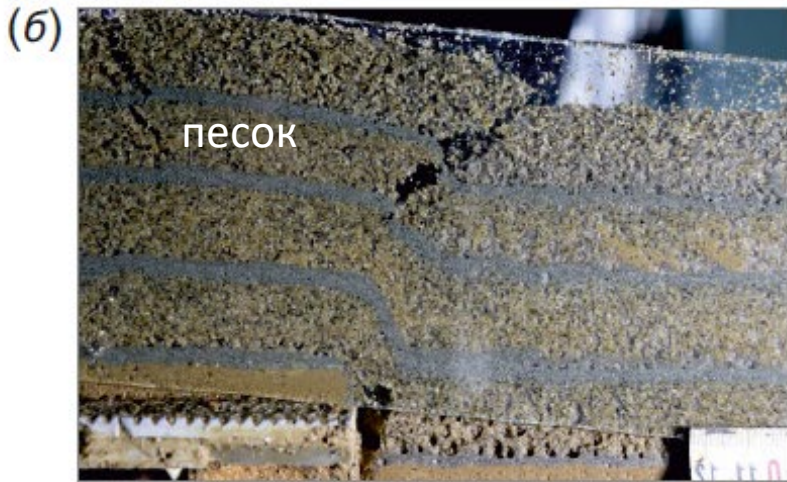
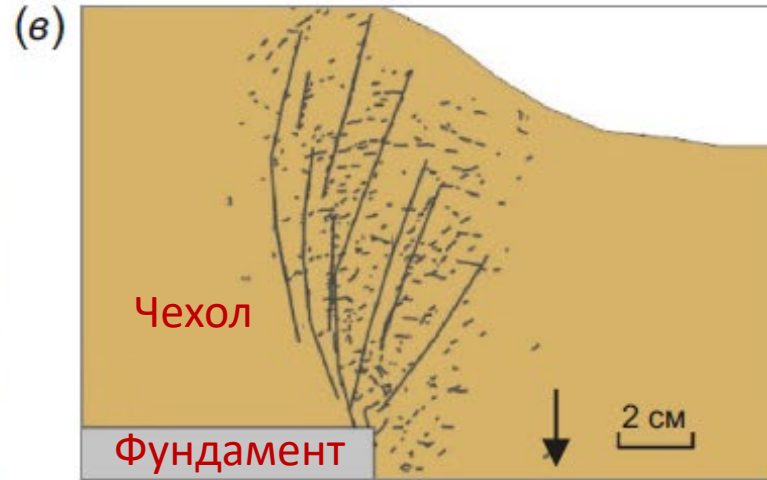
Кулисные в разрезе разрывы



- 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.

Структурные парагенезы опережающих и оперяющих трещин, а также направление структурного шага для разрывов разной кинематики различаются – **ВАЖНО ДЛЯ ПРОГНОЗА!**

# СТРОЕНИЕ ЗОНЫ РАЗЛОМА В СРЕДАХ С РАЗНОЙ РЕОЛОГИЕЙ. ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ



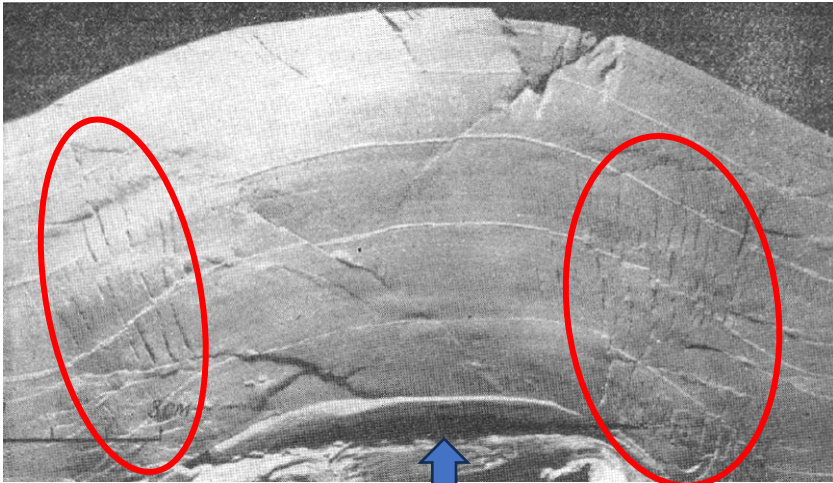
Морфология рудных тел может различаться с глубиной



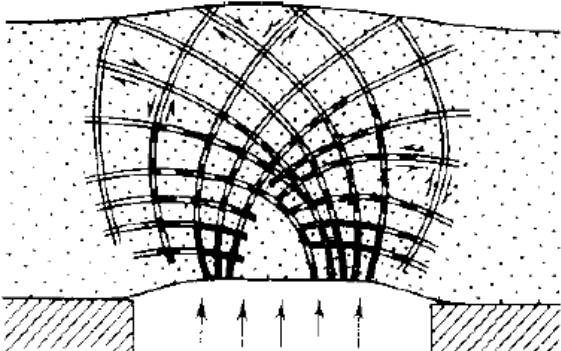
# СТРУКТУРНЫЕ ЛОВУШКИ В ЗОНЕ СБРОСА

Слепые сбросы и взбросы на затухании сбросов в штамповой антиклинали поперечного изгиба

Сбросы, отрывы растяжения в замке антиклинали поперечного изгиба (растут сверху вниз)

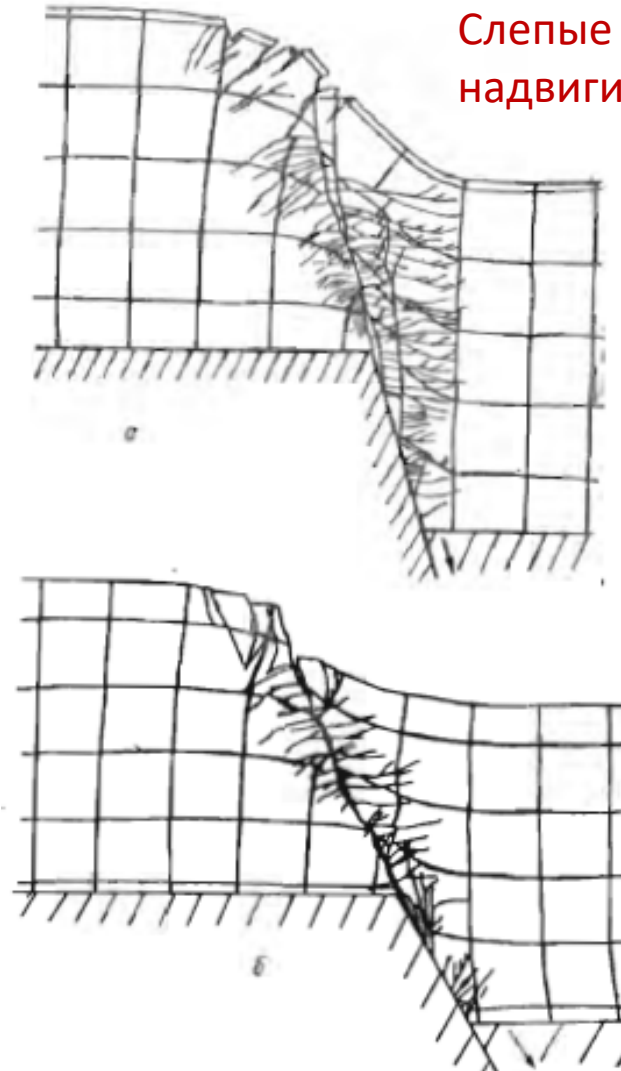


Касательные напряжения



Слепые субвертикальные взбросы и сбросы на затухании разлома в фундаменте (растут снизу вверх), Сопряженные с ними пологие сбросы и надвиги

(Гзовский, 1975)



Слепые пологие сбросы и надвиги в зоне сброса

пологие разрывы в сбросовой зоне могут быть ОШИБОЧНО проинтерпретированы как надвиговая зона

Важно откартировать область их распространения и установить связь с материнским сбросом

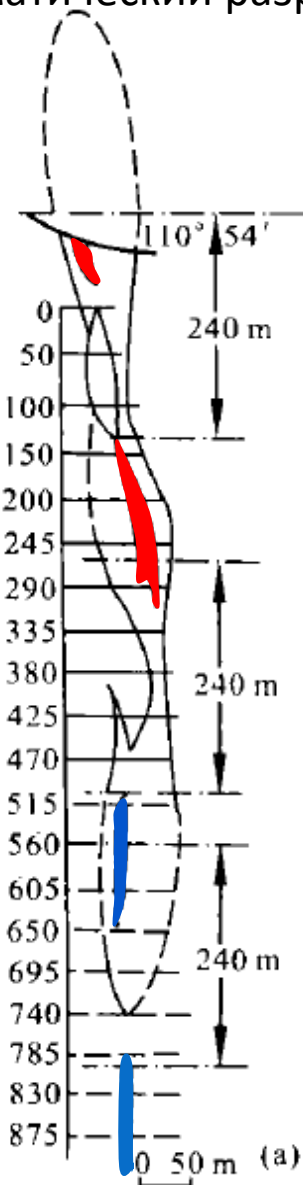
(Экспериментальная тектоника и полевая тектонофизика, 1991)

# СТРУКТУРНЫЕ ЛОВУШКИ В ЗОНЕ РАЗДВИГА И СБРОСА

## Аи - месторождение в Китае

Схематический разрез

Первичный  
Hg ореол



Аи жилы отрыва в  
зоне раздвига

Аи жилы

Аи жилы  
прогноз

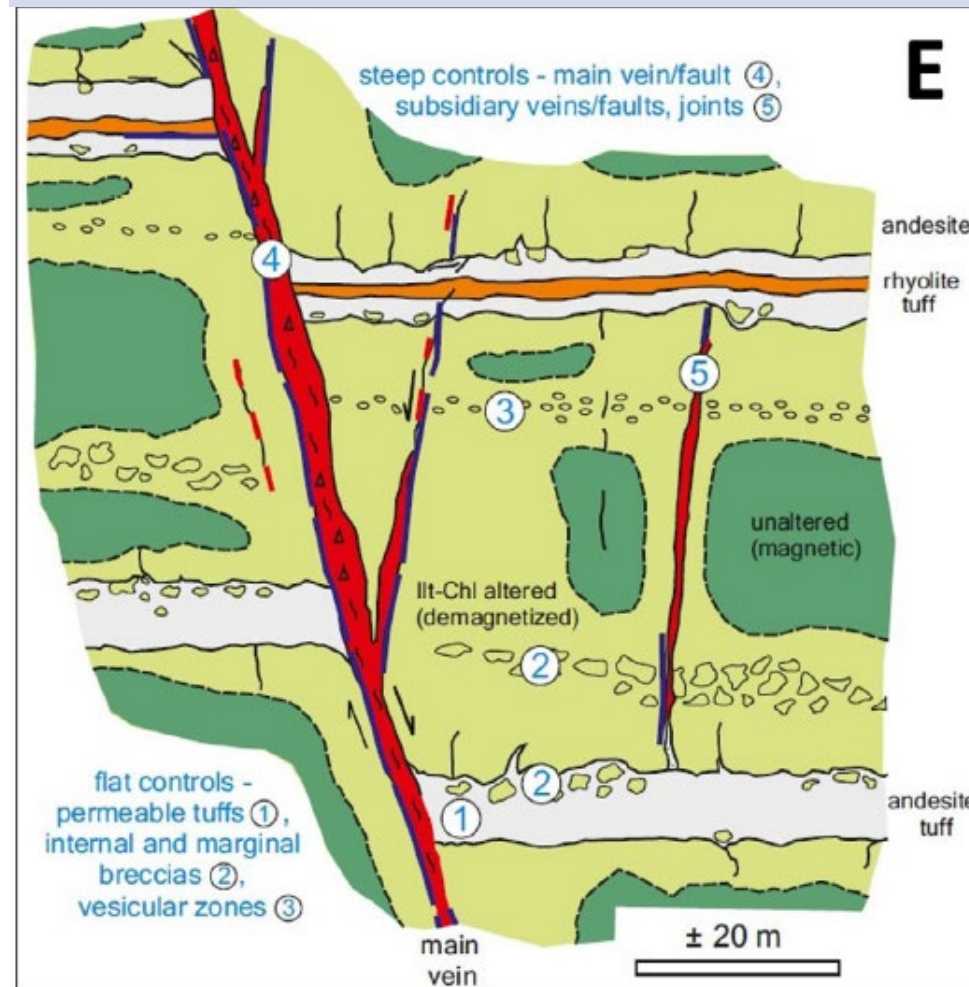
Прогноз слепых  
вертикальных  
золоторудных жил  
по структурному  
шагу 240 м  
в первичном ореоле  
ртути

Zhang, 2001

## Аи-Аг месторождение Купол (Чукотка)

Схематический разрез

Слепые Аи-жилы по сбросам, оперяющие  
Главную жилу

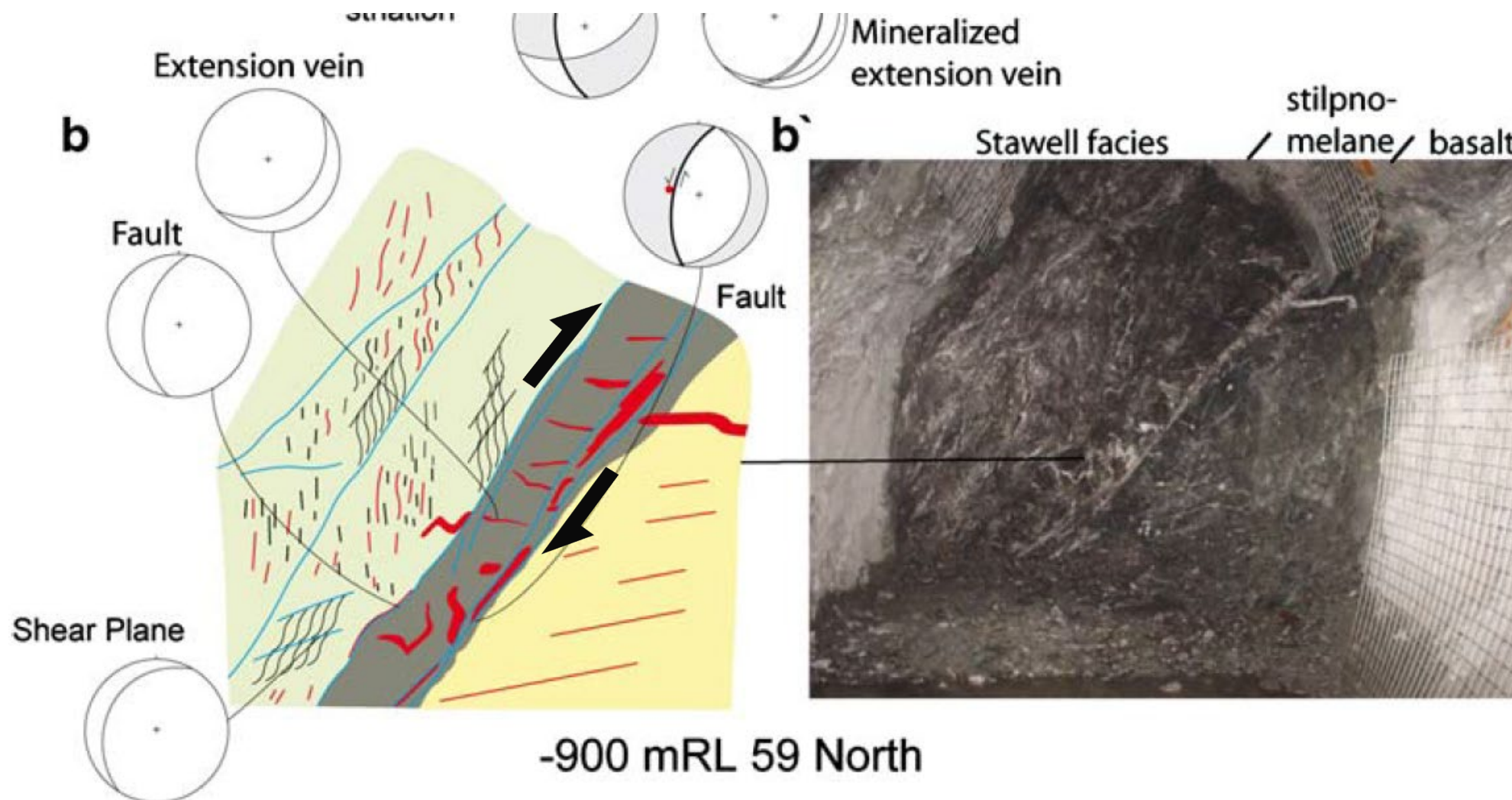


(Thomson et al, 2023)

# СТРУКТУРНЫЕ ЛОВУШКИ В ЗОНЕ НАДВИГА

## Stawell Gold deposit (S-E Australia)

Лестничные пологие жилы растяжения, оперяющие надвиг, и жилы вдоль шва разлома

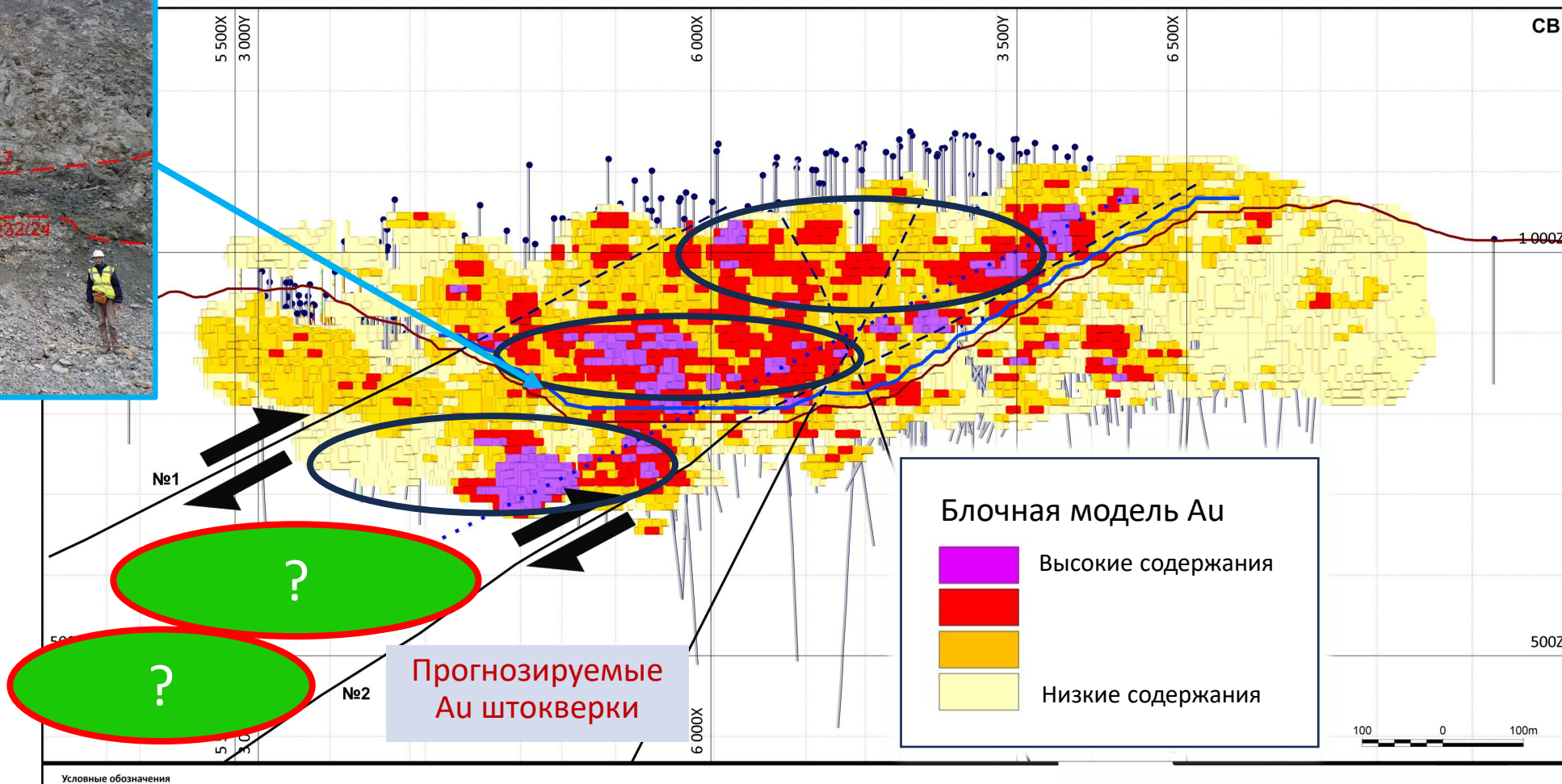
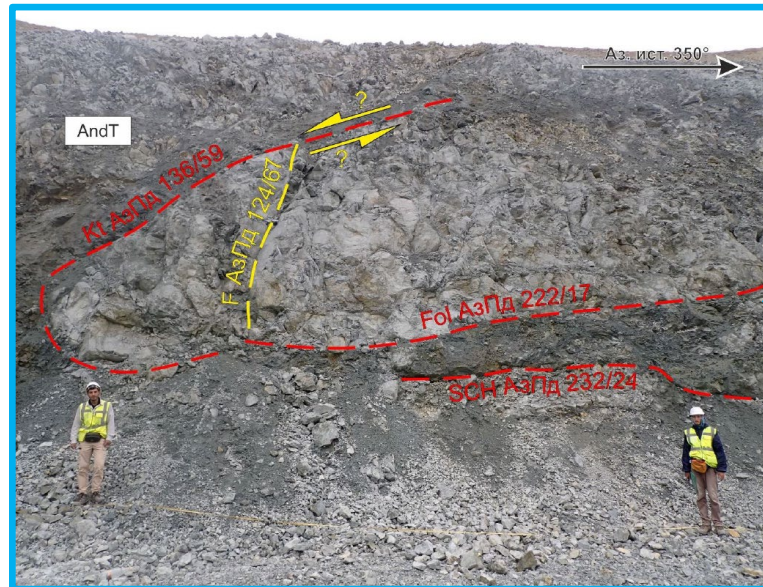




# СТРУКТУРНЫЕ ЛОВУШКИ В ЗОНЕ НАДВИГА

Си-Аи месторождение Маднеули, Грузия

Золотоносные кварц-сульфидные пологие штокверки в зоне надвига



Фрагмент строения зоны надвига  
В ЮЗ стенке карьера, гор.830.  
Тектонические линзы кварцевых  
метасоматитов по туфам андезитов,  
разделенные зонами катаклаза и  
милонитизации. Милониты содержат  
скопления недеформированного  
пирита

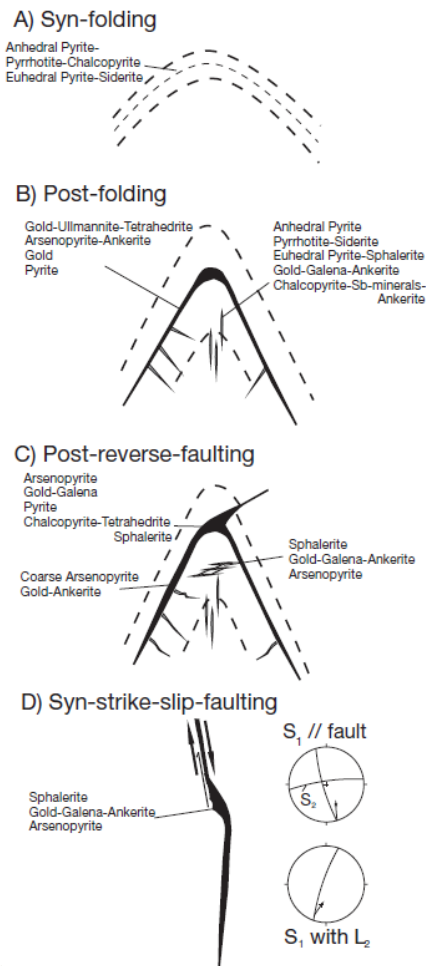
Прогнозируемые  
Аи штокверки



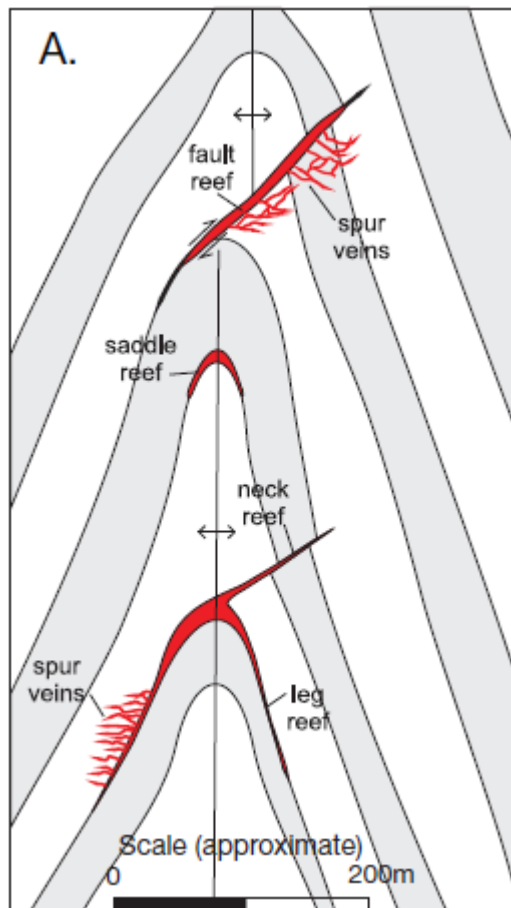
# АРКООБРАЗНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ЛОВУШКИ

Тип Бендиго. Седловидные послойные жилы отслаивания и секущие жилы в замке антиклинали

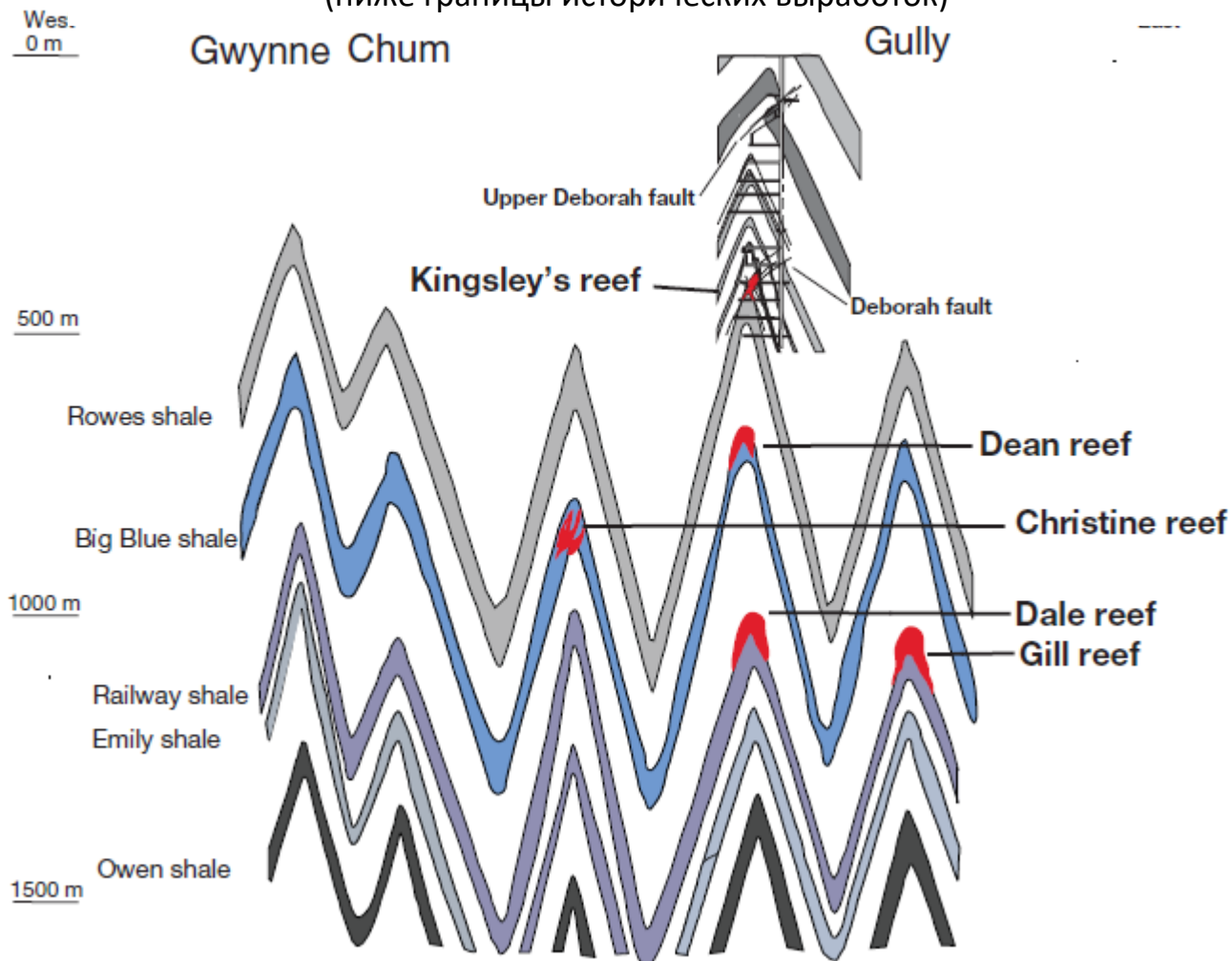
**Модель образования разновозрастных Au жил месторождения Бендиго**



**Разнотипные секущие жилы образовались при реактивации послойных жил и продольных разломов**



**Схематический разрез Au месторождения Бендиго, Австралия (ниже границы исторических выработок)**

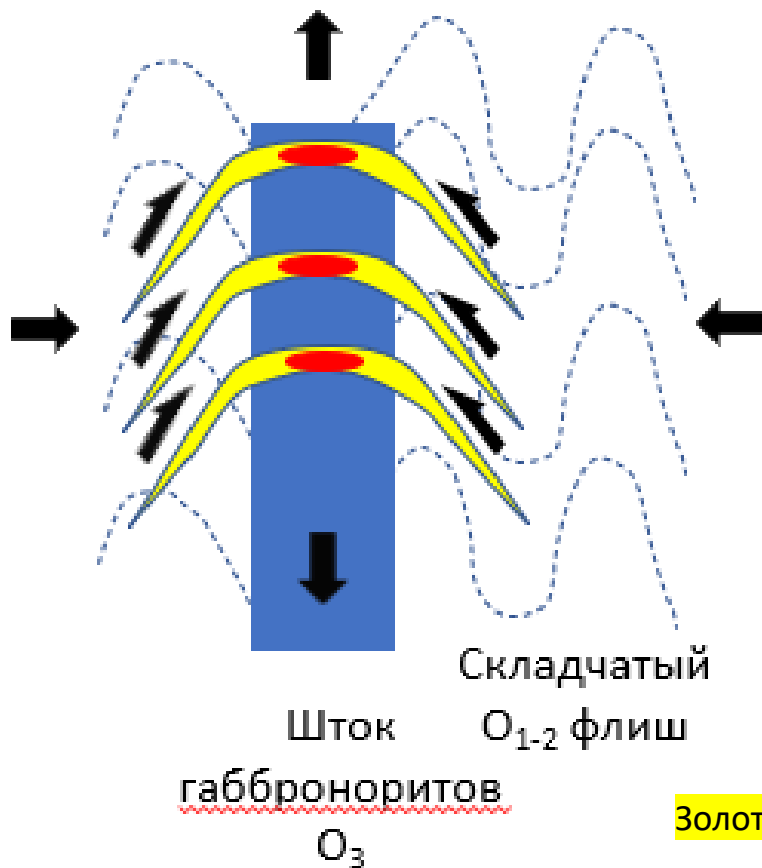


Christopher et al, 2013

## Аркообразные жильные системы

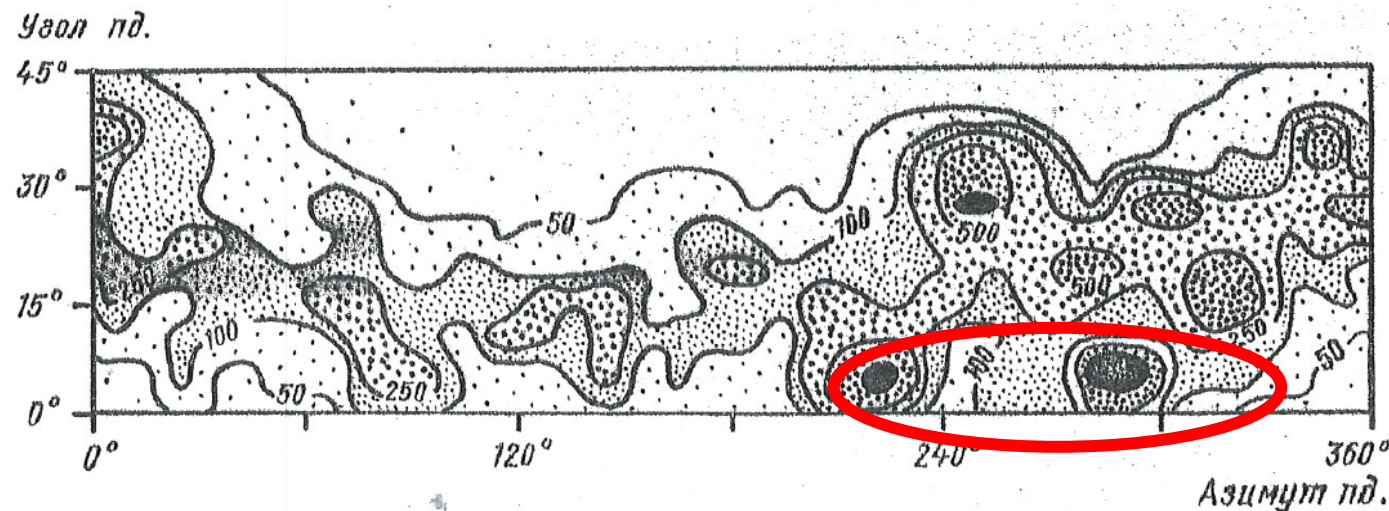
Аи месторождение Бестюбе. Северный Казахстан

Структурная модель  
жильной системы  
участка Центральный



Аркообразные надвиговые жилы – структуры одноосного вертикального растяжения при усадке остывшего штока габброноритов в условиях горизонтального сжатия в зоне сдвига

Зависимость содержания золота (г/т) от ориентировки кварцевых жил



Субгоризонтальные жилы по трещинам отрыва наиболее богаты золотом (500->1000 г/т)

Наклонные жилы в пологих надвигах (15-45°) менее богаты золотом (10-500 г/т)

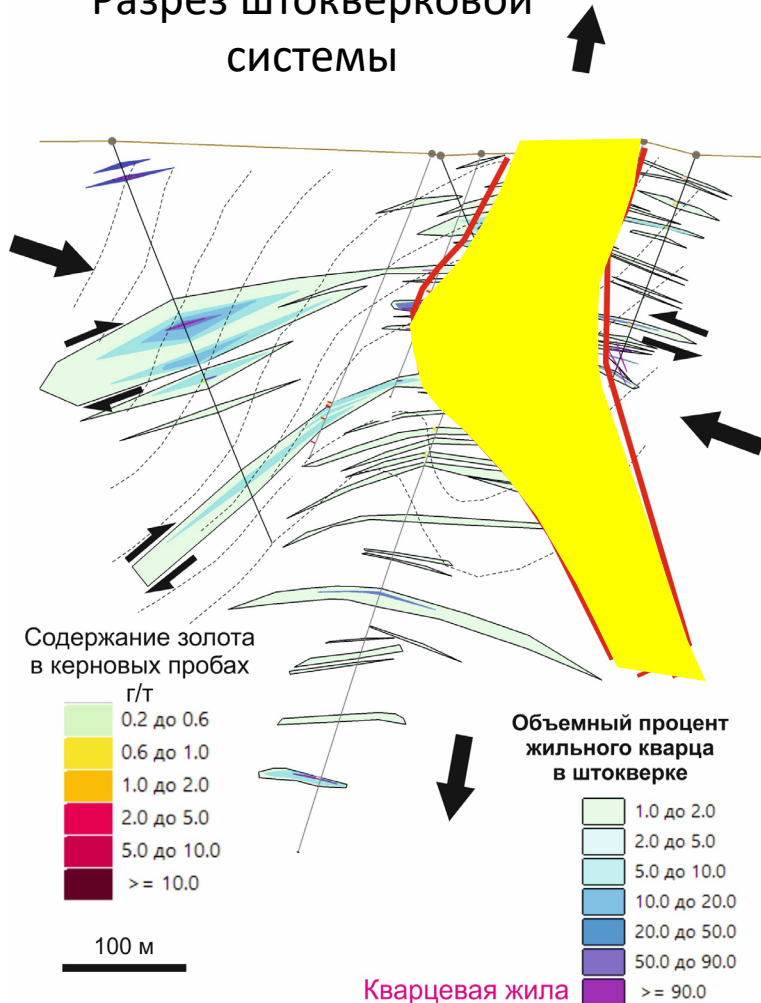
Наклонные жилы в крутых надвигах бедные (10-<1 г/т)

Золотоносные жилы пересечены поисковыми скважинами на глубине 1200 м – прогноз на большую глубину

## Аркообразные надвиговые штокверки

Месторождение Дражное. Якутия

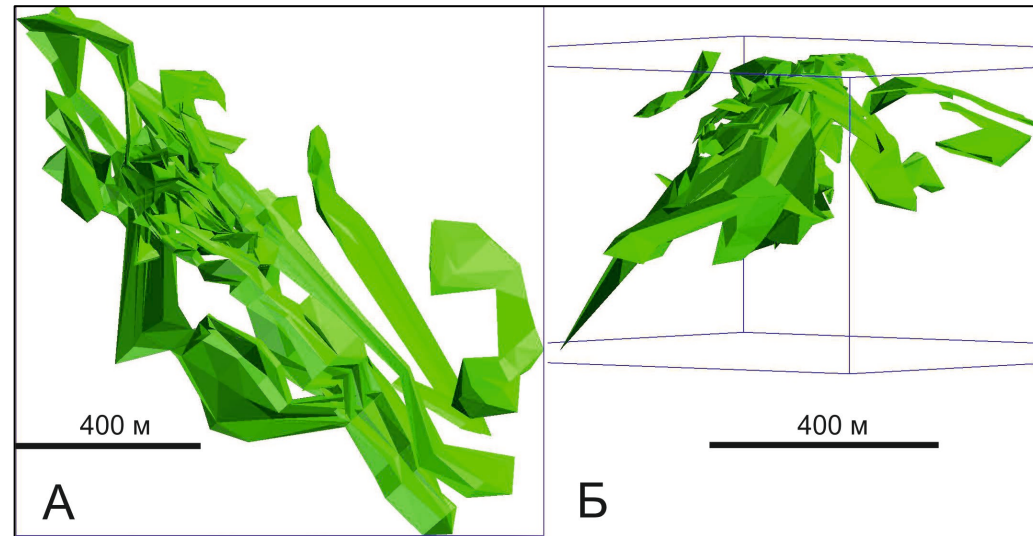
Разрез штокверковой системы



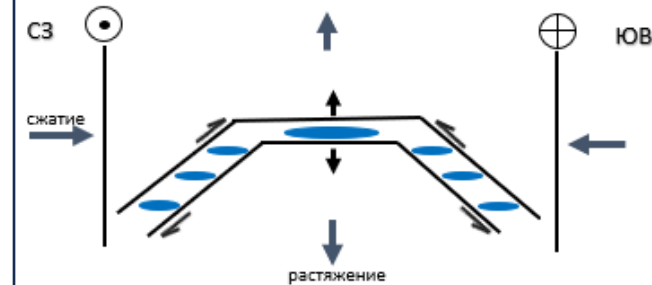
3D-модель штокверковой системы

Вид сверху

Вид вдоль простирания



Структурная модель аркообразных надвиговых штокверков



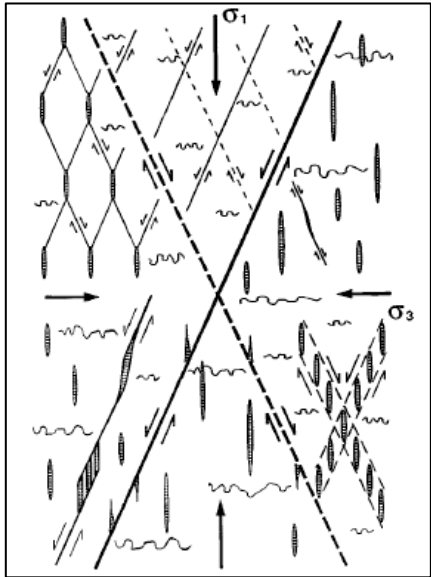
Аркообразные надвиговые штокверки – структуры вертикального растяжения и горизонтального сжатия в сдвиговых структурах бокового выжимания Push-Up

На глубине прогнозируются нижние этажи оруденения. Золотоносные штокверки пересечены скважинами на глубине более 500 м

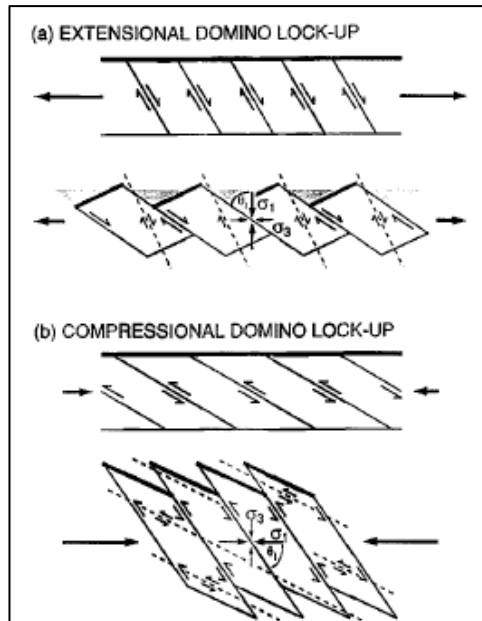


# КУЛИСНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ЛОВУШКИ

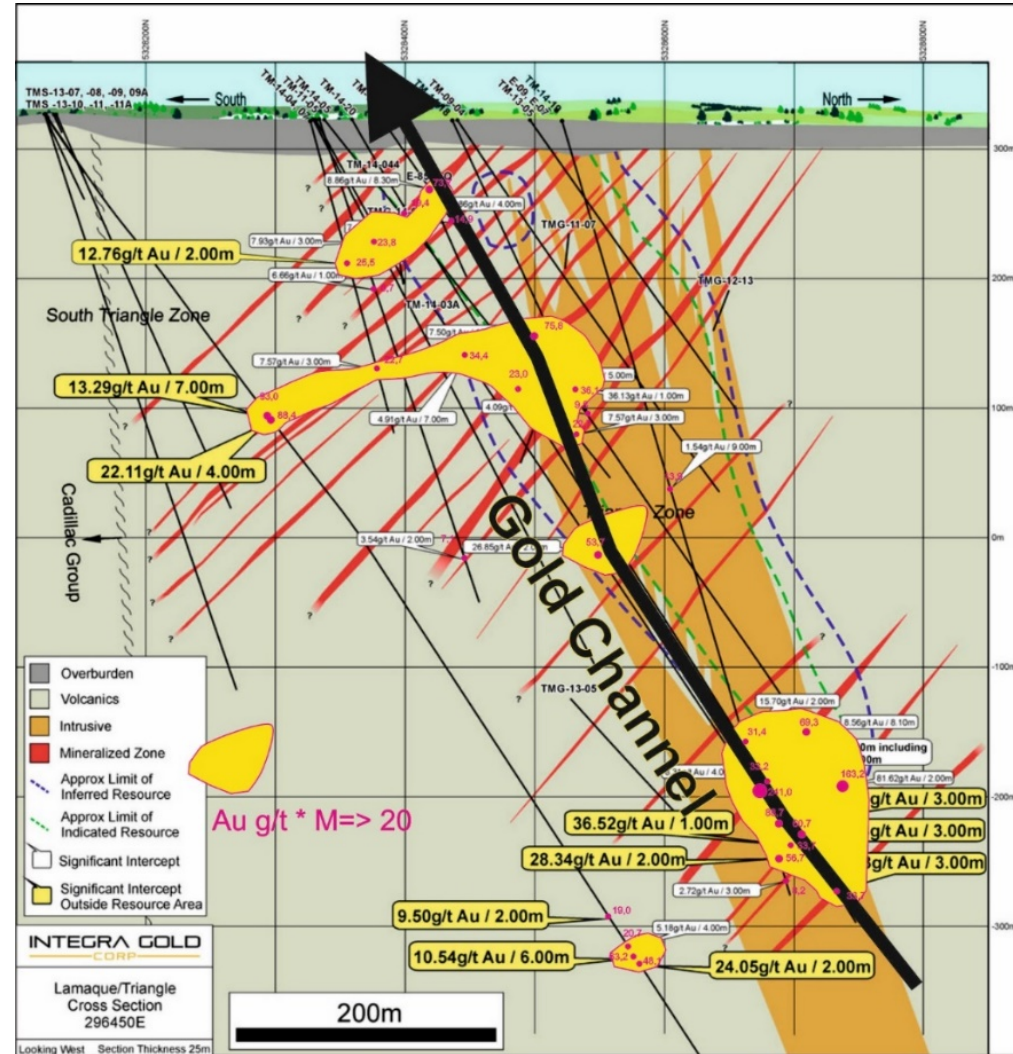
Кулисные ряды жил по трещинам отрыва



Структуры «домино»



Месторождение Sigma-Lamaque (Canada)  
Лестничные Au- жилы по сколам в дайке



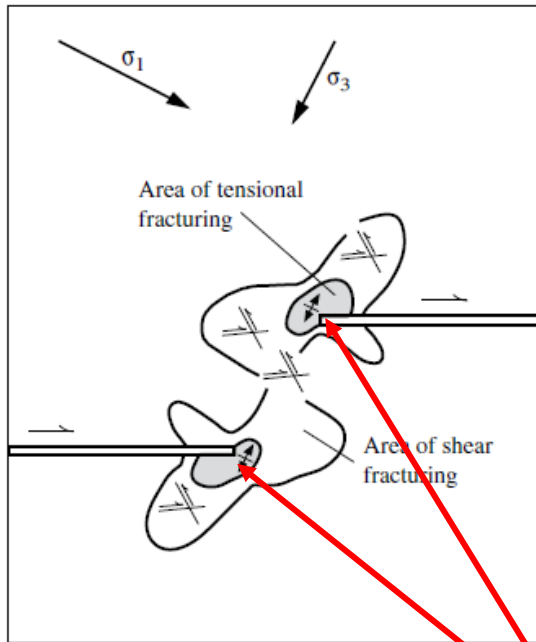
**Распределение золота в жилах неравномерное:**

Высокие содержания золота располагаются вдоль линии «Золотого Канала», который маркирует путь золотоносного флюида, из которого золото откладывалось в кварцевых жилах.

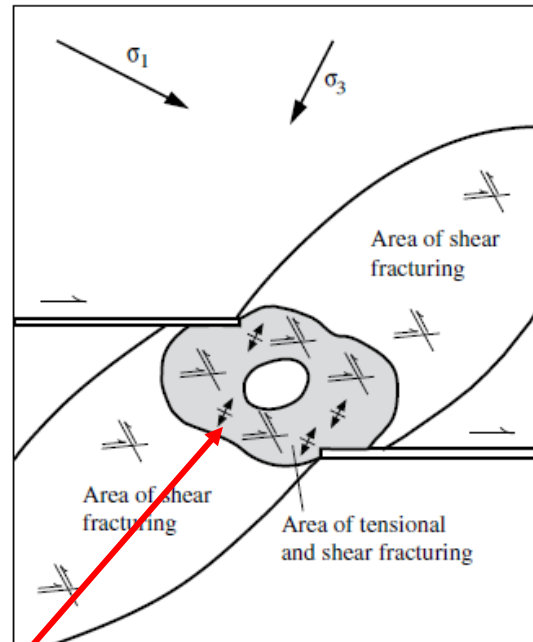
# СТРУКТУРНЫЕ ЛОВУШКИ В СДВИГОВОЙ ЗОНЕ

Области концентрации трещин отрыва и скалывания между окончаниями двух взаимодействующих кулисных сдвигов

Дуплекс сжатия

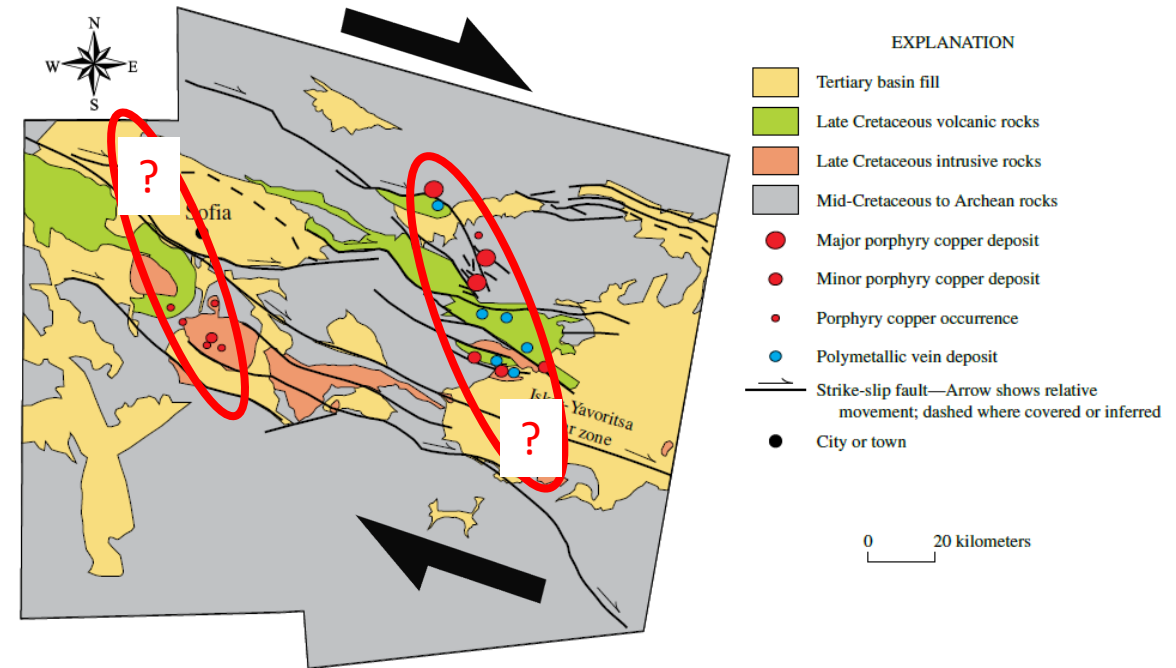


Дуплекс растяжения



Потенциальные рудные штокверки

Си-порфировые и Pb-Zn месторождения и проявления на геологической схеме Среднегорья, Болгария



Структурные тренды минерализации (зоны локального растяжения в сдвиговой зоне)

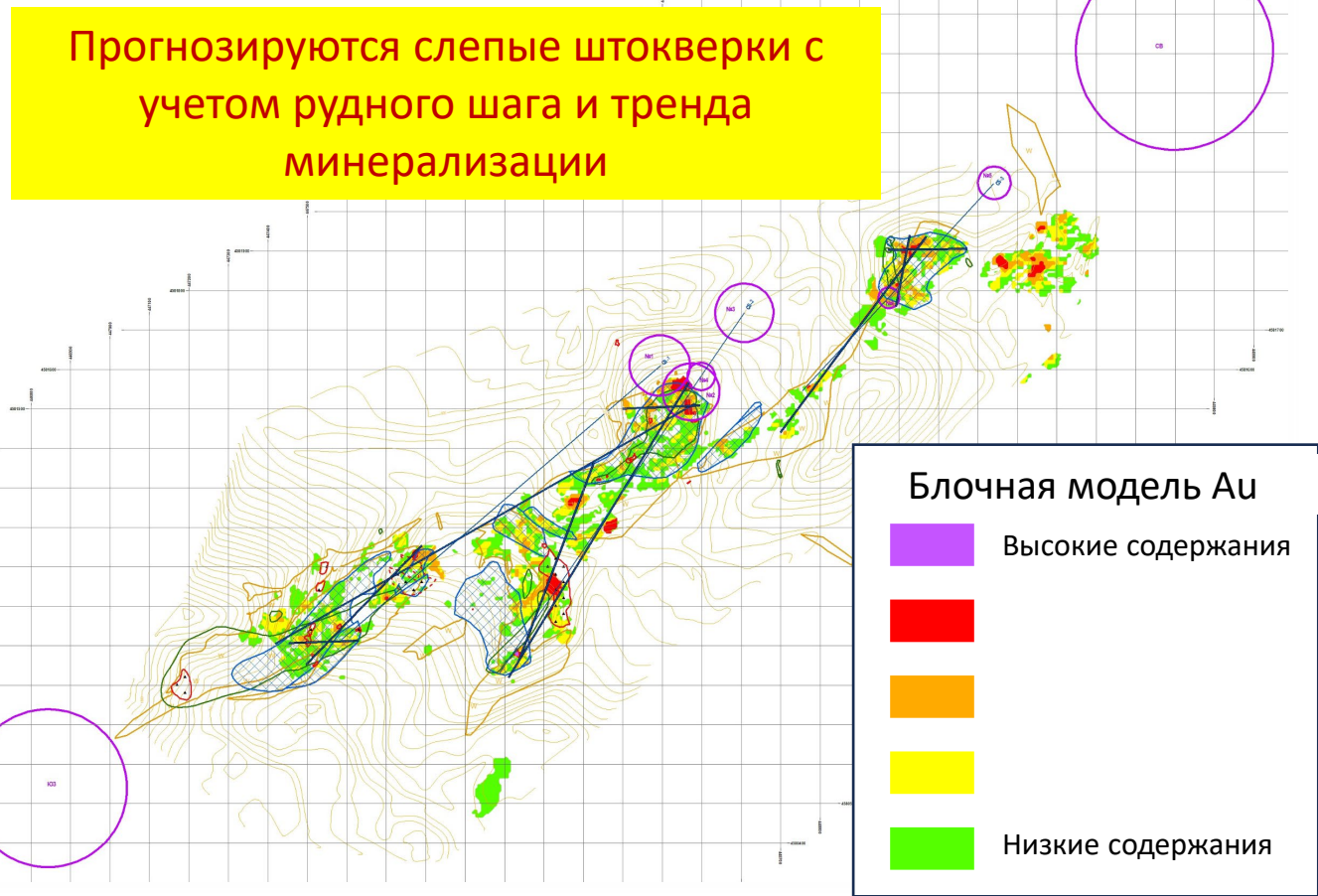
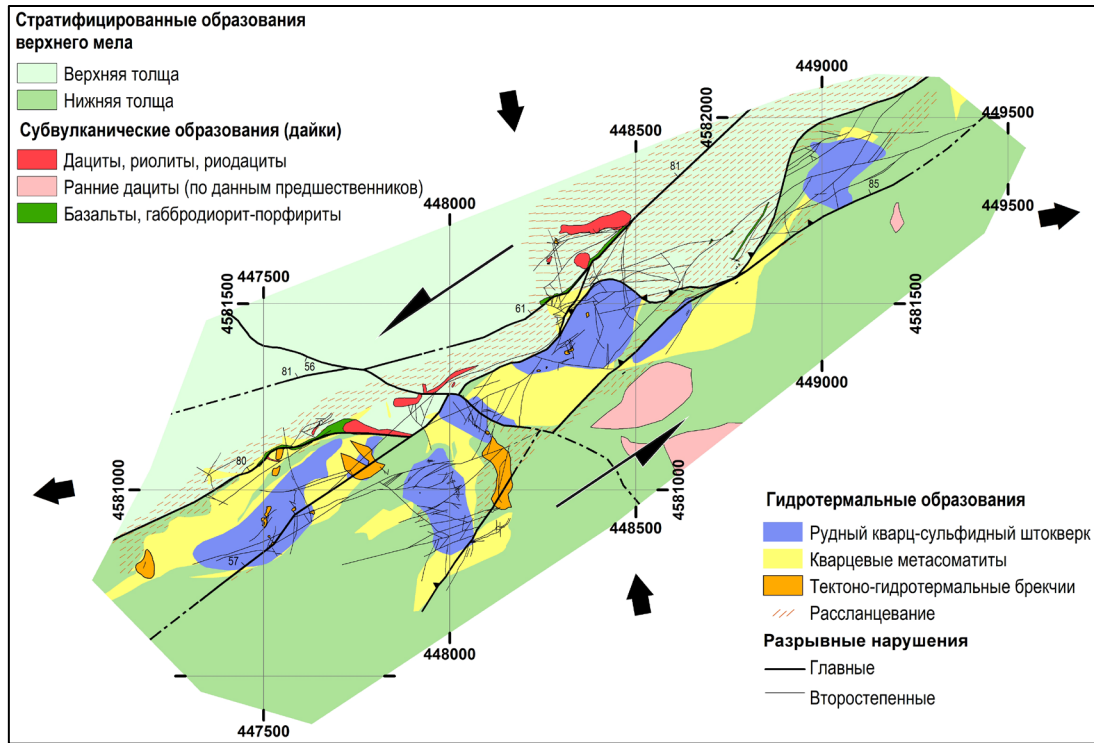
Прогнозируемая минерализация под кайнозойским чехлом

# СТРУКТУРНЫЕ ЛОВУШКИ В СДВИГОВОЙ ЗОНЕ

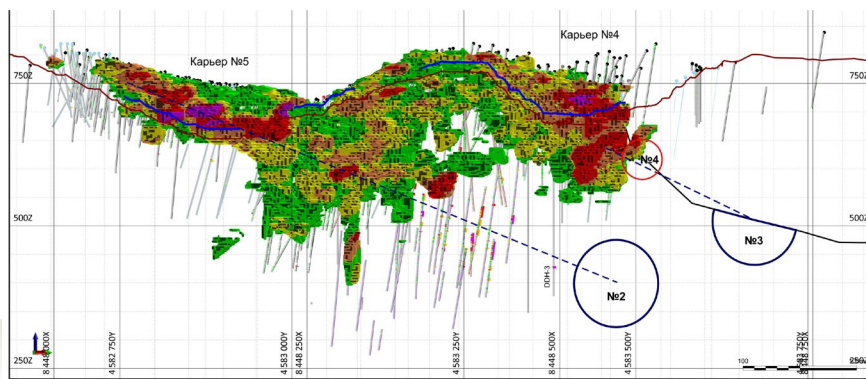
Аu месторождение Сакдриси, Грузия



Схема рудоносных структур в Сакдрисской левосдвиговой зоне



ЮЗ Продольный разрез блочной модели Au СВ



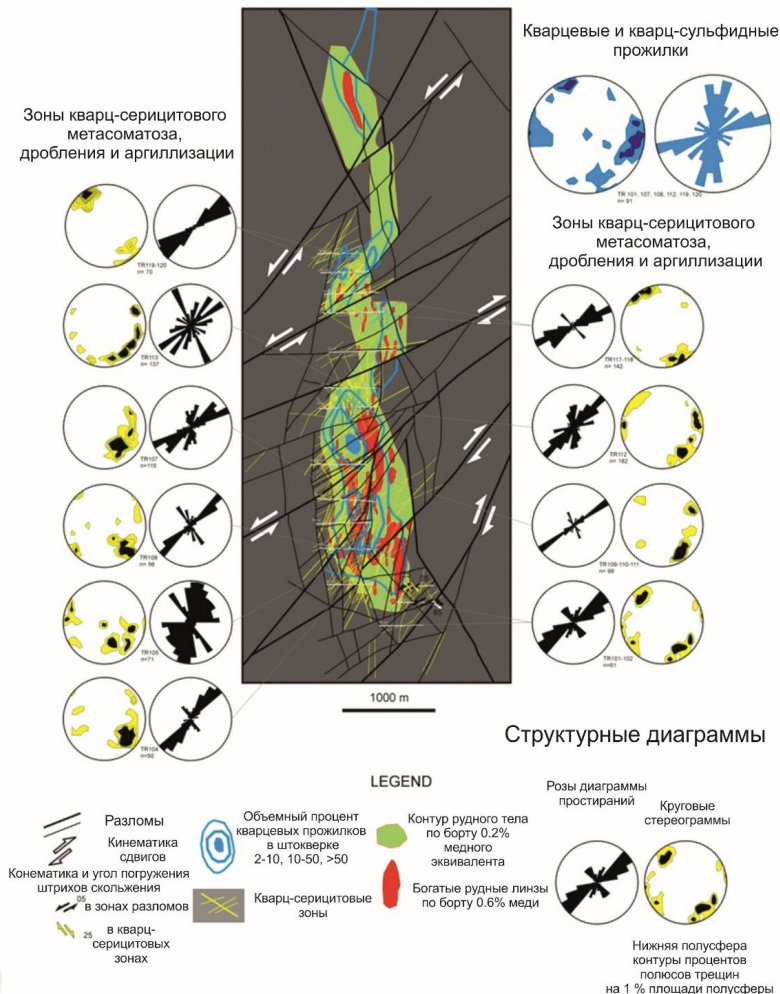
Золотоносные сульфидно-кварцевые штокверки растяжения кулисно располагаются с шагом 500-1000 м вдоль сдвиговой зоны



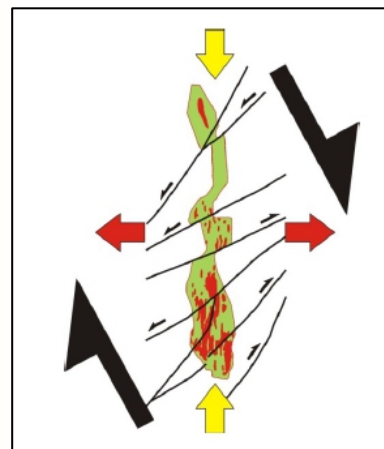
# СТРУКТУРНЫЕ ЛОВУШКИ В СДВИГОВОЙ ЗОНЕ

Линейные штокверки, структура конского хвоста и дуплексы растяжения в сдвиговых зонах

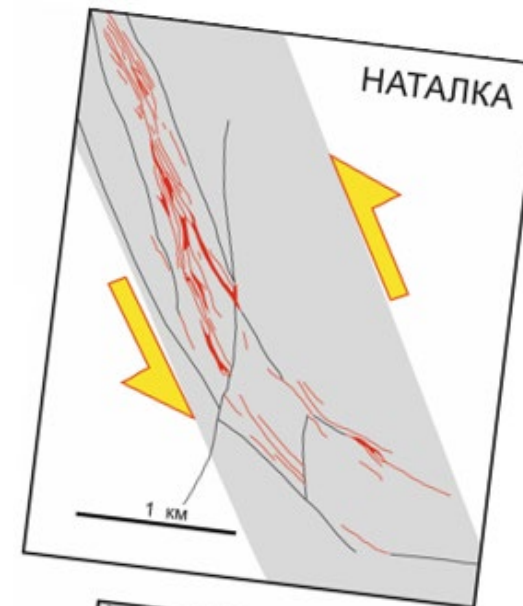
Си-порфировое месторождение Песчанка (Чукотка)  
Структурная схема и стереограммы рудных прожилков



Структурная модель

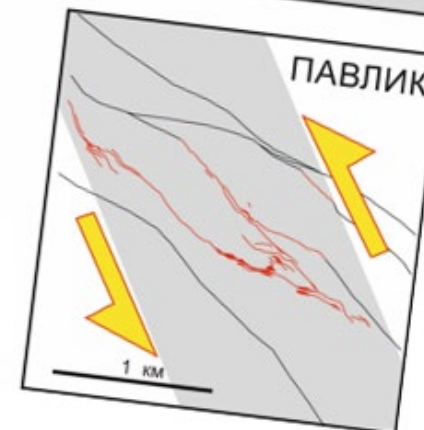
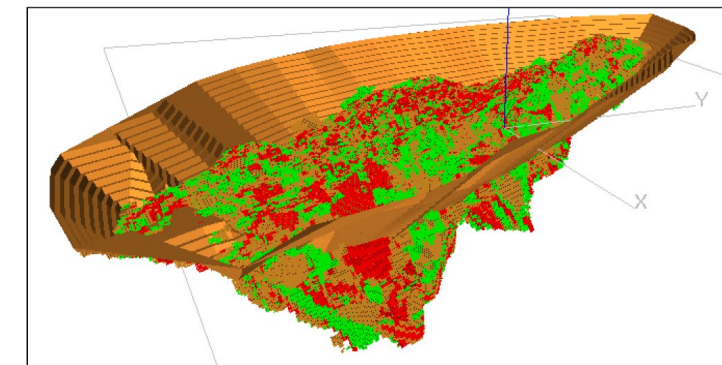


Золоторудные месторождения Наталка и Павлик (Колыма)  
Структурные схемы



НАТАЛКА - структура «конского хвоста» в зоне левого сдвига ССЗ простирания

Блочная модель месторождения Наталка



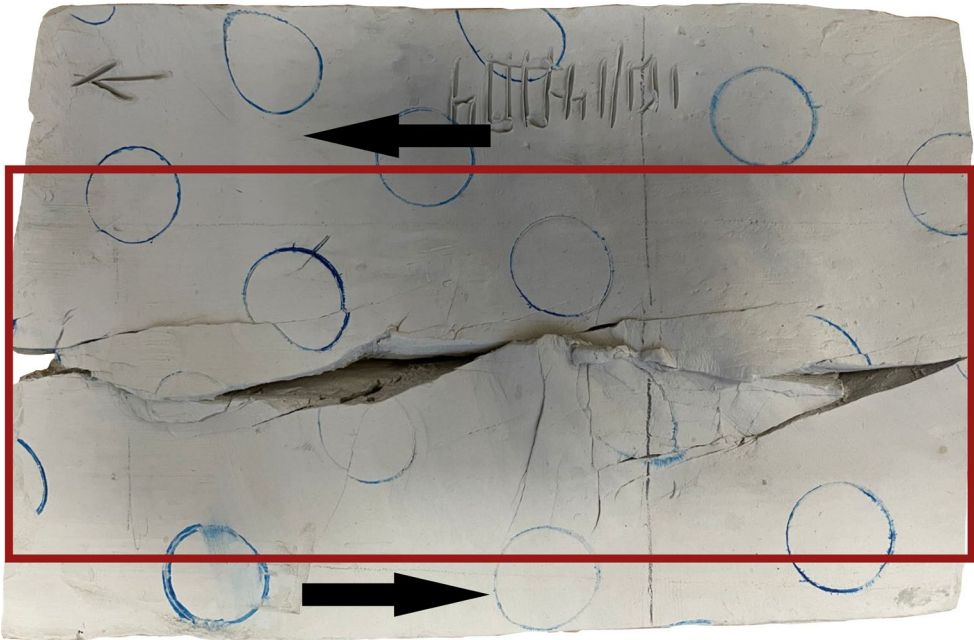
(Гончаров и др. 2002; Читалин, 2001, 2016)

Chitalin et al., 2012

# СТРУКТУРНЫЕ ЛОВУШКИ В СДВИГОВОЙ ЗОНЕ

Модель сдвиговой зоны, вид сверху

20 см

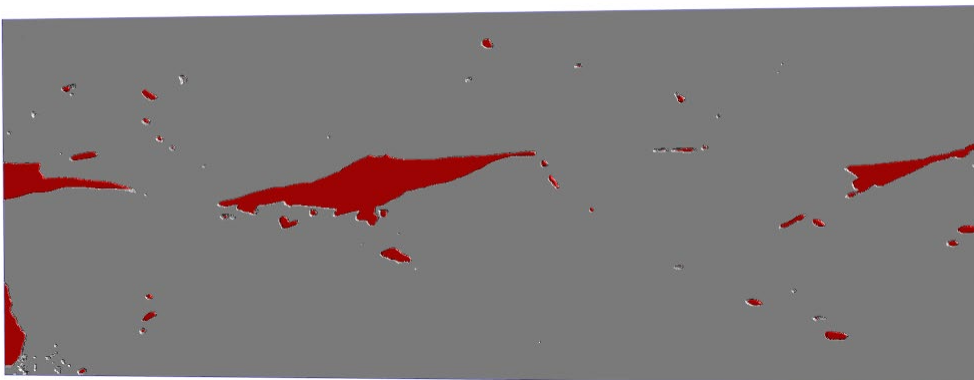
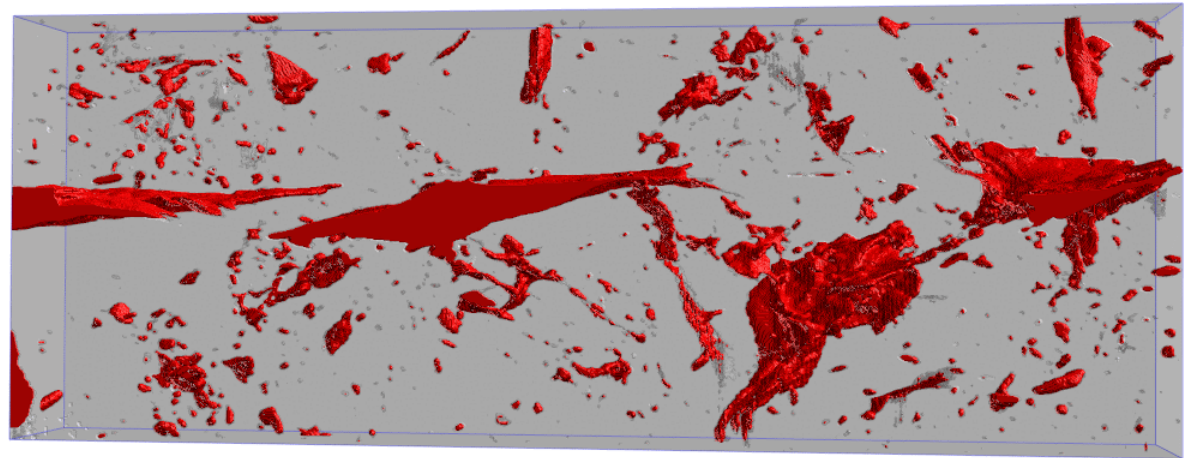


область съёмки

Кулисные (эшелонированные) отрывы и сколы в зоне сдвига

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ АНАЛОГОВОЙ  
ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СДВИГА**  
(ИГТ и Лаборатория тектонофизики и геотектоники  
геологического факультета МГУ)

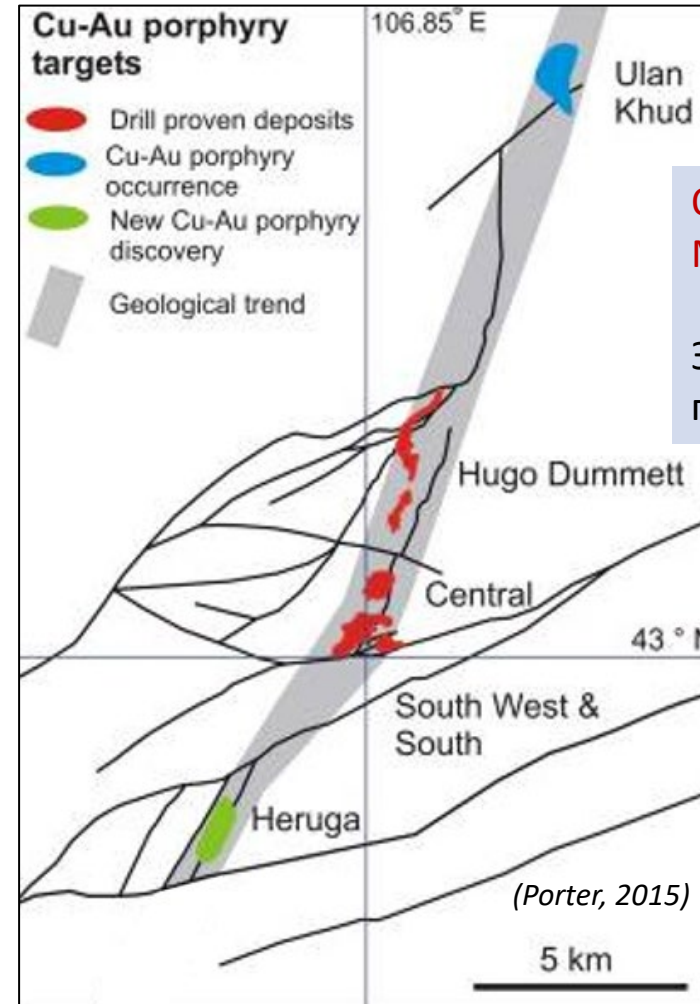
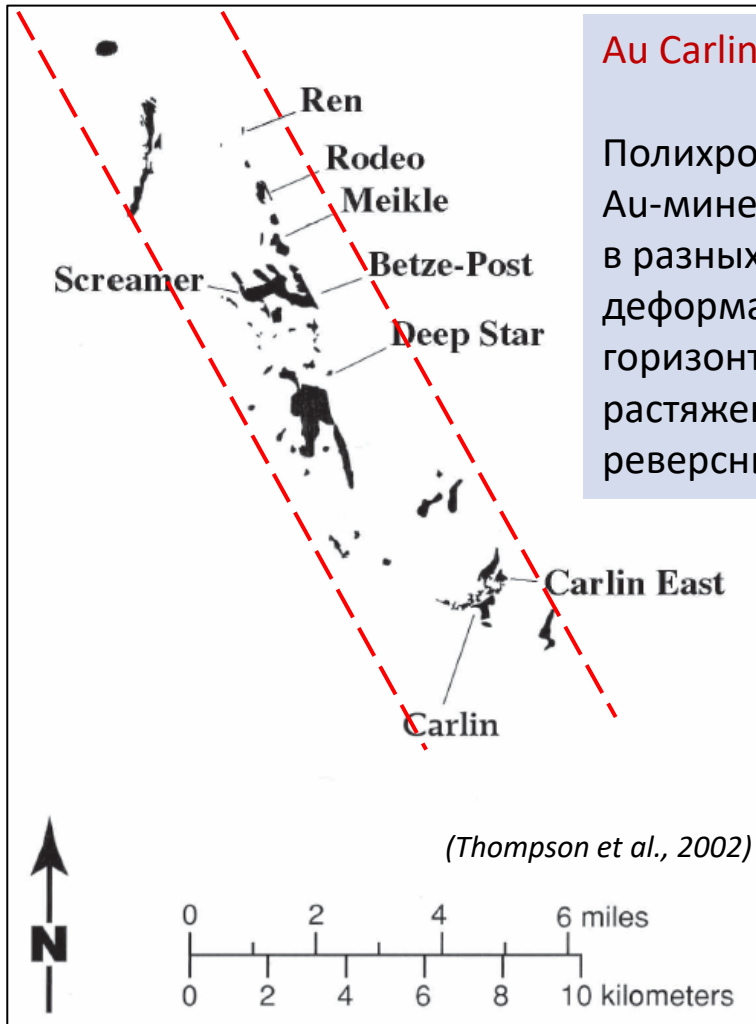
Стереологическая модель образца



# СТРУКТУРНЫЕ ТРЕНДЫ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

## Au Carlin Trend, Nevada

Полихронная (юра, эоцен)  
Au-минерализация  
в разных режимах  
деформации:  
горизонтальное сжатие,  
растяжение,  
реверсные сдвиги



## Oyu Tolgoi Trend, Mongolia

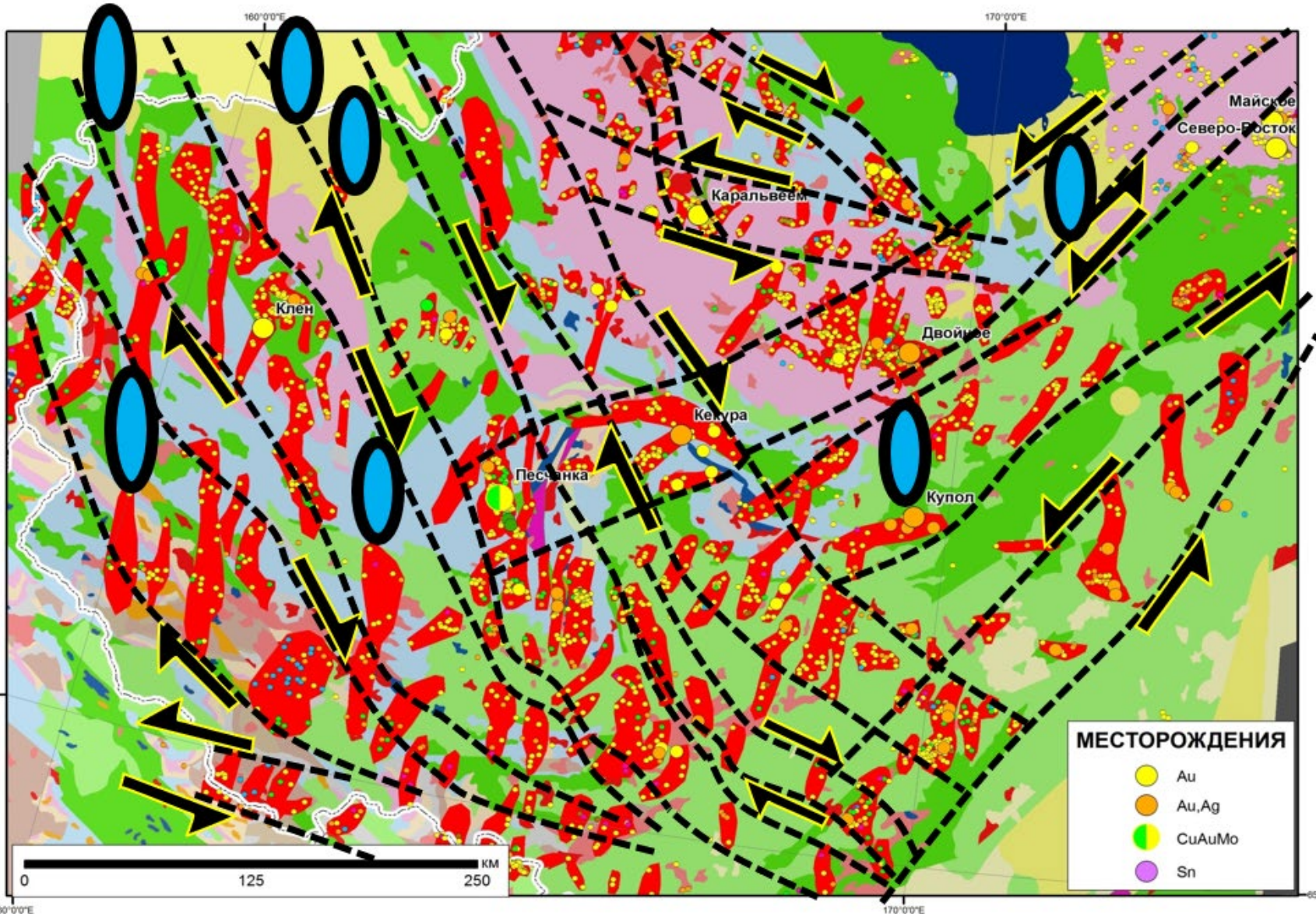
Золотоносные Cu-Mo-порфировые штокверки

Тренды минерализации – линейные скопления месторождений, рудопроявлений и геохимических аномалий

Тренды минерализации – поисковые коридоры, в пределах которых вероятность обнаружения месторождений наиболее высокая, особенно на участках растяжения в узлах пересечения трендов



## ЗАПАДНАЯ ЧУКОТКА



- В региональной структуре преобладают субмеридиональные тренды минерализации - структуры растяжения
- Тренды минерализации образуют кулисные ряды в сопряженных региональных сдвиговых зонах СЗ и СВ простирания

Крупные месторождения находятся в узлах пересечения региональных сопряженных сдвиговых зон



Прогнозируемые рудные кластеры

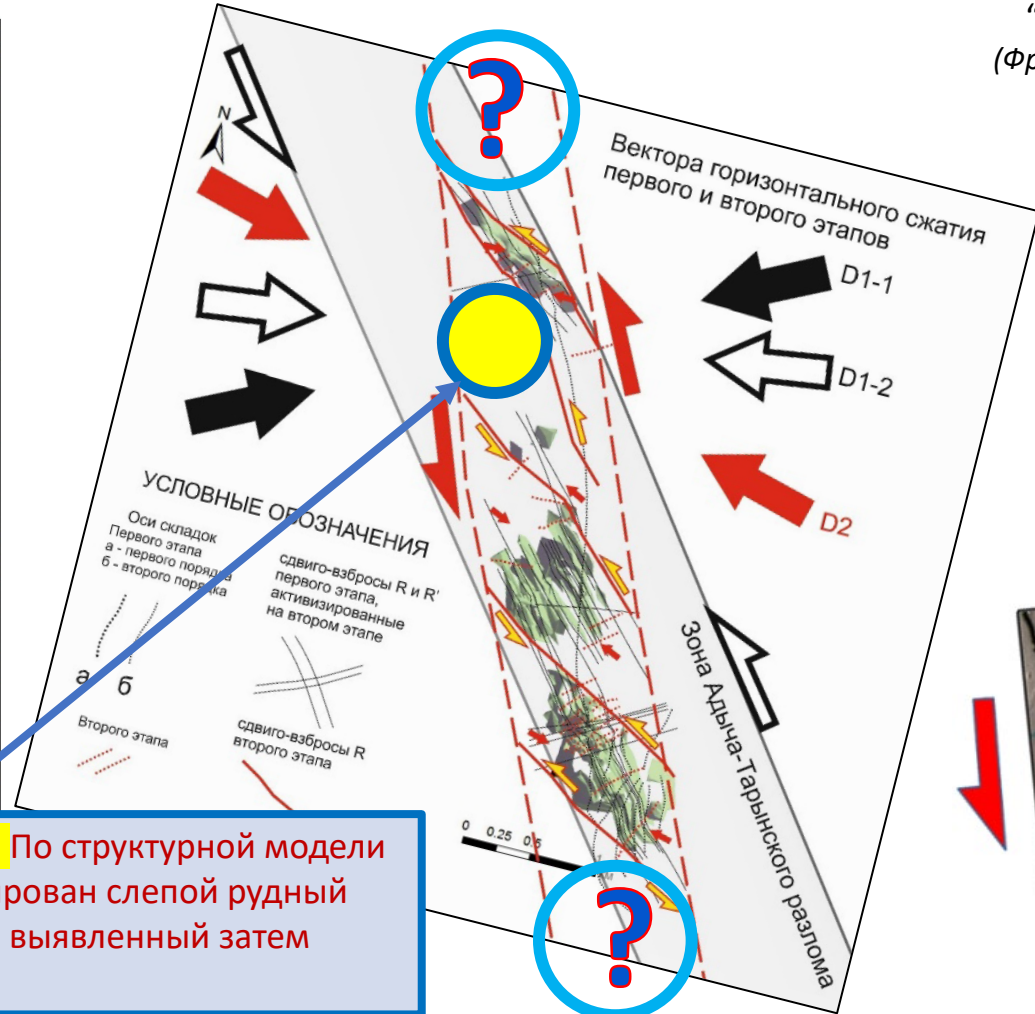


## Рудоконтролирующие субмеридиональные лево-сдвиговые зоны

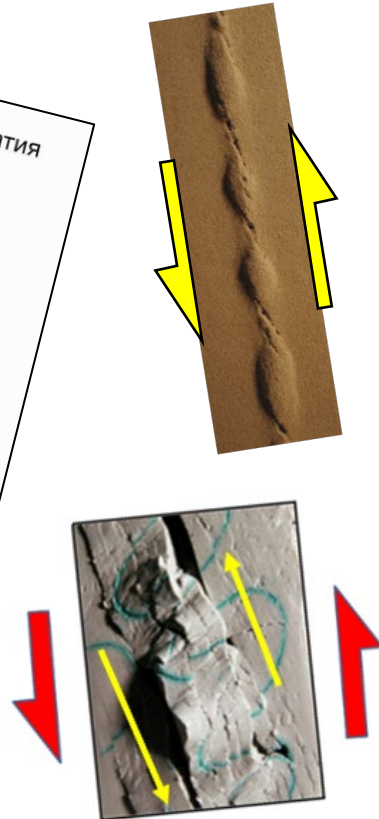
**Тарынский рудный узел**  
Месторождения и проявления золота, тренды минерализации



**Структурная модель месторождения Дражное.**  
Этапы и стадии деформации  
(Читалин и др., 2018)



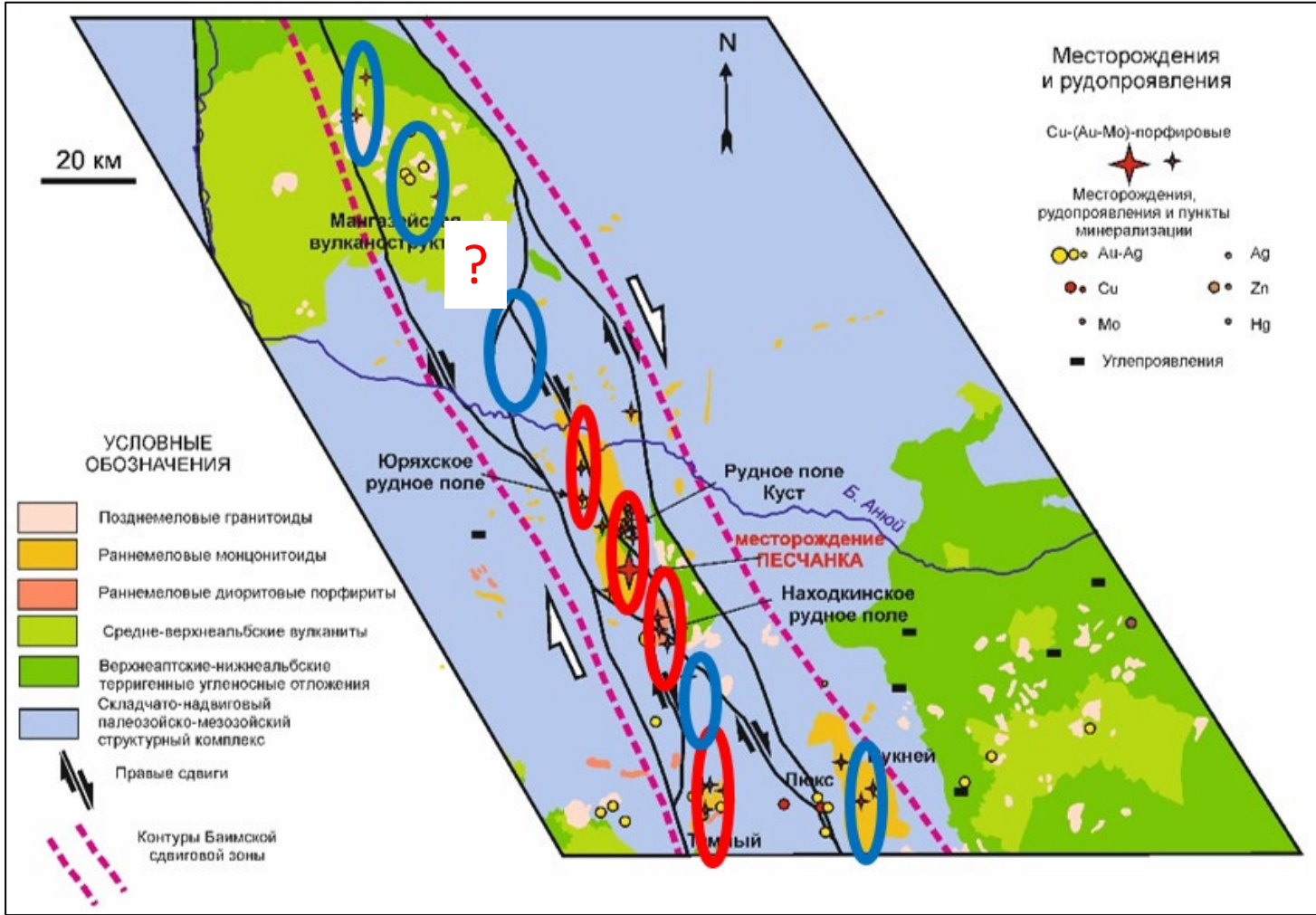
**Тектонофизические модели**  
сдвигово-надвиговых структур бокового выдавливания "push-up" (Фролова, 2016)



**ПРОГНОЗ:** По структурной модели спрогнозирован слепой рудный штокверк, выявленный затем бурением



Баимская сдвиговая зона – медно-порфировые штокверки выявленные и прогнозируемые



Баимская сдвиговая зона была выделена при анализе геологической карты масштаба 1:500 000 (Читалин и др, 2013)

Линейные интрузивные штоки, медно-порфировые и золотосеребряные штокверки контролируются локальными структурами растяжения в правосдвиговой зоне

Прогноз линейных штокверков с учетом структурного шага и поисковых признаков (метасоматиты, минерализация, геохимические и геофизические аномалии)



Выявленные рудные штокверки



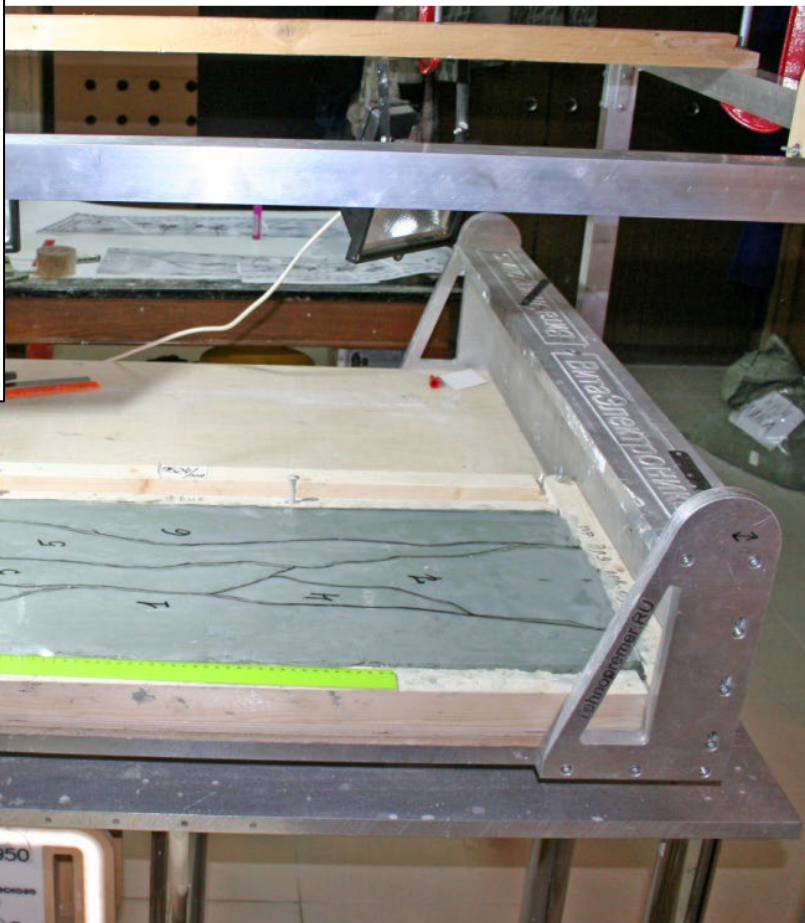
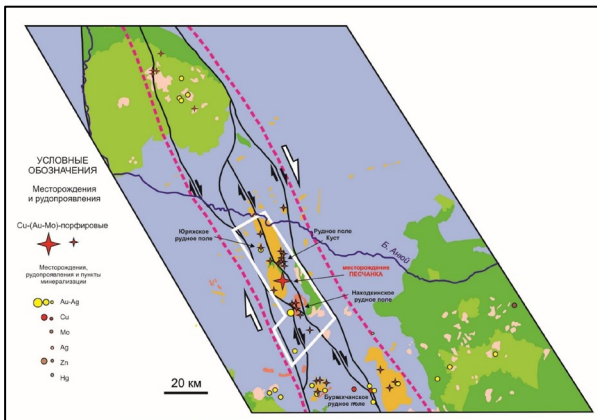
Прогнозируемые рудные штокверки



# РУДОКОНТРОЛИРУЮЩИЕ СДВИГОВЫЕ ЗОНЫ

## ЧУКОТКА

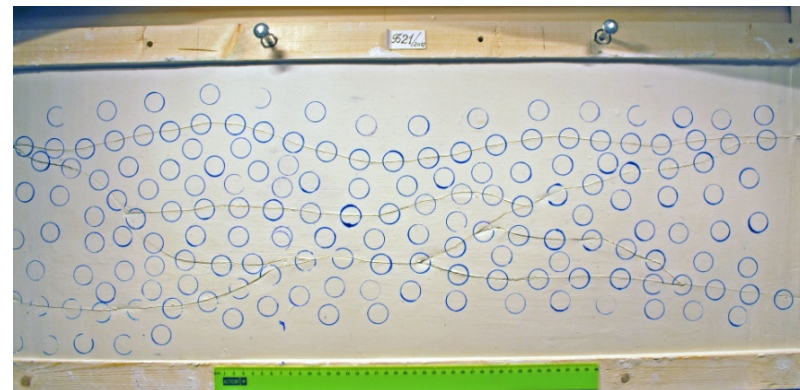
Баимская сдвиговая зона – аналоговое тектонофизическое моделирование



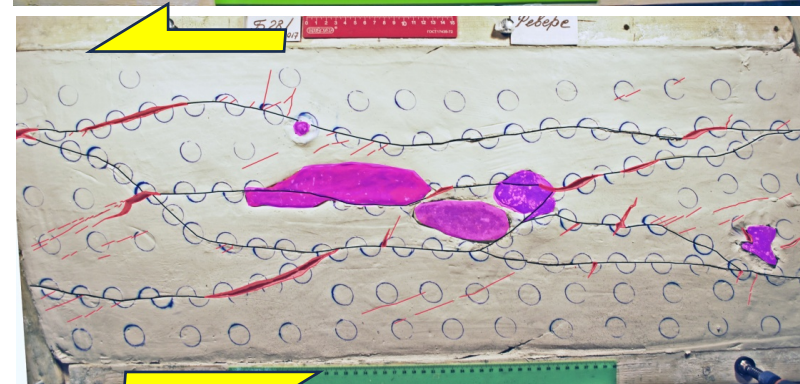
Установка для тектонофизического моделирования в лаборатории тектонофизики геологического факультета МГУ

(Фролова и др., 2018)

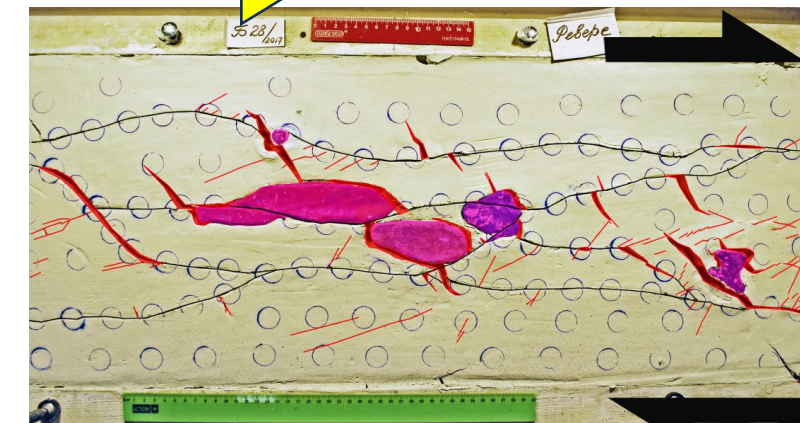
Красным цветом  
показаны участки  
растяжения



Начальные  
разломы и  
маркеры  
деформации



Фаза 1  
Левый сдвиг.  
«Внедрение»  
интрузивов



Фаза 2  
Правый сдвиг  
рудного этапа



## Баимская сдвиговая зона – аналоговое тектонофизическое моделирование

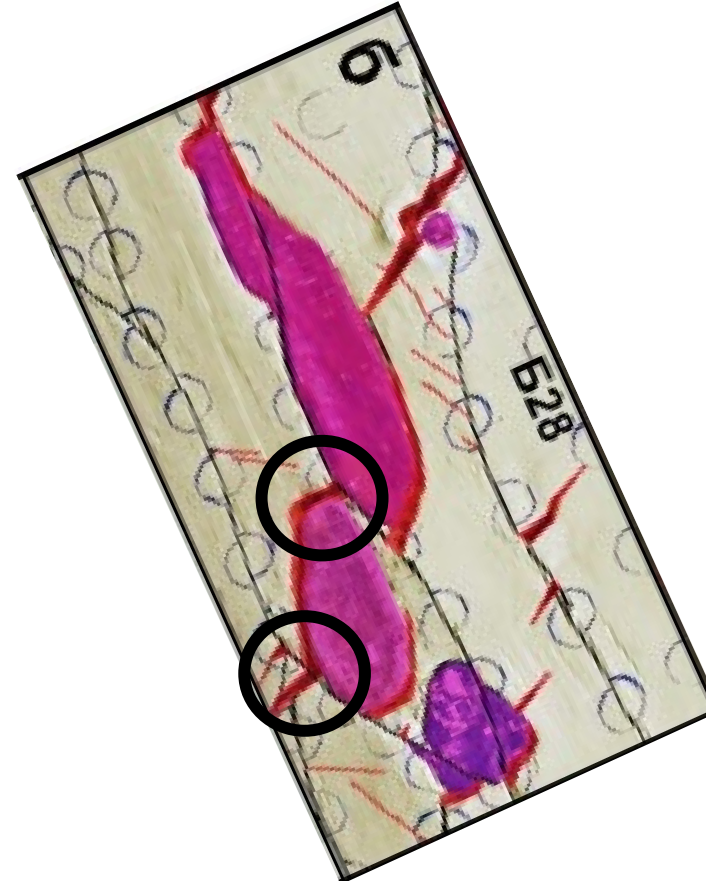
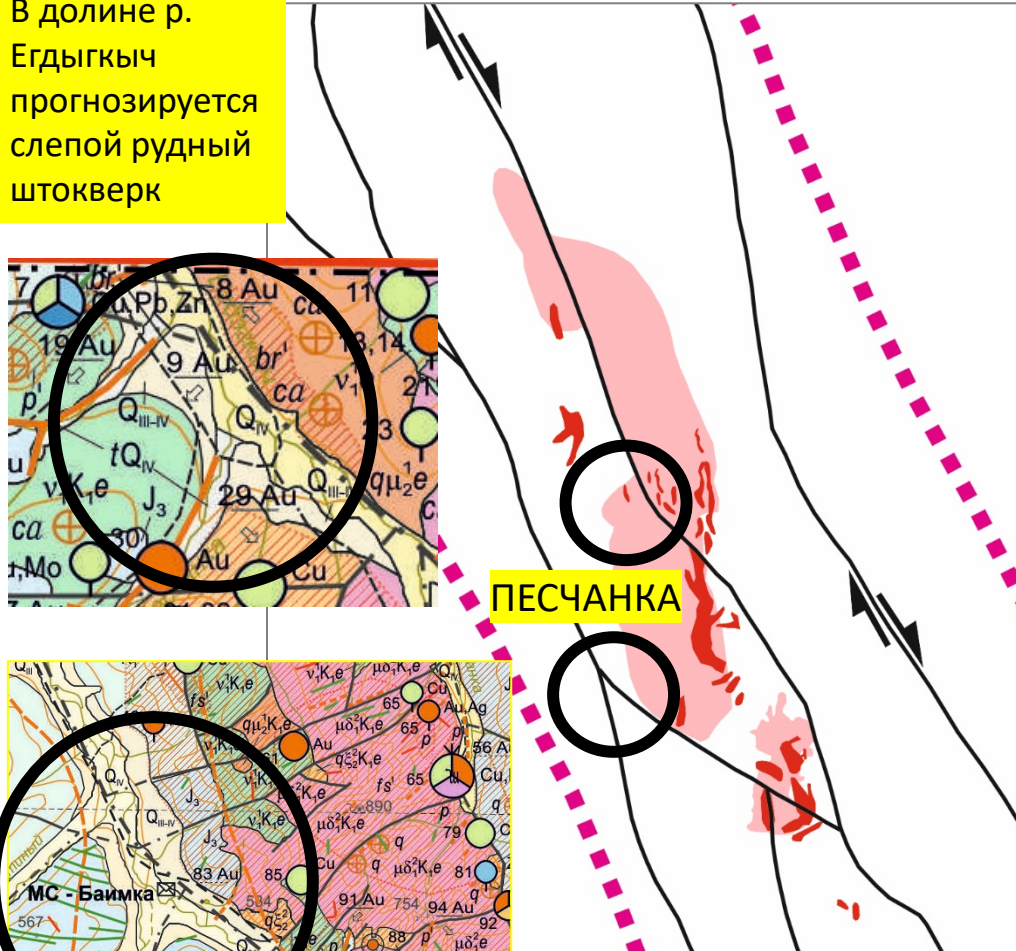
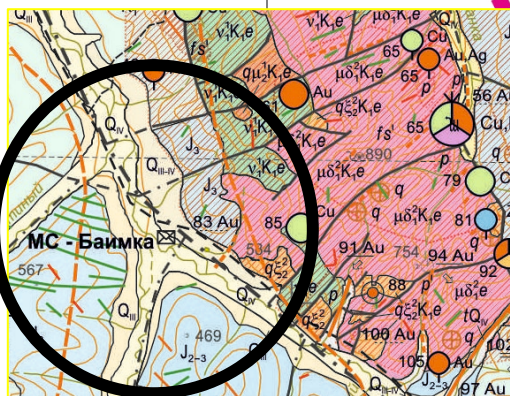
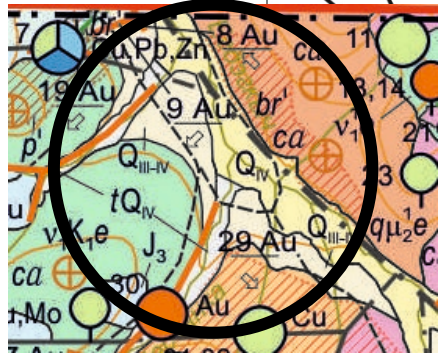
Медные штокверки Баимской сдвиговой зоны

Зоны растяжения в модели

### ПРОГНОЗ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ

Структуры растяжения на модели соответствуют известным рудным штокверкам и потенциальным рудным полям в узлах пересечения сдвигов под аллювиальными отложениями в долине рр.Баимка и Егдыгкыч – **рекомендованы поиски скрытого оруденения медно-порфиорового типа**

В долине р. Егдыгкыч прогнозируется слепой рудный штокверк

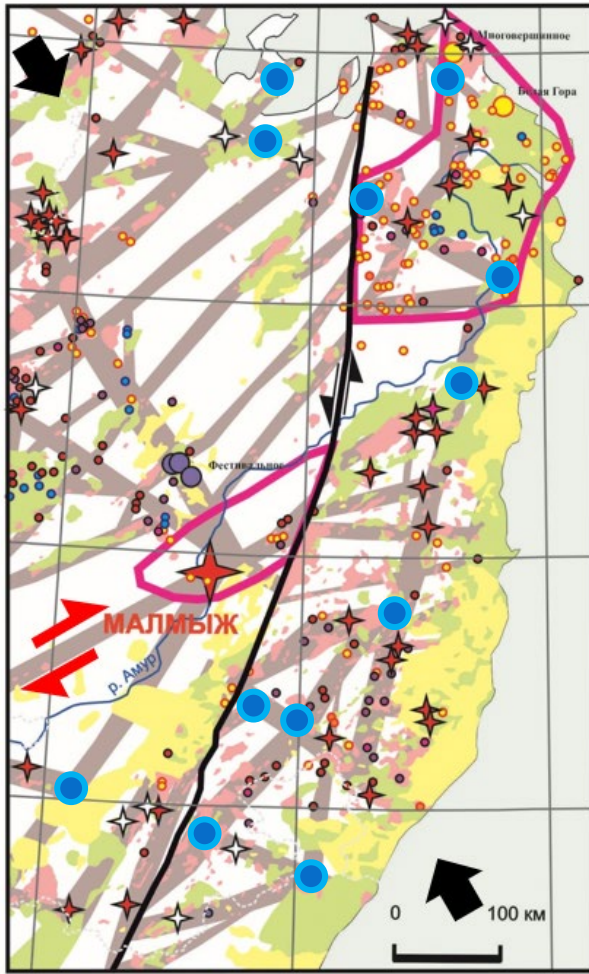


В долине р. Баимка есть предпосылки обнаружения медного штокверка: узел разломов, порфиоровые штоки, проявления меди и золота

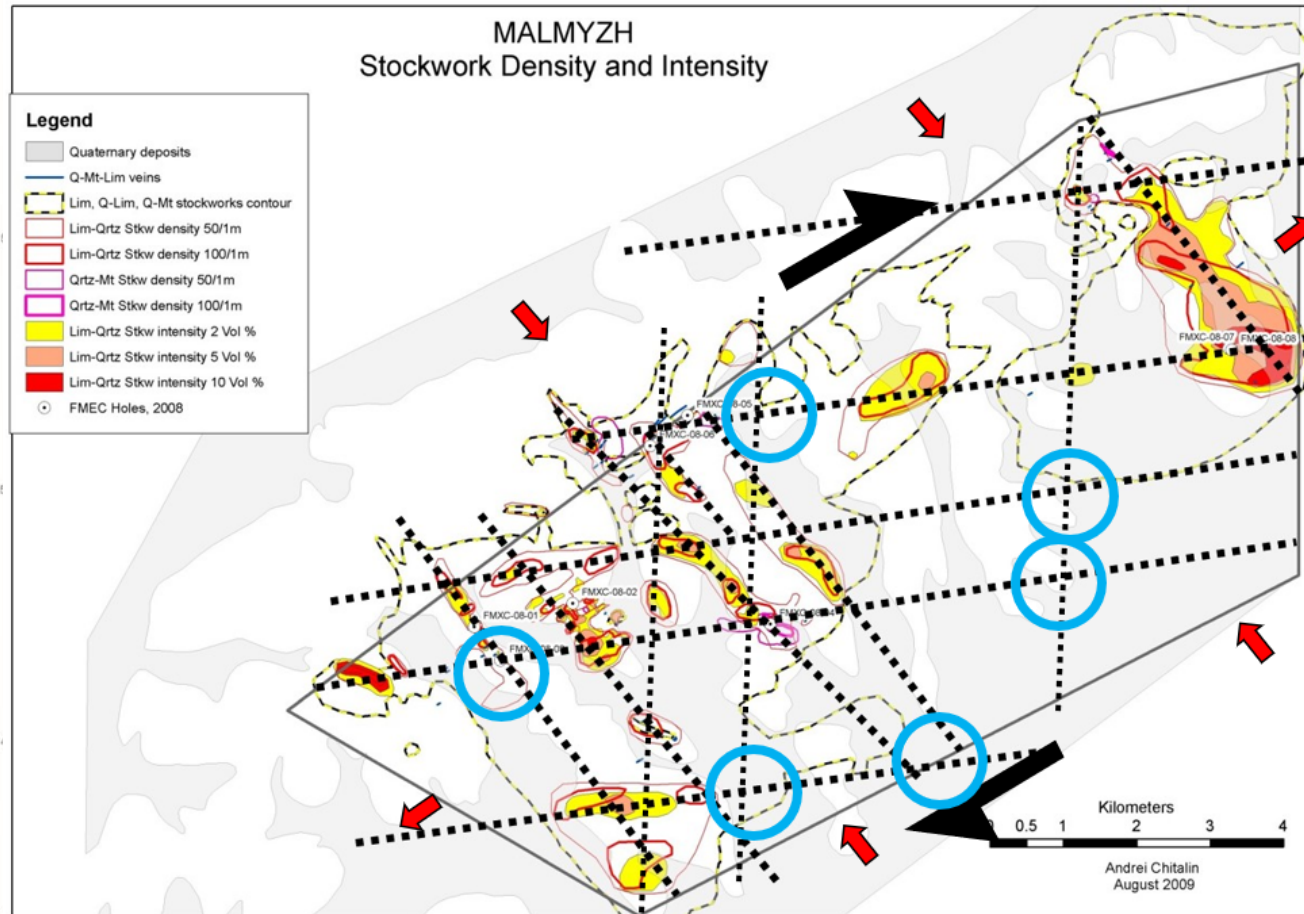
Региональные и локальные сдвиговые тренды минерализации. Прогноз медно-порфировых штокверков

Си-Мо-Аи порфировое месторождение Малмыж (запасы Си 8,32 млн т, Аи 347 т)

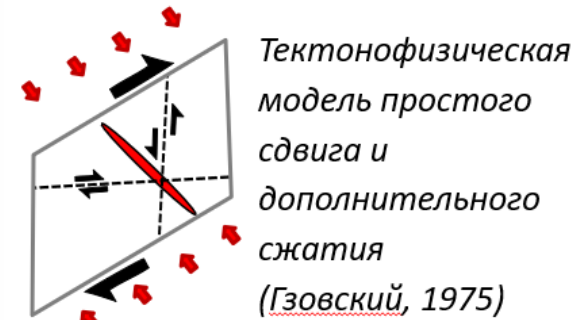
Тренды минерализации



Месторождение Малмыж. Штокверки и структурные тренды



Зона правосдвиговой транспрессии  
(простой сдвиг + дополнительное сжатие)



Рудные штокверки контролируются структурными трендами – трещиноватостью скальвания (сдвига) и отрыва

Структурный прогноз рудных штокверков

Прогнозируемые Си –порфировые штокверки



- Основа структурного прогноза – достоверная геолого-структурная модель
- Для прогноза оруденения важно определить:
  - тип структуры
  - кинематику разломов
  - типы возможных структурных ловушек
  - размер и направление структурного шага рудных залежей
- Геолого-структурный анализ наиболее эффективен в комплексе с данными геохимии и геофизики
- Тектонофизическое моделирование важно для понимания структуры и более достоверного прогноза

**Спасибо за  
внимание!**