



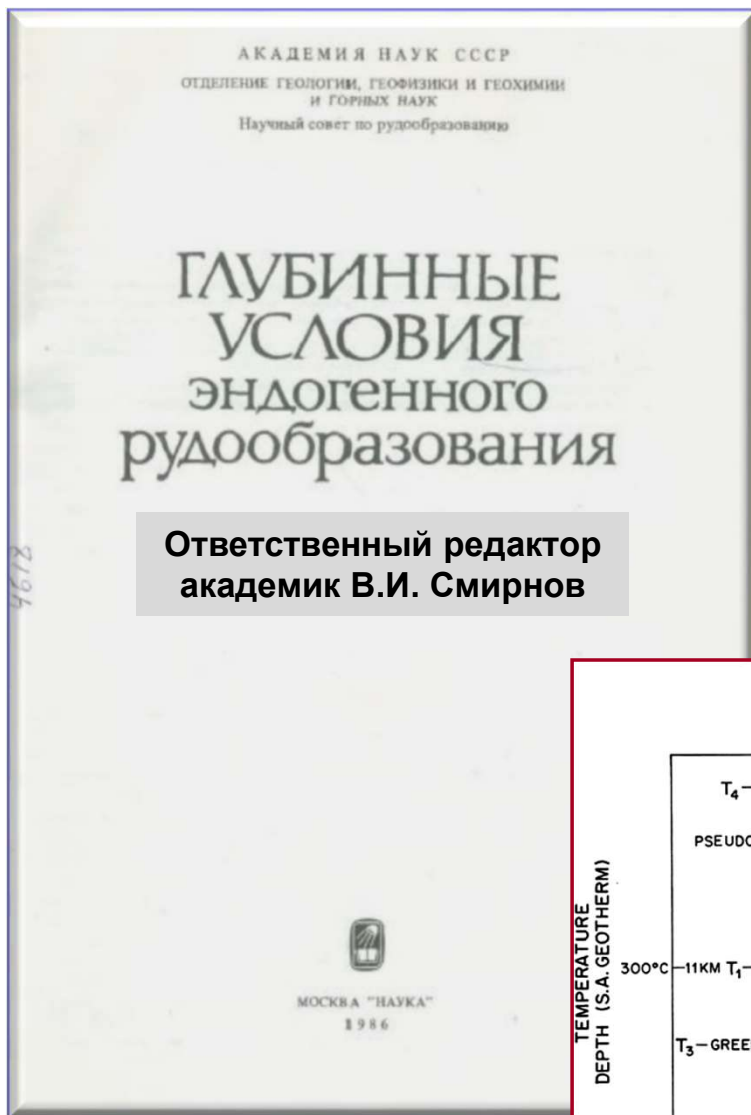
К ВОПРОСУ О ВЕРТИКАЛЬНОМ И ВРЕМЕННОМ ДИАПАЗОНЕ ЭНДОГЕННОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ

*В.А. Петров, А.А. Пэк, В.В. Полуэктов,
О.В. Андреева, С.А. Устинов, В.А. Минаев*

ИГЕМ РАН

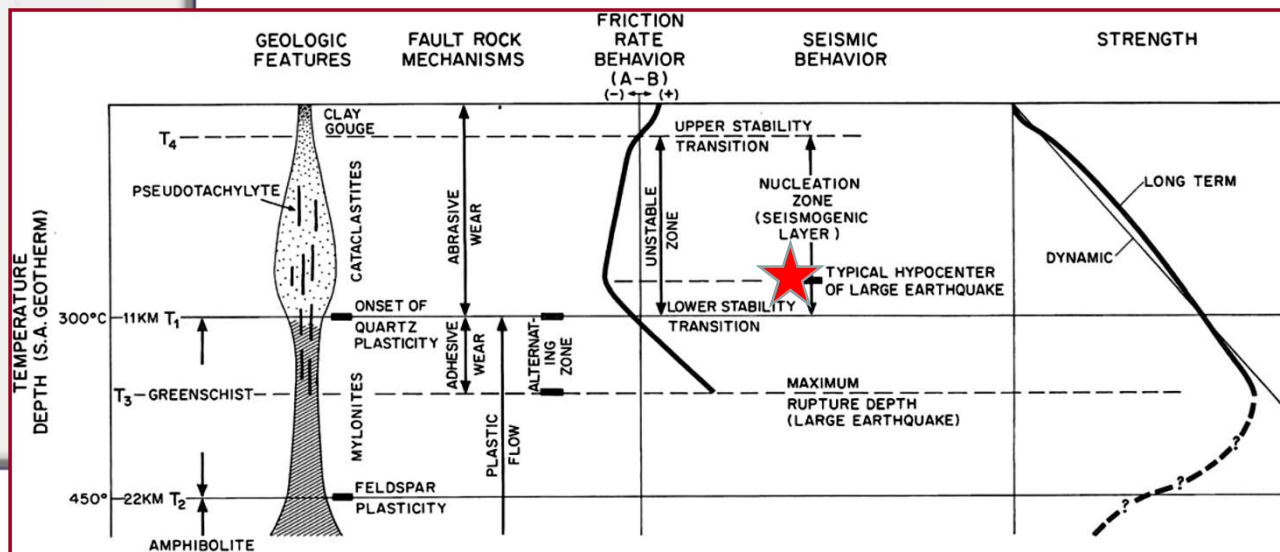
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОИСКОВОЙ ГЕОЛОГИИ»

Москва, ВИМС, 22-24 ноября 2022 г.



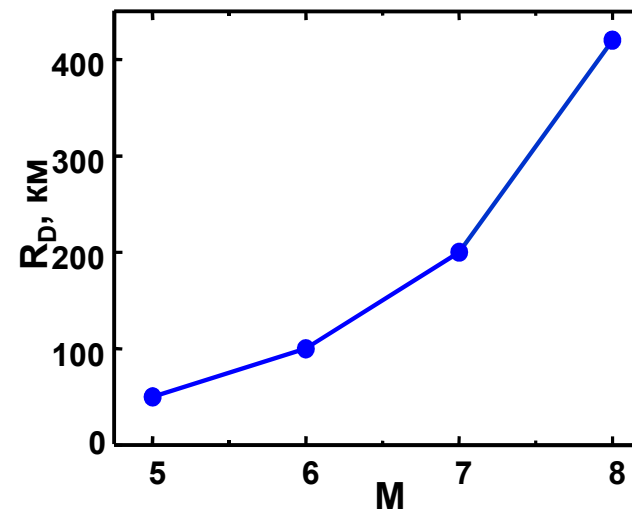
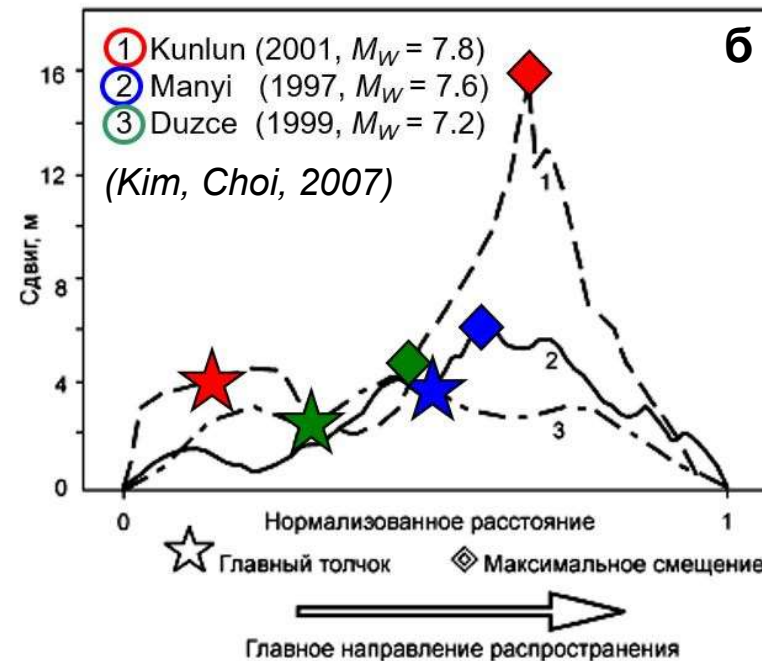
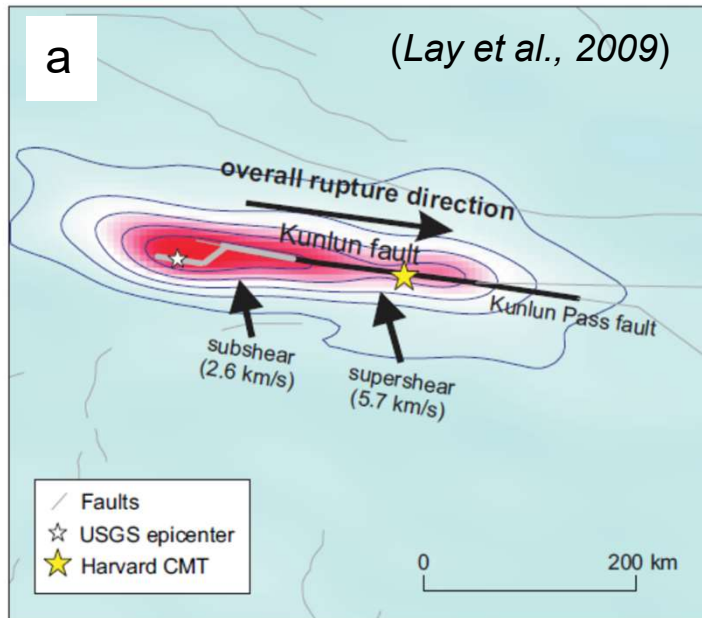
Ответственный редактор
академик В.И. Смирнов

«Эндогенные рудные месторождения с точки зрения ограничения их распространения на глубину могут быть разделены на две группы. К *первой группе* принадлежат магматические расплавы базальтоидной группы без геологических ограничений глубины их формирования в интервале от подкорового пространства до земной поверхности. Ко *второй группе* относятся газогидротермальные месторождения гранитоидной группы и мантийной дегазации, глубина распространения которых ограничивается петрологическим, геотермическим и структурным барьерами при оптимальных условиях в **10-20 км**».



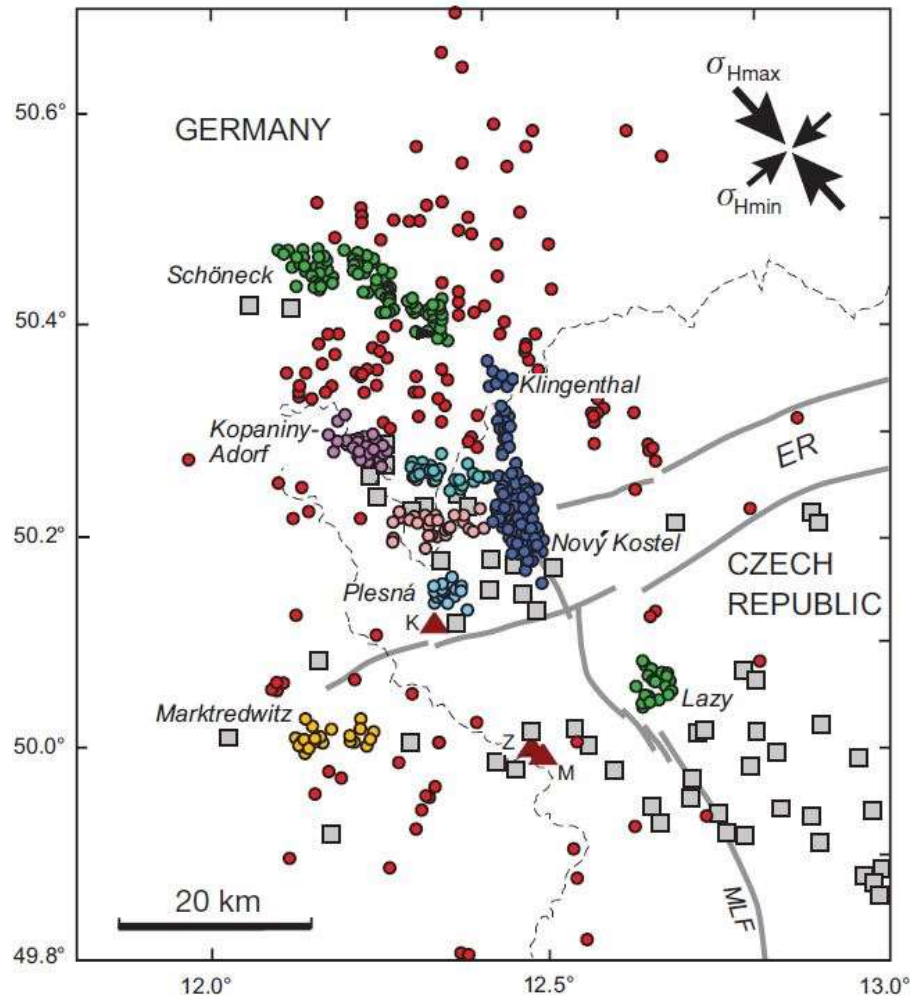
Модель глубинного разлома в верхней части земной коры, отражающая изменение механических параметров пород в зависимости от РТ условий (Scholz, 1988)

(а) Скорость разрушения разлома Куньлунь (землетрясение в 2001 г. M_W 7.8) и (б) расположение очагов землетрясений и максимальных амплитуд горизонтальных смещений по простиранию активных разломов

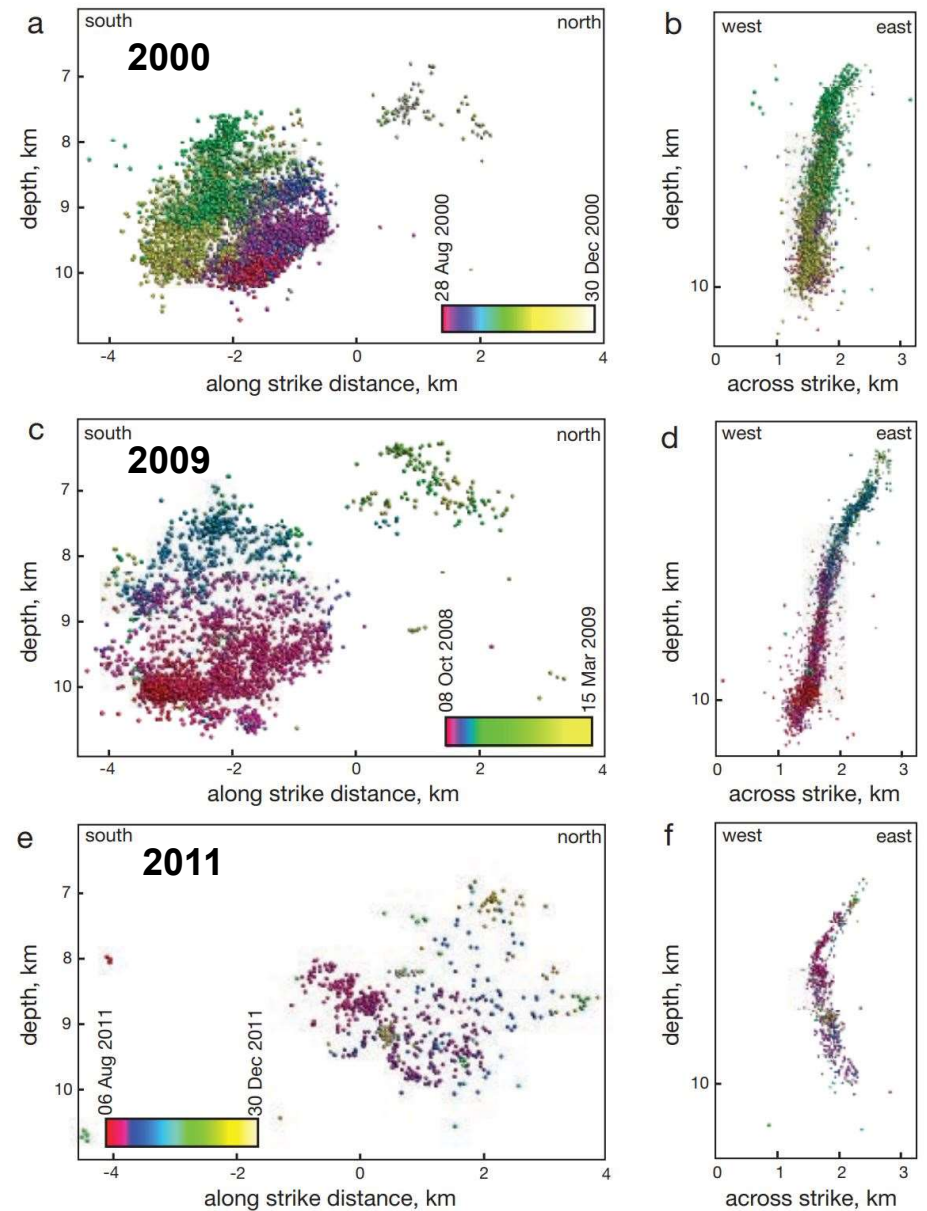


Размеры зоны приповерхностной дилатации в зависимости от M землетрясения на Камчатке (Копылова, 2008)

Распределение эпицентров «роевых» землетрясений в Западной Богемии на период 1991-2011 гг. (Сох, 2016)



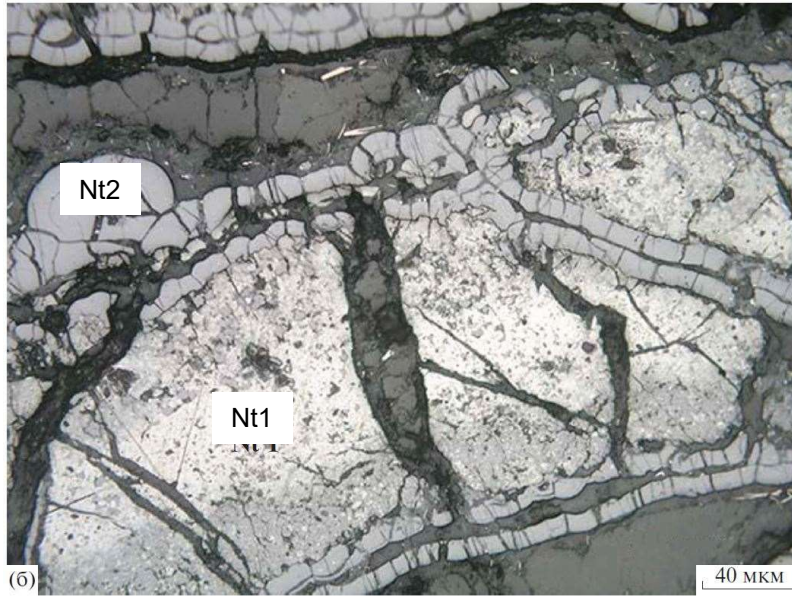
Развитие роев землетрясений вдоль разлома MLF (Mariánské Lázně fault) в районе Нови Костел, Чехия



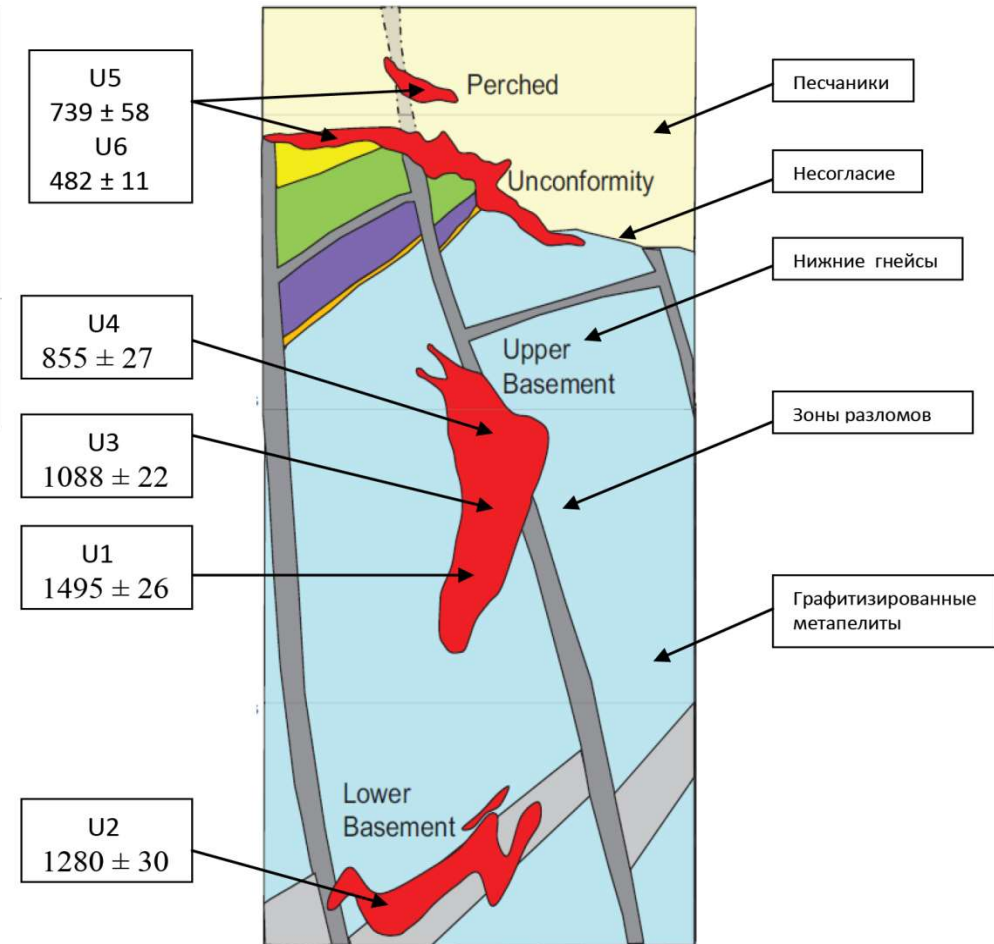
Примеры отложения и/или переотложения U-рудного вещества



Месторождения Балкашинское (1), Восток (2), Звездное (3) и Тушинское (4), Северный Казахстан (Голубев, Чернышев, 2022)



от Nt1 (413 ± 7 Ma) до Nt2 (267 ± 7 Ma) $\Delta \sim 146$ Ma



Месторождение Кианна, Shea Creek Project, Athabasca Basin, Canada (по Sheehan et al., 2016)

от U1 (1495 ± 26 Ma) до U4 (855 ± 27 Ma) $\Delta \sim 640$ Ma
от U1 (1495 ± 26 Ma) до U6 (482 ± 11 Ma) $\Delta \sim 1013$ Ma

Временной диапазон рудообразования: месторождения несогласия

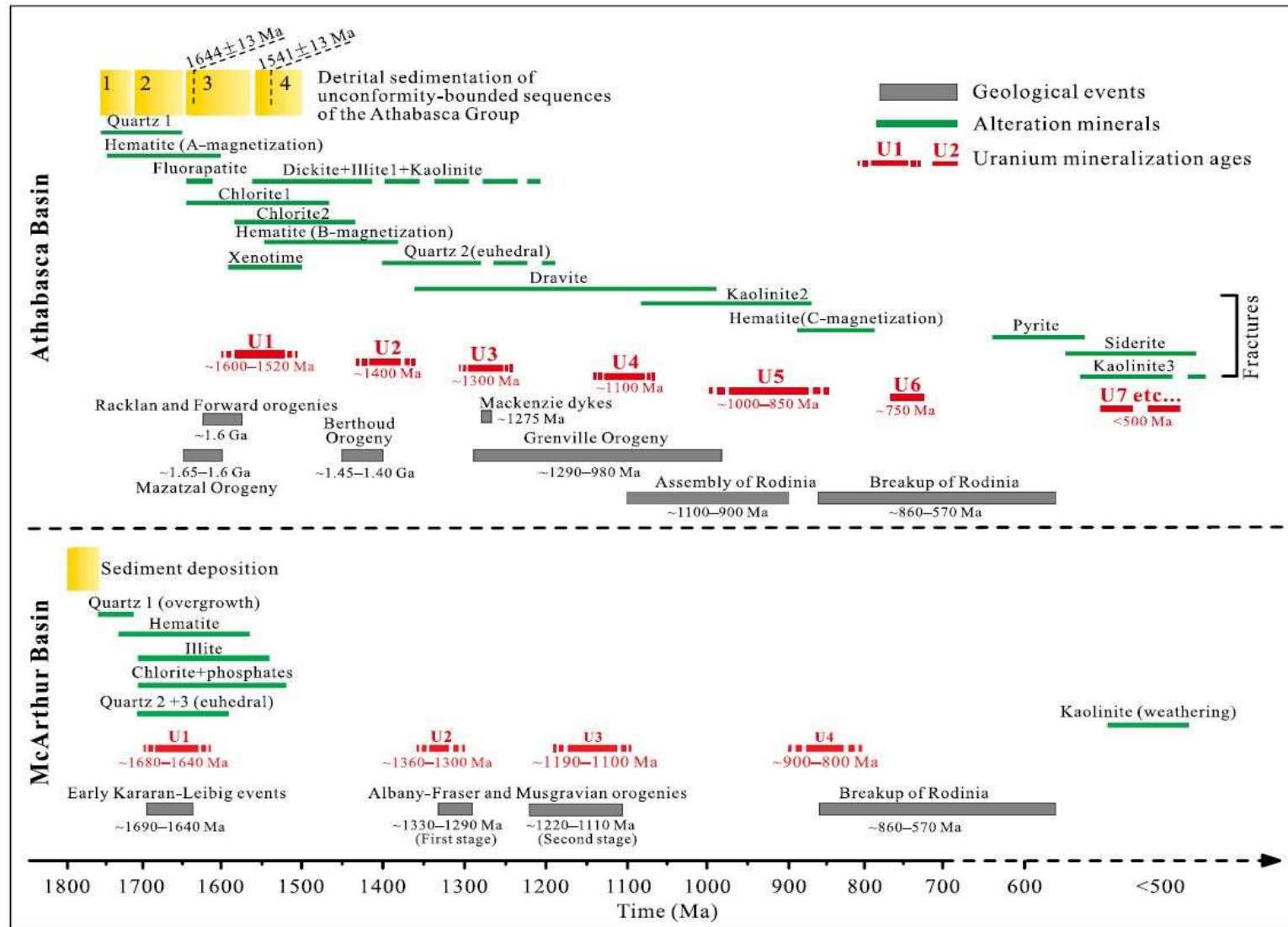
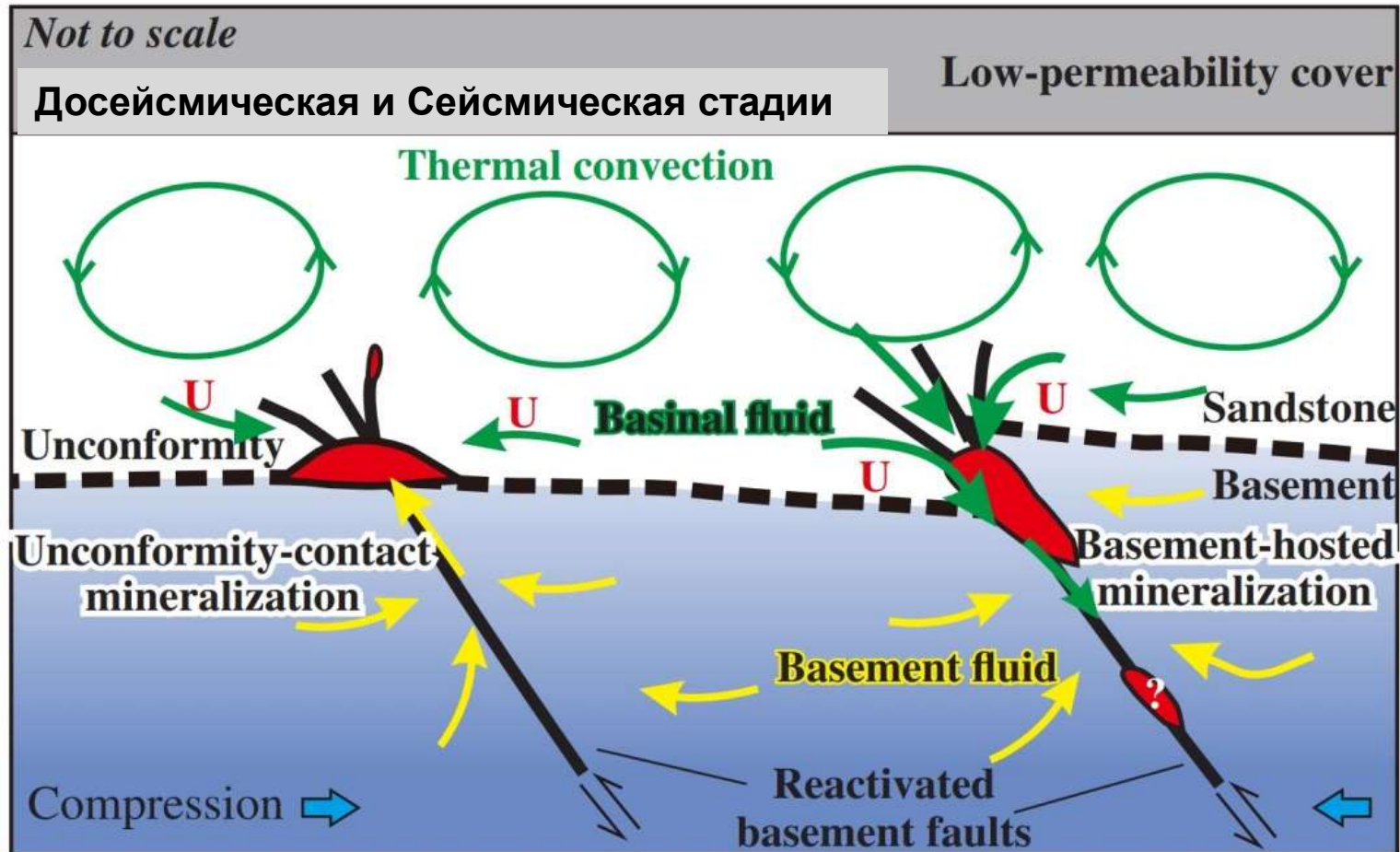


Схема формирования минеральных парагенезисов на месторождениях в бассейне Атабаска (Канада) и бассейне МакАртура (Австралия) в контексте корреляции с основными тектоническими событиями (Li et al., 2021).

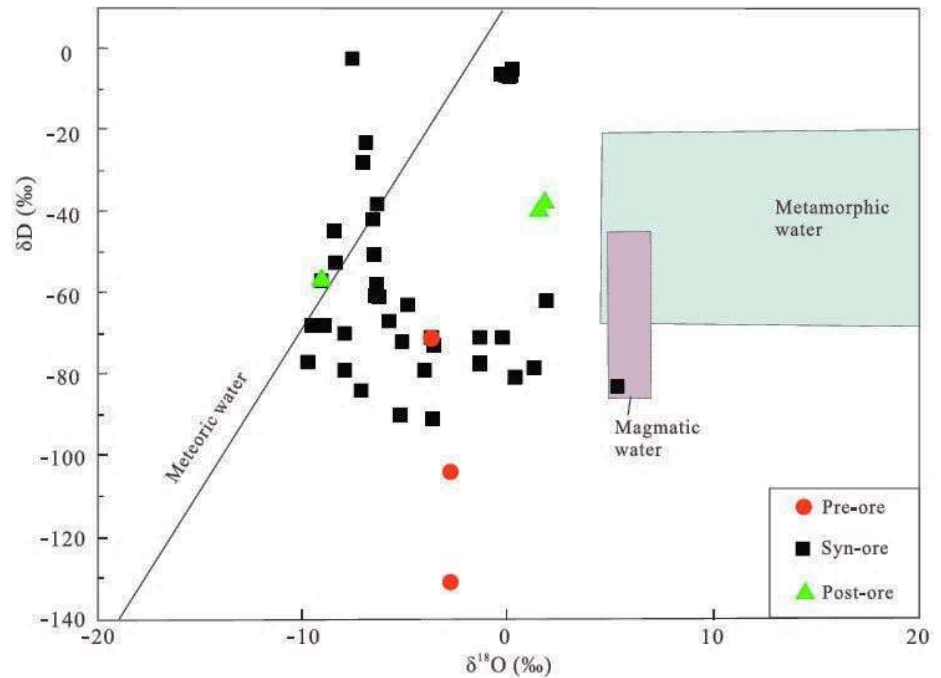
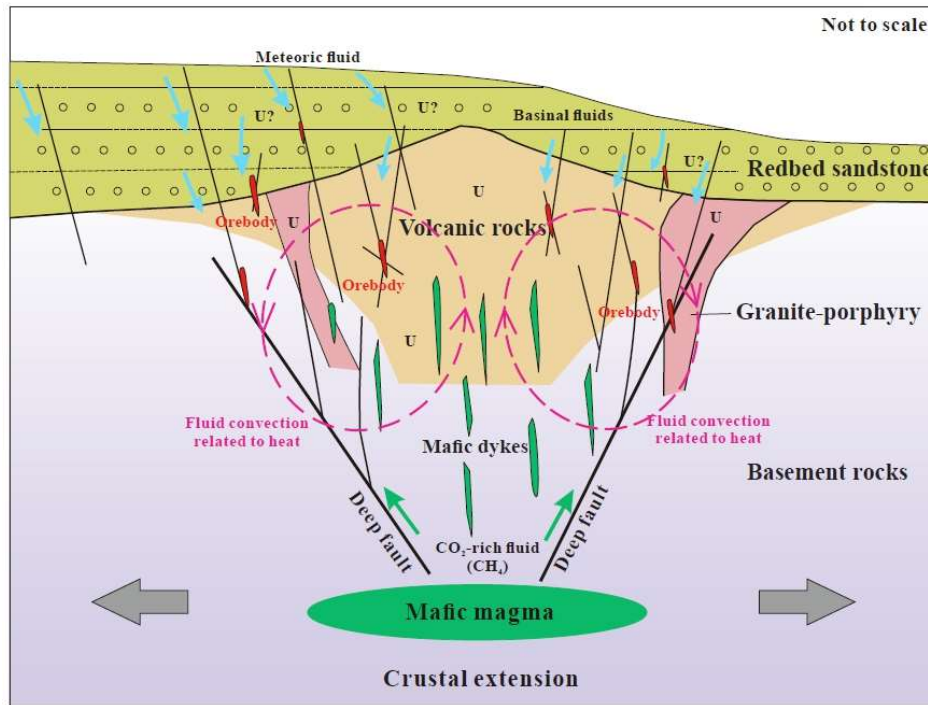
Сейсмотектоника и термоконвекция: месторождения типа несогласия



Моделирование с альтернативным расположением флюидоподводящих разломов в фундаменте бассейна Атабаски (Li et al., 2021):

- при относительно *высокой скорости деформации* ($6.66 \times 10^{-11} \text{ c}^{-1}$) из-за быстрого развития избыточного давления тектоническое сжатие может практически мгновенно разрушить тепловую конвекцию в осадочных породах, но по мере прогрессивного «снятия» деформации конвекция флюидов восстанавливается;
- тектоническое сжатие при относительно *низкой скорости деформации* ($6.66 \times 10^{-13} \text{ c}^{-1}$) не влияет на ранее имевшуюся тепловую конвекцию и вызванный деформацией сжатия поток минералообразующих растворов в фундаменте сосуществует с тепловой конвекцией в бассейне.

Термоконвекция и сейсмотектоника: вулканогенные месторождения



Принципиальная схема U рудообразования в РП Сианшань (по Bonnetti et al., 2020). U, Th±REE, Zr, Y, Nb, характеризующие раннюю стадию минерализации, могли привноситься магматическими флюидами из субщелочной базитовой интрузии, которая является источником тепла и в сочетании с метеорными водами задает формирование термоконвективных ячеек

Изотопия флюидов, ассоциирующих с урановой минерализацией в Сианшаньском рудном поле, иллюстрирует тот факт, что рудообразующие флюиды имели метеорную природу (по Guo et al., 2020)

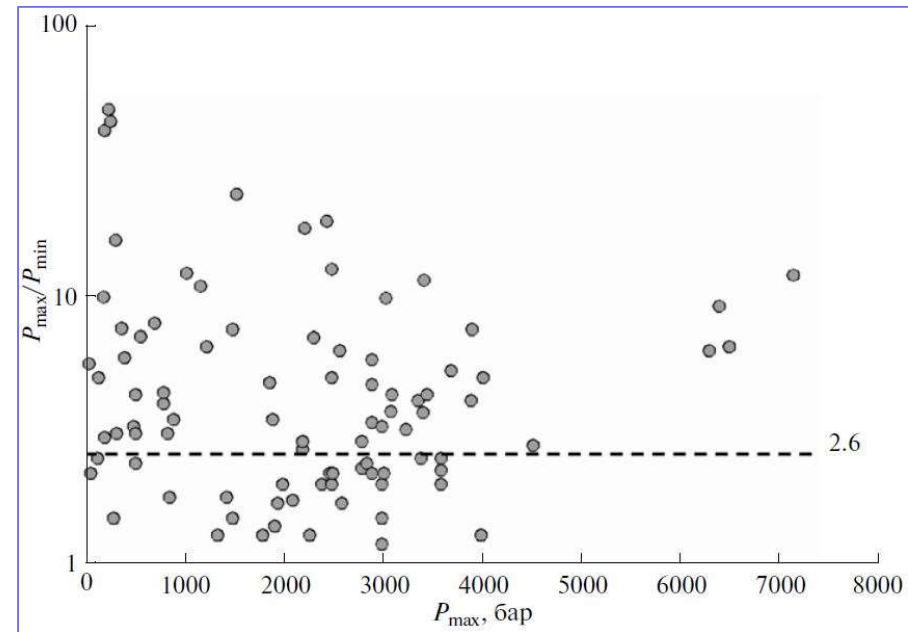
Прокофьев В.Ю., Пэк А.А., 2015: Проблемы оценки глубины формирования гидротермальных месторождений по данным о давлении минералообразующих флюидов

Для ориентировочной оценки глубины формирования гидротермальных месторождений предлагается использовать данные об интервале изменения давления во флюидных включениях от их максимальных P_{\max} до минимальных P_{\min} значений с учетом ограничений на физически предельные значения этого интервала, определяемые величинами литостатического и гидростатического давления флюидов.

Месторождение, регион	P , бар	Метод*	P_{\max}/P_{\min}	$T_{\text{гом}}$, °C
1	2	3	4	5
Жировское, Россия	45–8	1	5.6	270–140
Корю, Япония	68–31	1	2.2	310–170
Джеонгью-Буан, Корея	140–55	1	2.5	320–103
Балей, Россия	150–30	1	5.0	355–130
Саншин, Ю. Корея	150–30	1	5.0	310–136
Риддер-Сокольное, Казахстан	198–20	1	9.9	370–80
Юный, Россия	210–70	1	3.0	376–139
Кочбулак (жилы), Узбекистан	205–5	1	41	370–65
Кочбулак (трубки), Узбекистан	265–6 1275–260	1 2	44.2 4.9	465–105
Банска Штьявница, Словакия	245–5	1	49	380–125
Эль Тениенте, Чили	300–200	1	1.5	504–225
Баоготу, Китай	320–20	1	16	400–156
Месторождения типа Карлин, Китай	330–105	1	3.1	310–98
Апигама, Греция	380–50	1	7.6	235–125

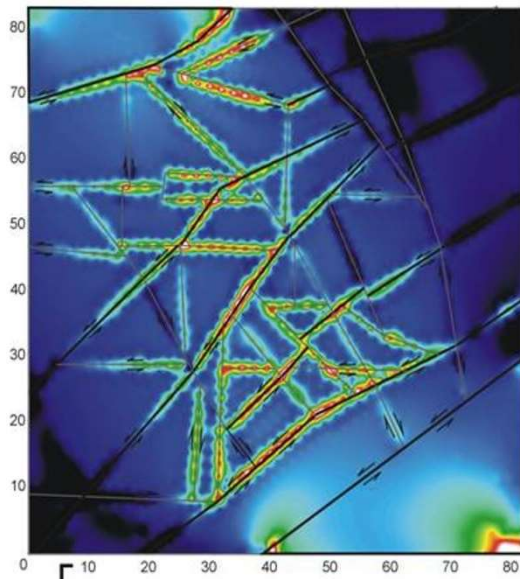
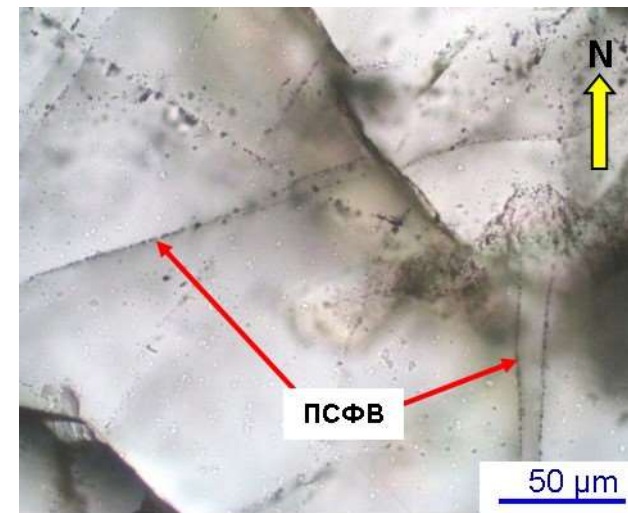
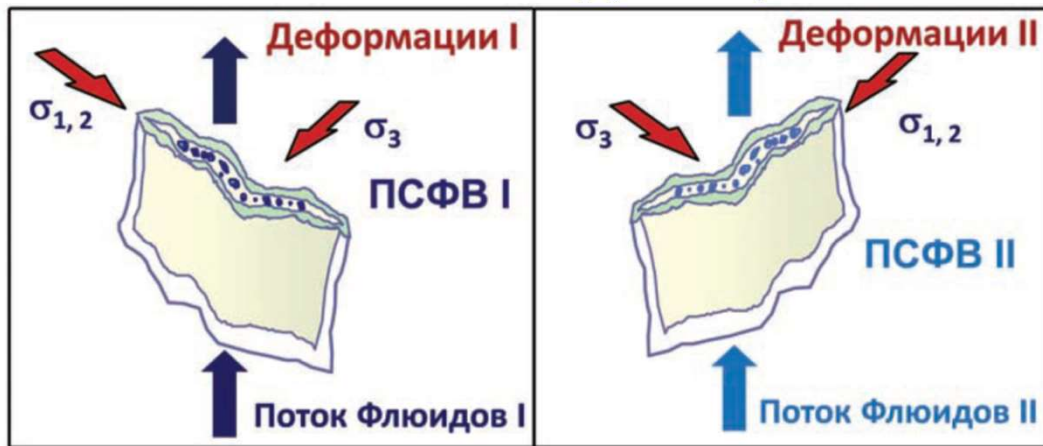
*Метод оценки давления: 1 – пересечение изохоры и изотермы для гетерогенного флюида; 2 – по насыщенным хлоридным рассолам

**НЕОБХОДИМЫ
СТРУКТУРНЫЕ МАРКЕРЫ !**



Изменение отношения предельных значений давления флюидов в зависимости от его максимального значения для разных месторождений. Горизонтальной пунктирной линией обозначено отношение литостатического давления к гидростатическому, $P_L/P_H = 2.6$.

Приложение 1: Реконструкция флюидодинамических режимов и глубины рудообразования по ПСФВ



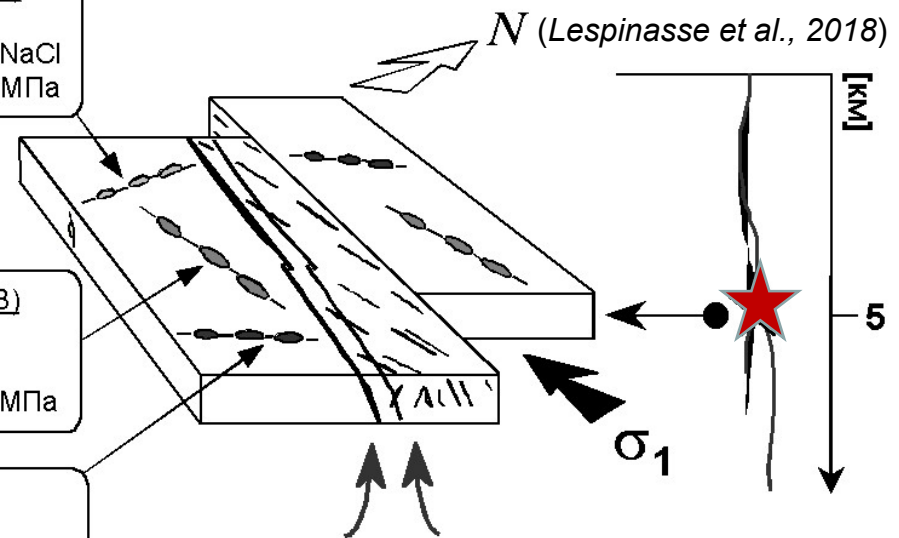
Интенсивность скалывающих напряжений (МПа) в обстановке несоосного сжатия. 2D тектонофизическая модель на ГИС основе (Petrov et al., 2021)

3 система ПГЖВ (СВ-ЮЗ)
 T = 170°C
 Соленость 0 – 10% экв. NaCl
 Флюидное давление 30 МПа

2 система ПГЖВ (СЗ-ЮВ)
 T = 270 - 320°C
 Соленость низкая
 Флюидное давление 45 МПа

1 система ПГЖВ (З-В)
 T > 320°C
 Соленость низкая
 Флюидное давление > 45 МПа

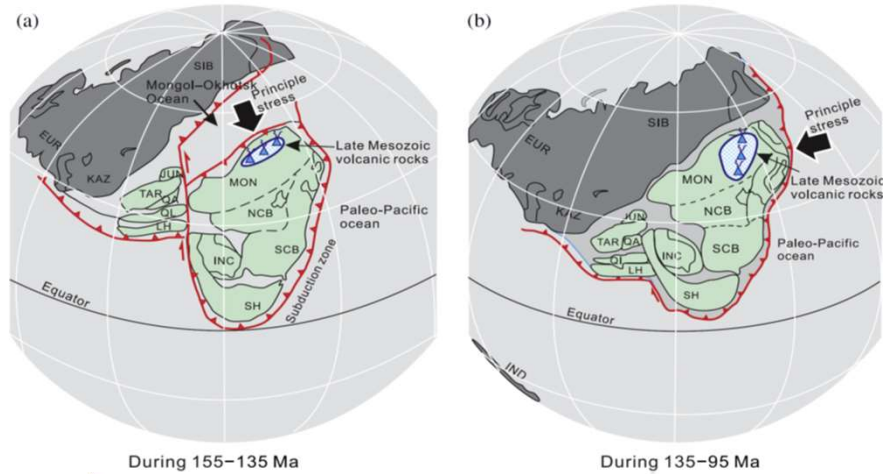
Зона разлома СЗ простираения



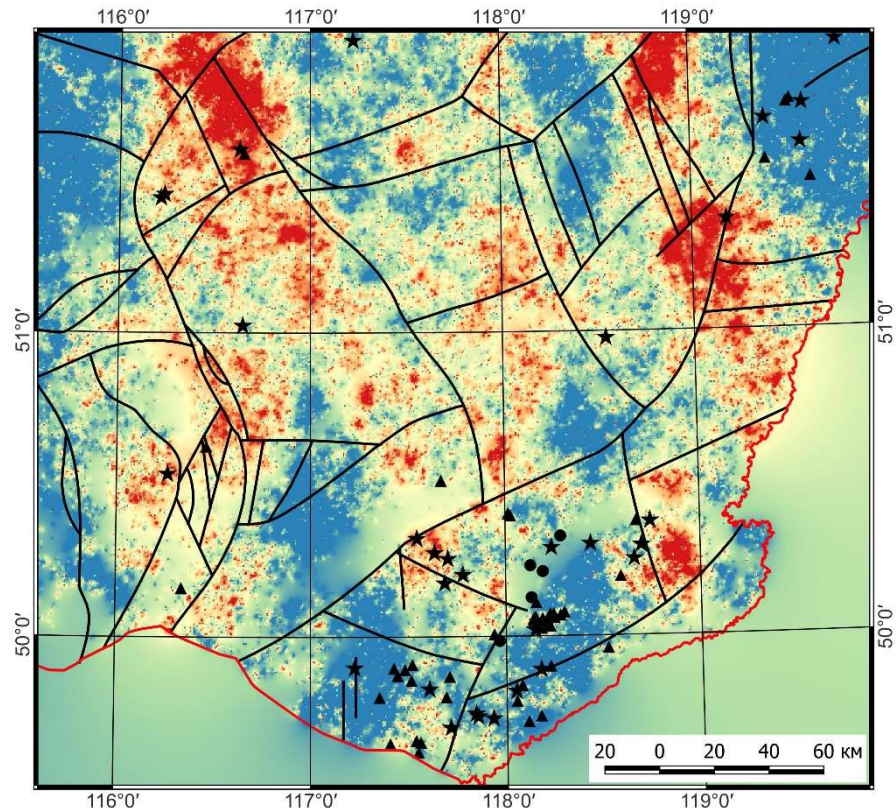
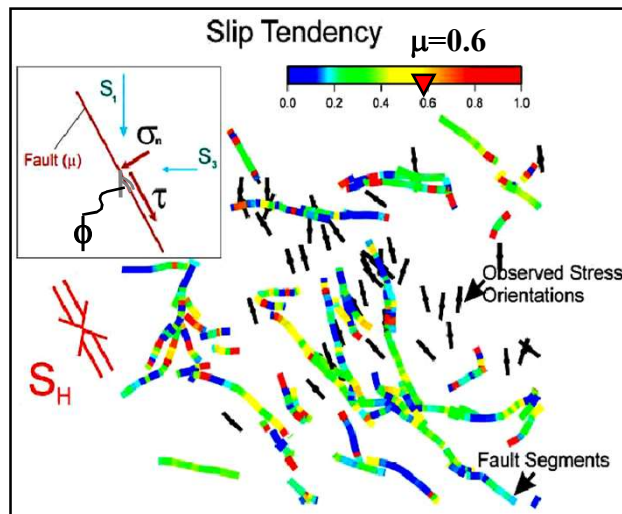
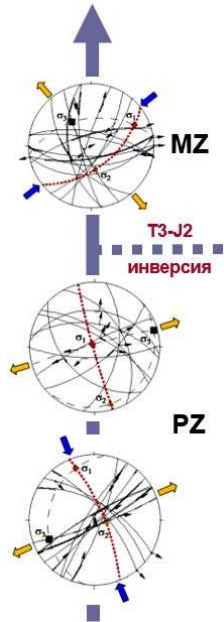
Циклическое поступление флюидов в зону разлома

Приложение 2: Минерально-системный подход на основе ГИС моделирования

- Линеаментно-статистический (кластерный) анализ
- Тектонодинамический (кинематический) анализ
- Флюидодинамический анализ



Палеорекострукция MZ тектонических событий (Yang et al., 2015)



Условные обозначения

- Граница Российской Федерации
 - Месторождения и рудопроявления урана
 - Тектонические нарушения в фундаменте
- Тенденция к сдвигу (μ)
- 0 0.6 1

- Sandstone-related system
- ▲ Volcanic-related system
- ★ Granite-related system

$$\tau = [(S_1 - S_3)/2] \sin 2\phi$$

$$\sigma_n = [(S_1 + S_3 - 2P_f)/2] + [(S_1 - S_3)/2] \cos 2\phi$$

(Jaeger, Cook, 1979)

Выводы

- 1.** В настоящее время задача о вертикальном и временном диапазоне эндогенного рудообразования (на примере урановых месторождений) далека от своего решения.
- 2.** Минерально-системный подход к формированию геолого-генетических моделей месторождений, реализующий парадигму «источник → транспорт → отложение», ориентирован на выявление состава и свойств рудоносных флюидов.
- 3.** Телескопированное проявление рудогенеза в одних и тех же «структурных ловушках» через значительные (миллионы лет) промежутки времени требует детальной реконструкции взаимосвязи структурообразующих и флюидодинамических процессов комплексом современных методов.