



Роль академической науки в формировании теоретических основ уранового рудообразования

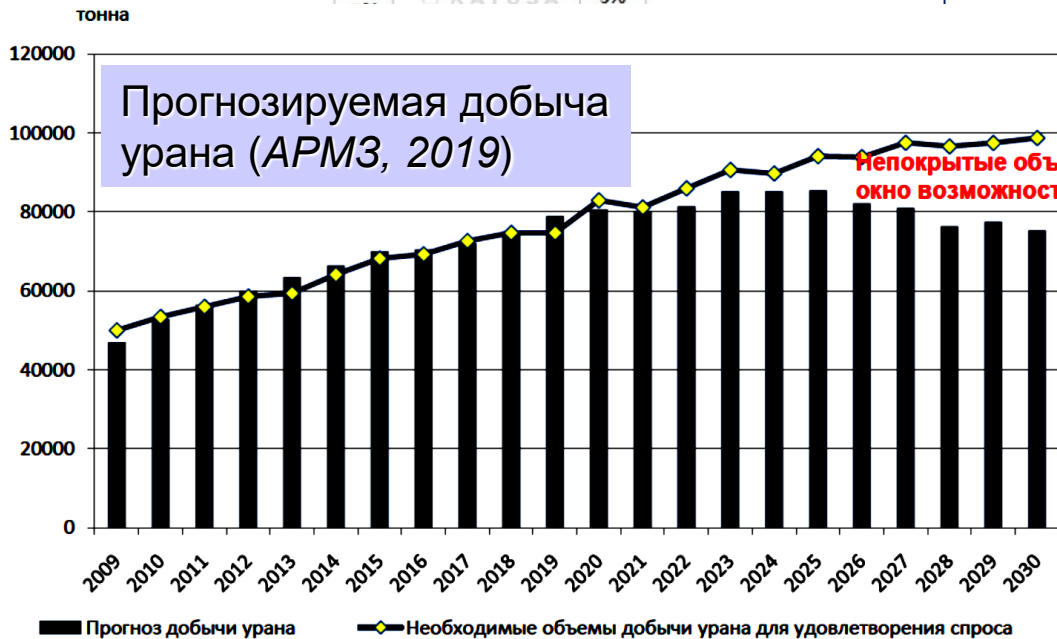
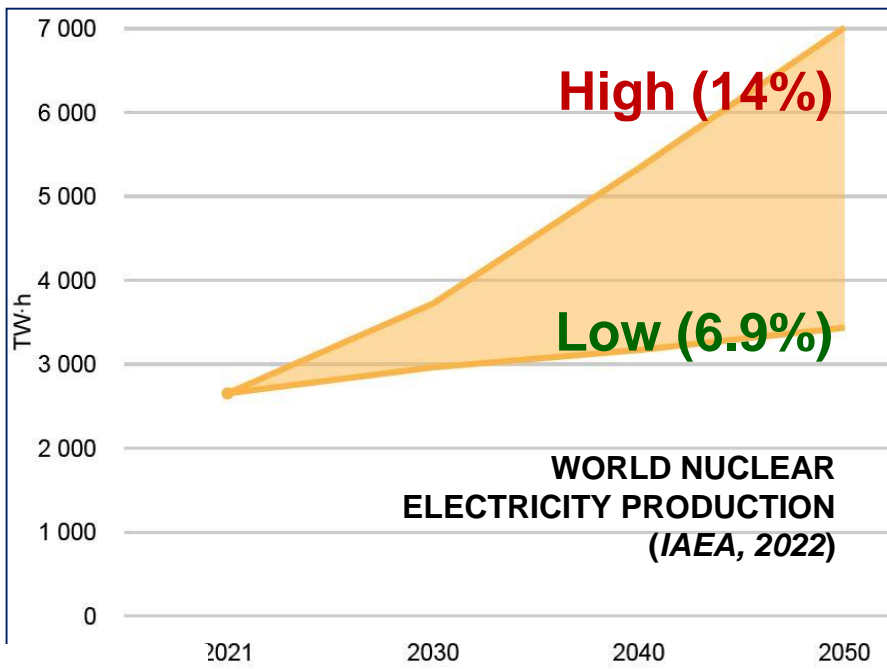
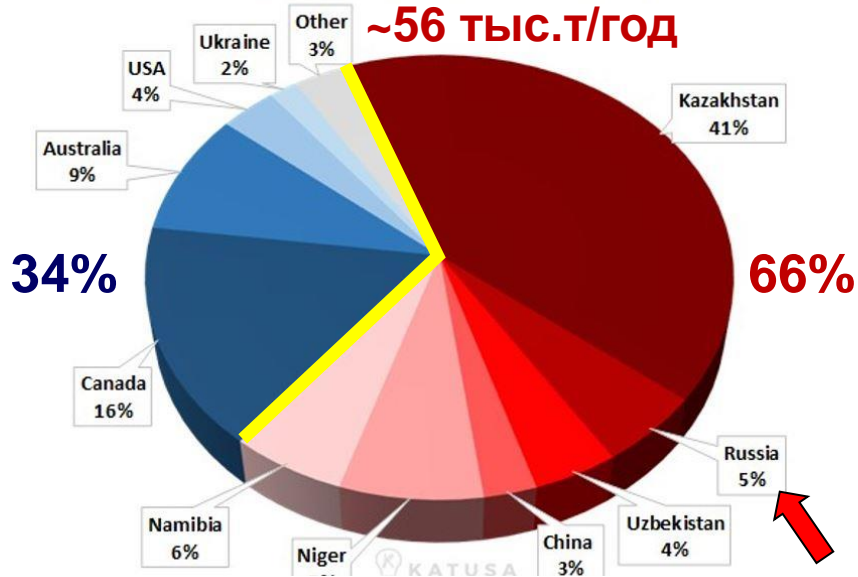
В.А. Петров, С.А. Устинов

Юбилейное заседание межотраслевого Координационного научно-технического совета по геологии, поискам и разведке месторождений урана, посвященном 80-летию становления отечественной урановой геологии
Москва, ФГБУ «ВИМС», 23 мая 2023 г.

Добыча урана по странам на фоне роста выработки АЭ

Global Uranium Production: 124 Million lbs

US Friendly (Blue) vs Russian Friendly (Red)



Реалии уранового рынка:
2010-2020 гг. – потребность в природном уране удовлетворена добычей
После 2020 г. – дефицит уранодобывающих мощностей
После 2025 г. – снижение добычи урана и дефицит мощностей (вывод из эксплуатации рудников в связи с истощением запасов)

URANIUM 2022: Resources, Production and Demand. OECD-NEA, 2022

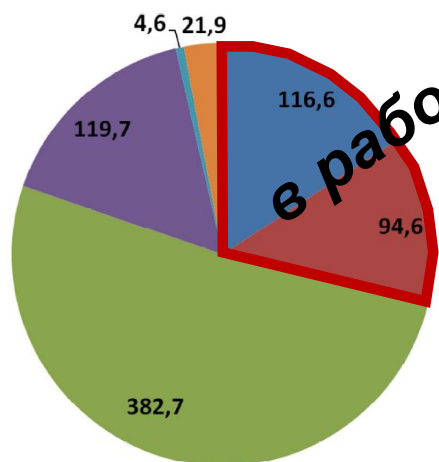
Uranium 2022 Resources, Production and Demand

Характеристика запасов урана основных рудных районов РФ

Балансовые запасы урана по состоянию на 01.01.2021 г. составляли **710,6 тыс. т**, они заключены в недрах **53** месторождений (*Государственный доклад, 2021*)

Объекты	Геолого-промышленный тип	Запасы U, тыс.т.	Содержание U, %	Способ отработки	Категории себестоимости допл./ кг U
Стрельцовское рудное поле, ПАО "ППГХО"	Mo-U жильно-штокверковый в ВТС	116,6	0,164	Горный подземный	80-130
Витимский район, АО "Хиагда"	U песчаниковый пласто- и линзообразный в палеодолинах неогена	44,4	0,045	Скважинное подземное выщелачивание	40-80
Зауральский район, АО Далур	U песчаниковый пласто- и линзообразный в юрских палеодолинах	14,8	0,023	Скважинное подземное выщелачивание	40-80
Эльконский район, АО "Эльконский ГМК"	Au-U жильно-штокверковый в долгоживущих разломах	382,7	0,147	Горный подземный	130-260
Чикойский район, АО УДК "Горное"	U (бетауранотит) жильно-штокверковый	94,6	0,41	Комбинированный: горный с подземным выщелачиванием	80-130
Оловский район	U пласто- и линзообразный в вулканогенно-терригенных впадинах	13,4	0,077	Комбинированный: горный с подземным выщелачиванием	80-130

РЕЗЕРВ



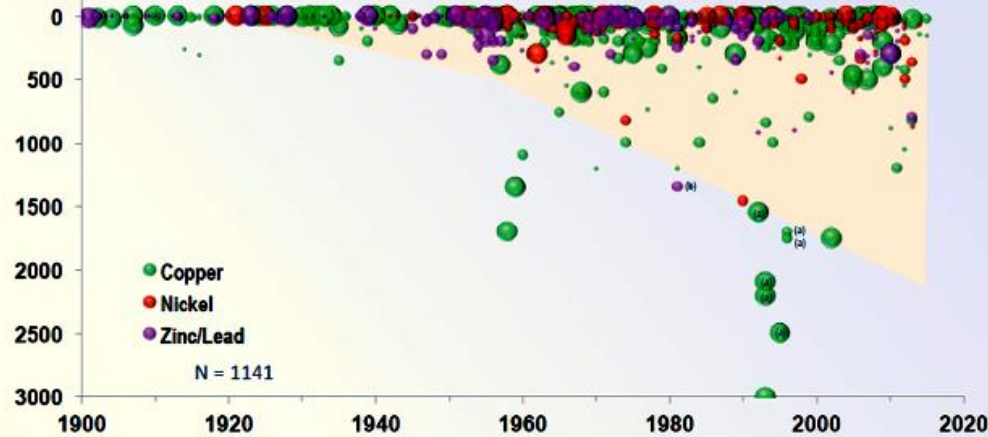
в работе

Распределение запасов урана по основным геолого-промышленным типам (в тыс.тонн) (ФГБУ «ВИМС», 2020)

- жильно-штокверковый тип в ВТС (СРП, Оловское, Ласточка)
- песчаниковый тип (Хиагдинское, Имское, Далматовское)
- Au-U в щелочных метасоматитах (Элькон, Курунг)
- U-TR-PM в щелочных метасоматитах (Улуг-Танзекское, Катугинское)
- в гранитах (Горное, Березовое)
- U-TR-P2O5 в костном детрите (Степное, Шаргадыкское)

Base Metal Deposits Found in the World Between 1900 and 2015

Depth of Cover (Metres)



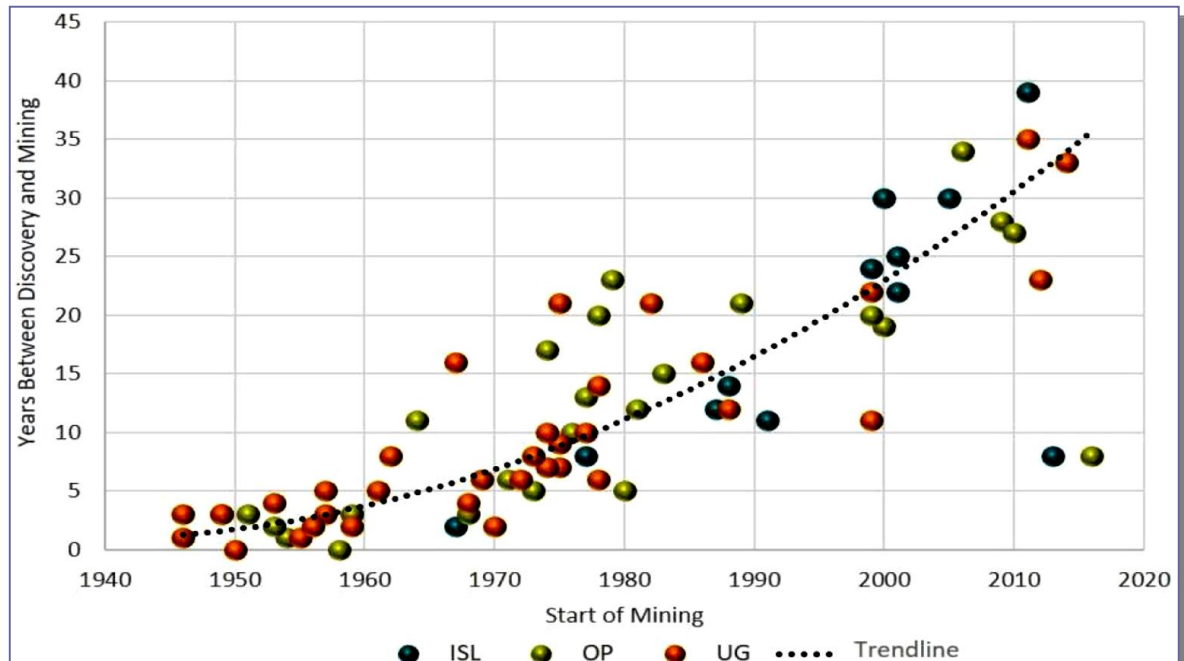
Note: Size of bubble refers to "Moderate", "Major" and "Giant"-sized Cu, Ni, Pb and Zn deposits.
Excludes Nickel Laterite deposits and undersea deposits
(a) Stratabound copper deposits in Poland, found while drilling for oil
(b) Admiral Bay zinc deposit in Australia, found while drilling for oil

Динамика освоения геологического пространства для добычи ТПИ

Глубины залегания Cu, Ni и Pb-Zn месторождений, открытых с 1900 г. (по Schodde, 2014, 2016 в *Geochemical Perspectives*. 2017. Vol. 6. No 1)

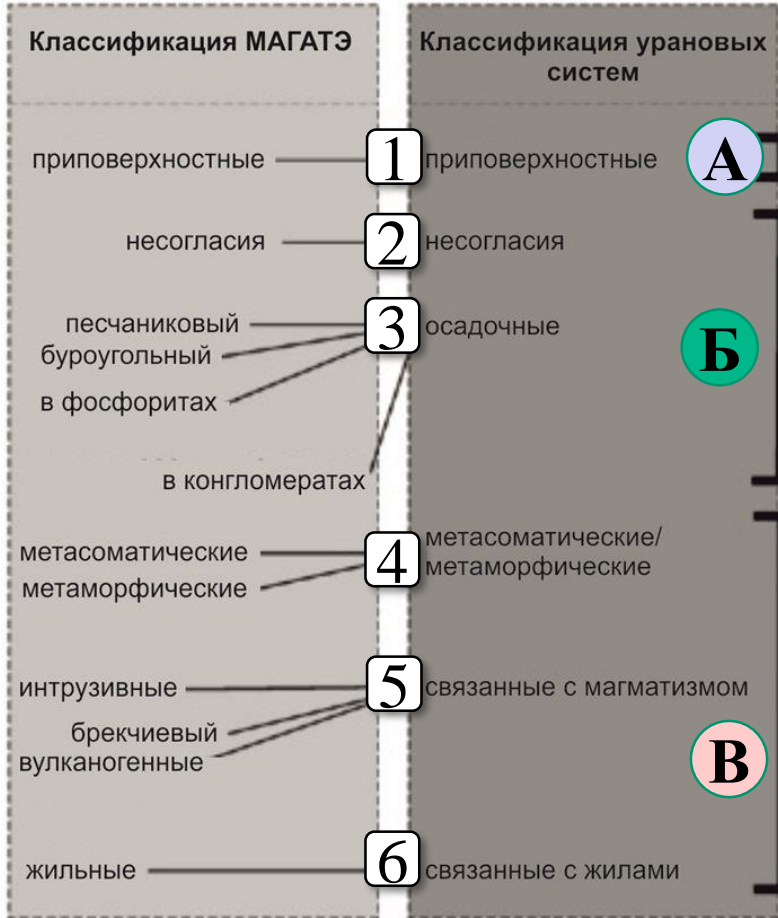
Динамика освоения геологического пространства на примере урана

Период времени от открытия до начала отработки U месторождений различными способами (IAEA, 2020):
ISL – СПВ,
OP – карьеры,
UG – подземный способ

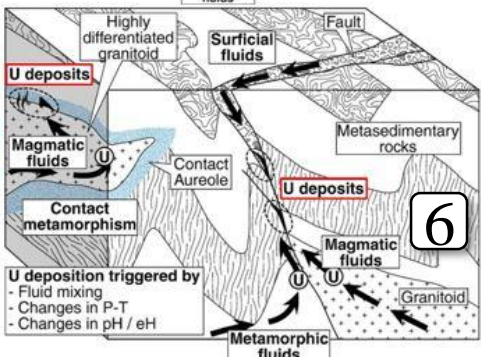
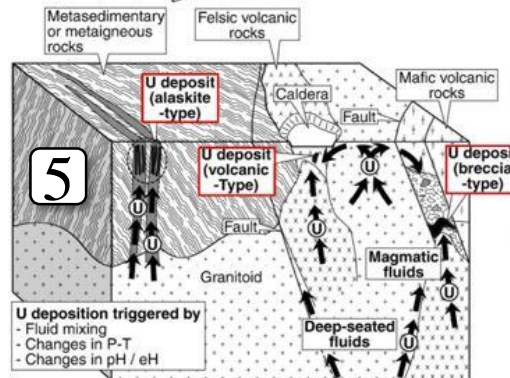
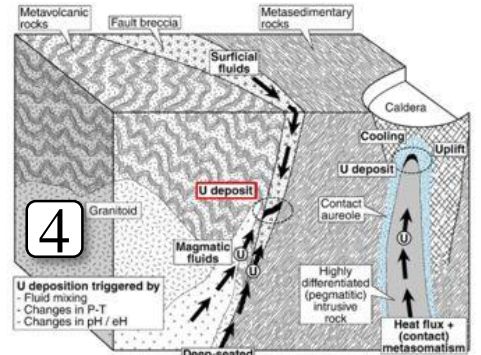
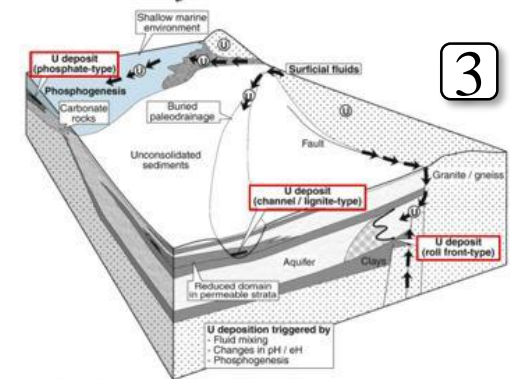
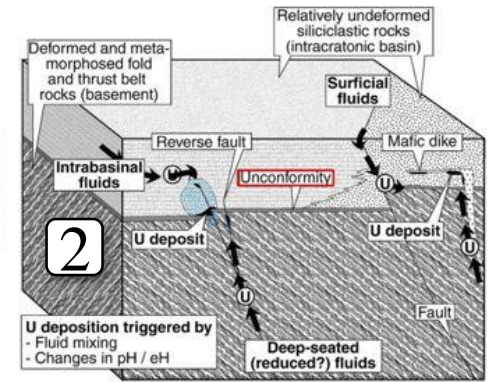
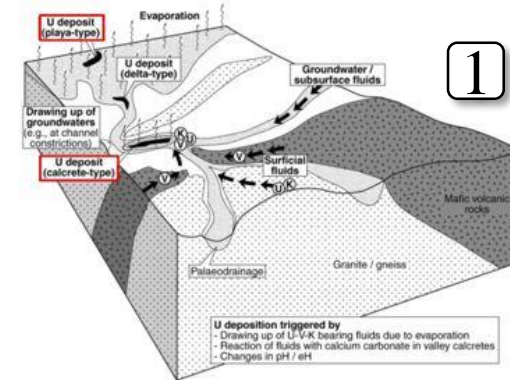


Переход от «классической» описательной структурно-формационной классификации МАГАТЭ к генетическим моделям месторождений, основанным на минерально-системном подходе (1)

Geological Classification of Uranium Deposits and Description of Selected Examples (IAEA, 2018):
15 типов, 37 подтипов и 14 классов м-ний



A – поверхностные и приповерхностные флюиды
B – внутри- и небассейновые флюиды
B – магматические/метаморфические флюиды



(Kreuzer et al., 2010)

Переход от «классической» описательной структурно-формационной классификации МАГАТЭ к генетическим моделям месторождений, основанным на минерально-системном подходе (2)

Descriptive Uranium Deposit and Mineral System Models (IAEA, 2020)



Соотношение трех основных U минеральных систем (Осадочные - Приповерхностные, Метаморфические и Магматические), **связанных с тремя типами рудоносных флюидов**. Между этими конечными элементами существует континуум месторождений, представленных гибридными стилями минерализации, например, месторождения Fe-оксидного-Cu-Au-U (ИОСГУ) типа (по Skirrow et al., 2009)

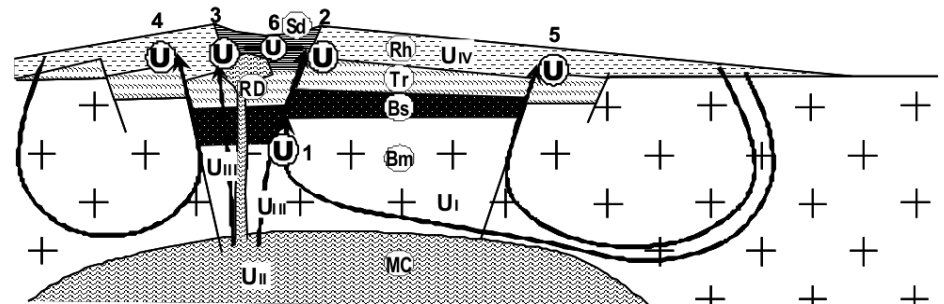
Генетические модели U рудообразования для СРП

1. Фильтрационная модель (ВИМС – Модников и др., 1984; Наумов, 1985): источник урана - герцинские граниты фундамента кальдеры, по которым просачивались восходящие потоки гидротермальных растворов в стадию прерудной гидрослюдизации, выщелачивали подвижный уран и переотлагали его в зоне рудоотложения согласно «уранил-карбонатной» модели.

2. Полигенная модель (Ищукова, 1998): является дополнением генетической модели группы ВИМСа глубинным мантийным источником урана при заимствовании части урана из герцинских гранитов фундамента кальдеры.

3. Магматогенно-гидротермальная (карбонатная) модель (ИГЕМ РАН – Вольфсон и др., 1984): основной источник - верхнекоровый очаг кислой магмы, специализированный на уран, а формы переноса и условия отложения урана определяются «уранил-карбонатной» физико-химической моделью.

4. Конвективная модель (Нанси – М. Кюне, Chabiron et al., 2003): основной источник урана ураноносные риолиты, завершающие разрез осадочно-вулканогенного чехла кальдеры. Процесс мобилизации урана из риолитов проходил с участием конвективных ячеек, образовавшихся над верхнекоровым очагом кислой магмы. В верхней части ячеек циркулирующие растворы выщелачивают уран из риолитов, затем опускаются по разломам на глубину нескольких километров, где нагреваются от магматического очага и поднимаются по другим разломам вверх, отлагая уран в рудных телах.



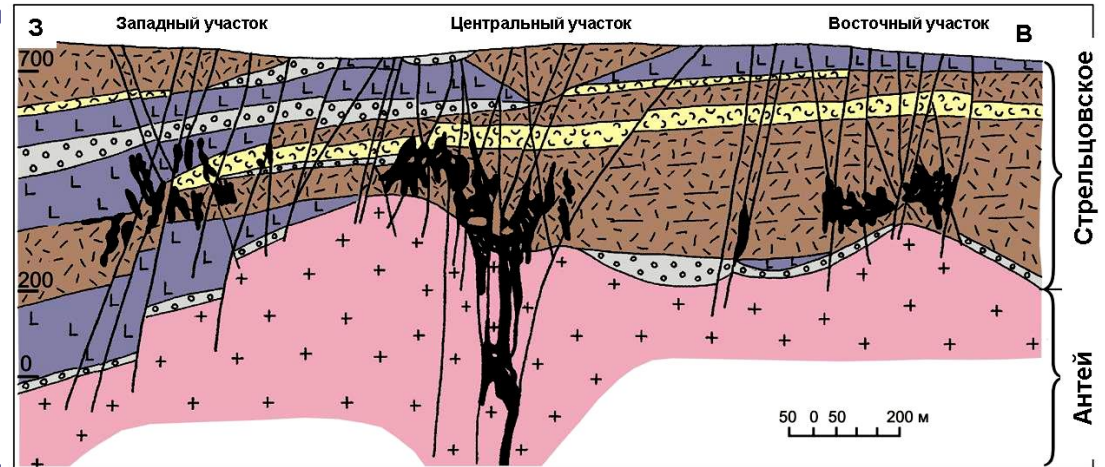
Conceptual model for volcanic-related U deposits
(after Cuney and Kyser, 2008)

5. Экзогенная модель (Яснош, 1999; Черников и др., 2009): главным источником урана - вмещающие оруденение осадочно-вулканогенные породы, из которых уран выщелачивался метеорными водами. Возможная роль гидротермальных процессов сводится к поставке в зону рудоотложения восстановителей (сульфидов – В.В. Яснош). Глубокозалегающие рудные тела в породах фундамента кальдеры объясняются глубоким проникновением вадозных вод по зонам разломов.

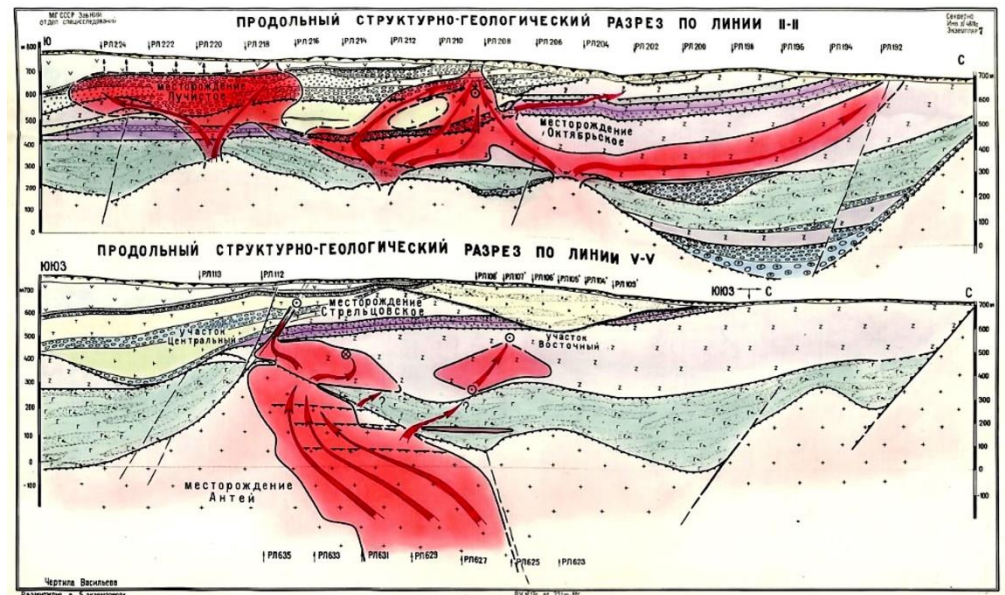
6. Магматогенно-гидротермальная (фторидная) модель (Алешин и др., 2007): предполагает источником урана кислую эволюционировавшую Li-F магму верхнекорового очага, от которой рудоносные флюиды отщеплялись и поднимались по разломам в герцинских гранитах фундамента, а уран переносился в виде фторидных комплексов U⁴⁺. Отложение урана в рудных телах происходило на температурном барьере при падении температуры ураноносных флюидов от 530 до 300 °С, без изменения валентного состояния урана

Концепция минеральных систем

Адаптация в 90-х годах прошлого столетия принятого в нефтяной геологии системного подхода (Magoon, Dow, 1994) к месторождениям ТПИ (Wyborn et al., 1994; Knox-Robinson, Wyborn, 1997)



Разрез восточной части кальдеры (Ищукова и др., 1998)



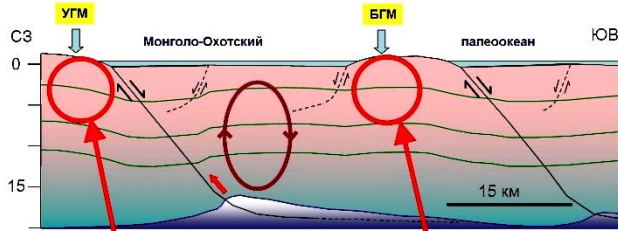
Тектонические и гидродинамические условия образования позднемезозойских урановых месторождений Забайкалья (Вишняков, 1986)

Минерально-системный подход, реализующий парадигму «источник → транспорт → отложение» применительно к урановым месторождениям в ВТС

Формирование минеральной системы месторождений СРП

Эпизод I: ~800 - 540 - 360 Ma

Ядро складки, AR-PR гранито-гнейсовый купол, локализация листрических разломов, ограничивающих протограбен, каледонские граниты (?)



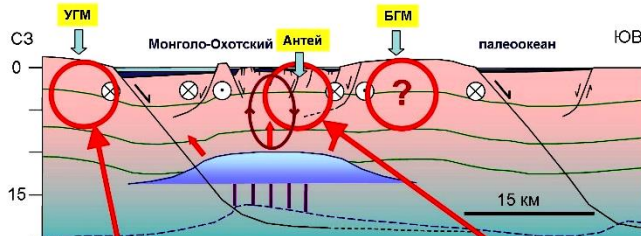
Циркон (U-Pb)	809±27 Ma
Уранинит (U-Pb)	806±19 Ma
Уранинит (U-Pb)	770±35 Ma
Мусковит (Rb-Sr)	585±1.6 Ma
	577.7±1.4 Ma
	521±2 Ma

Циркон (U-Pb) 745±33 Ma

Предельные температуры стабильности изотопных систем минералов:
уранинит 420°C, мусковит 340°C, биотит 270°C

Эпизод II: 360 - 160 Ma

Варисские граниты и развитие протограбена в режиме пулл-апарт в связи с T₃-J₂ (~ 225-160 Ma) региональной тектонической инверсии



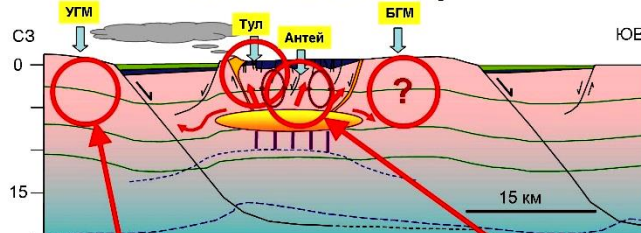
Биотит (Rb-Sr)	238±1 Ma
	237.2±0.6 Ma
	236.2±0.6 Ma
	233±7 Ma
	208±0.5 Ma

Циркон (U-Pb)	245.4±5.1 Ma
	244.1±2.2 Ma
Биотит (Rb-Sr)	233±1.5 Ma
	232.1±0.6 Ma

«Перезапуск» Rb-Sr системы биотита более позднего термовоздействия на граниты > 300°C мала
U-Pb и Rb-Sr возраста близки. Вероятность из-за формирования гранитов Антея?

Эпизод III: 160 - 135 - 100 Ma

Завершение формирования грабена в режиме пулл-апарт, вулканизм (начало в J₂₋₃) формирование кальдеры (J₂-K₁), формирование фланговых компенсационных впадин (K₁)

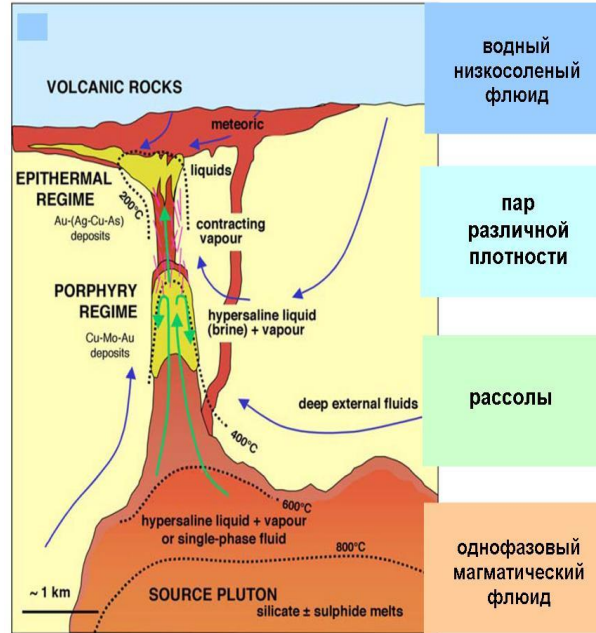


Трансформация уранинита
195±79 Ma

U р/образование 133-135 Ma
Кв-Карб-Гсл до Кв-Фл-Кальц
300-130°C
U-рудн. стадия 215-190°C

В связи с варисскими гранитами или позже?

- Отличительная особенность палеогидродинамики термоартезианских систем ВТС (депрессий) - слабая проявленность внешнего по отношению к системе источника флюидов
- Мобилизация, перенос и отложение рудных компонентов осуществляются изначально присутствовавшими в системе флюидами, термоконвективная циркуляция которых инициируется тепловой энергией субвулканического магматического очага



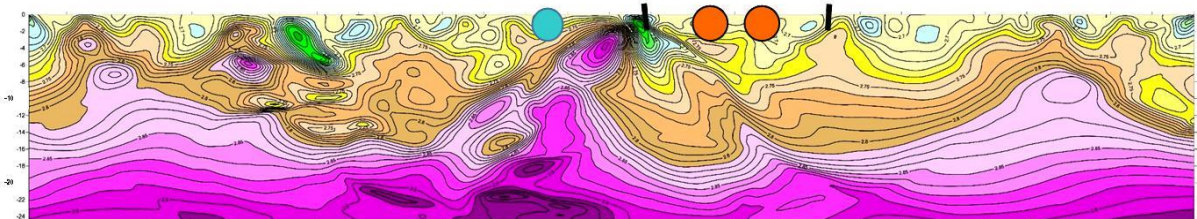
Модель гидротермально-магматических систем (по Heinrich, 2005)

Долговременная циркуляция флюидов:

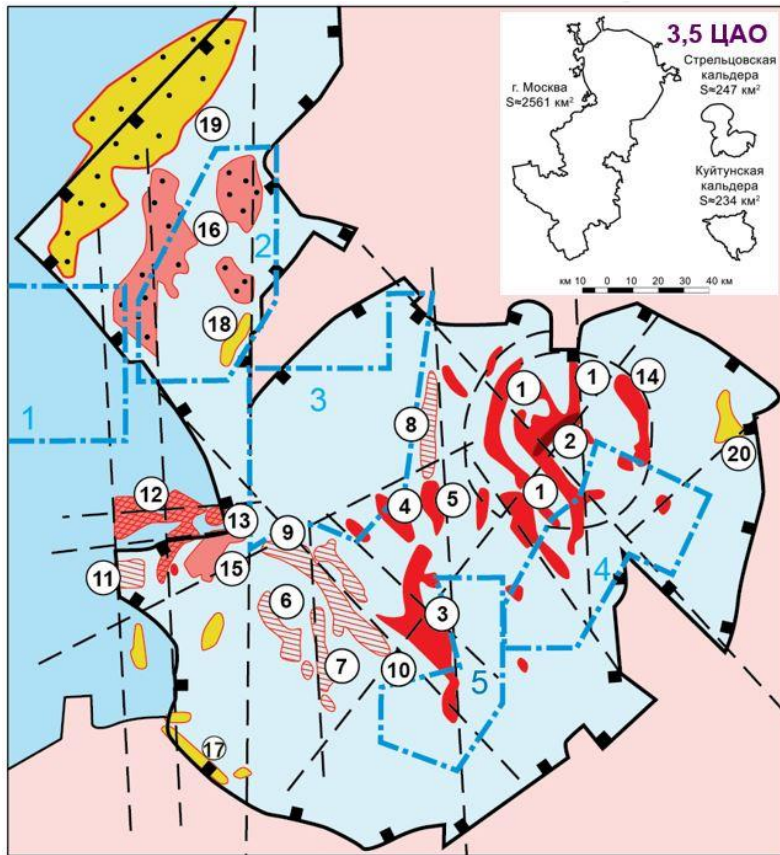
- Хронология ?
- Глубина (P-T условия) ?
- Эволюция ТПН ?
- Пути миграции ?
- Механизмы транспорта ?
- Структурные ловушки ?

Результаты интерпретации разрезов и карт распределения плотностных масс, КОСКАД-3D (данные ФГУП «ВИМС»)

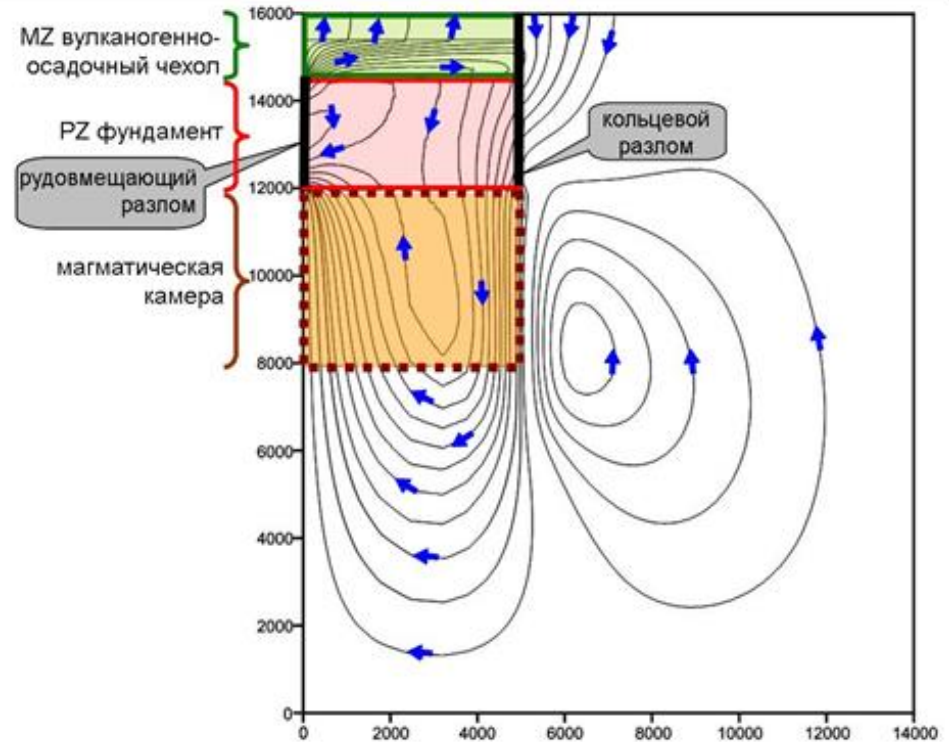
Соктуй Милозан (Ва) Стрельцовское РП (U)



Тепловая конвекция флюидов – механизм формирования уникальных U месторождений СРП



Конфигурация флюидопотоков как функция проницаемости структурных элементов (20 000 лет после начала термоконвективной циркуляции флюидов)



► На примере Антей-Стрельцовской рудообразующей системы выполнены расчеты для **Вынужденно-Конвективной Модели** с глубинным магматическим источником урана и **Свободно-Конвективной Модели** с коровыми источниками урана (Пэк и др., 2018, 2020).

► Верифицированная числовыми моделями гипотеза термоконвективной циркуляции флюидов в остаточном тепловом поле магматического очага кальдеры объясняет **поступление урана из трех источников его ближней мобилизации**: 1) подкальдерного очага, 2) пород фундамента и 3) вулканических пород выполнения кальдеры.

► Соучастие в рудогенезе трех высокопродуктивных источников урана является редким случаем и проливает свет на происхождение уникальных по запасам руд СРП в отличие от таких вулканогенных месторождений, как Сианшань в Китае и МакДермитт в США.

Таблица 1. Схема последовательности магматических циклов в пределах Юго-Восточного Забайкалья

Млн лет	Тектоно-магматический цикл	Главные магматические комплексы и эффузивно-субвулканические серии	Изотопный возраст*
100	Ранне- и позднемеловой, завершающий	Субщелочные базальты и андезибазальты, трахиандезиты, туфы	130–94 млн лет
	Раннемеловой-позднеюрский	Субщелочные риолиты, трахириолиты, перлиты, трахириодациты тургинской серии, гипабиссальные экструзии сиенит-порфиров и кварцевых монцонитов	150–141 млн лет
		Кукульбейский гранит-лейкогранитный комплекс: биотитовые граниты, лейкограниты, амазонитовые Li–F-граниты	141–128 млн лет
		Шахтаминский, амуджиканский и сретенский субщелочные гранитоидные комплексы: гранодиориты, субщелочные граниты, монцониты, диориты	173–150 млн лет
	Средне- и позднеюрский	Приаргунская и шадоронская серии субщелочных базальтов, трахиандеибазальтов, трахидацитов, лацитов, трахидиоритов	164–153 млн лет
220	Позднетриасовый	Каменская свита: толеитовые базальты, андезибазальты, риодациты (развиты только в крайней западной части территории)	212 млн лет
	370	Ундинский интрузивный комплекс: амфибол-биотитовые граниты, гранодиориты, кварцевые диориты, габбро-диориты, лейкократовые граниты	275–239 млн лет
590		Континентальный раннепермский вулканический комплекс развит только на сопредельной территории Восточной Монголии	
	590	Газимурский и борщевочный комплексы: гранито-гнейсы, плагиограниты, диориты, бластопорфировидные гнейсо-граниты	646–457 млн лет
590		Заурулюгуевский массив (комплекс), включая Уртугуйский и Бамбакайский массивы: гранито-гнейсы, порфиробластовые гранитоиды, амфиболлизированные габброиды	1111–784 млн лет

Мезозойский

Герцинский

Каледонский

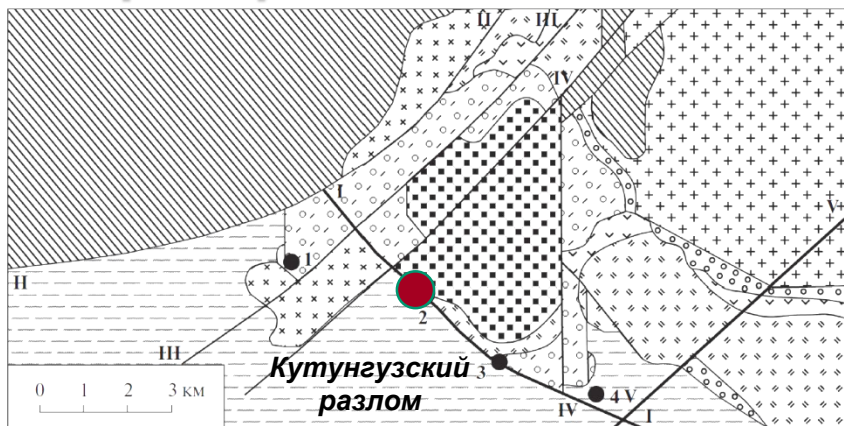
Протерозой-рифей

~45 млн лет

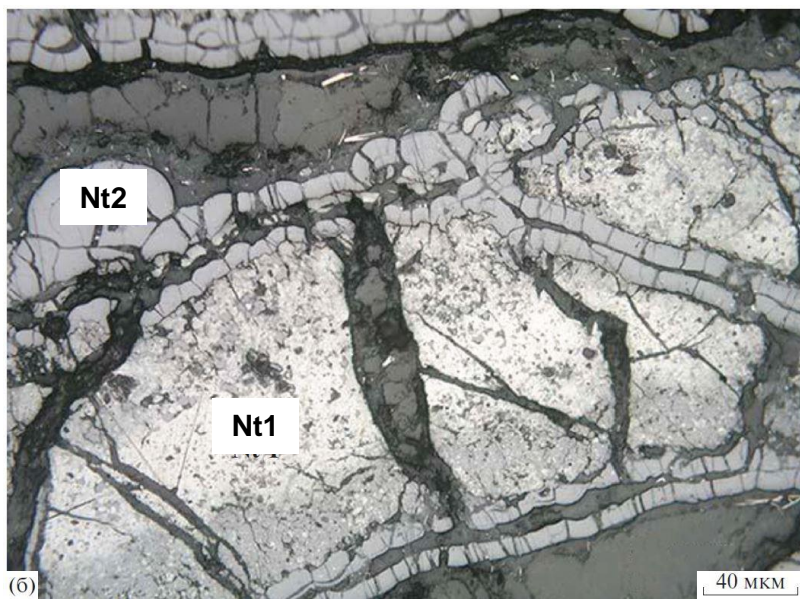
(Андреева и др., 2020)

* Сведения об изотопных возрастах приведены по собственным данным и из архивов лаборатории геохронологии и изотопной геохимии ИГЕМ РАН, а также из публикаций: Андреева и др., 1996; Андреева, Головин, 2001; Рублев, Буева, 1998; Голубев и др., 2010, 2011; Ищукова и др., 2007; Абушкевич, Сырицо, 2007; Сырицо и др. 2012; Берзина и др., 2013; Чернышев и др., 2014; Ступак и др., 2018.

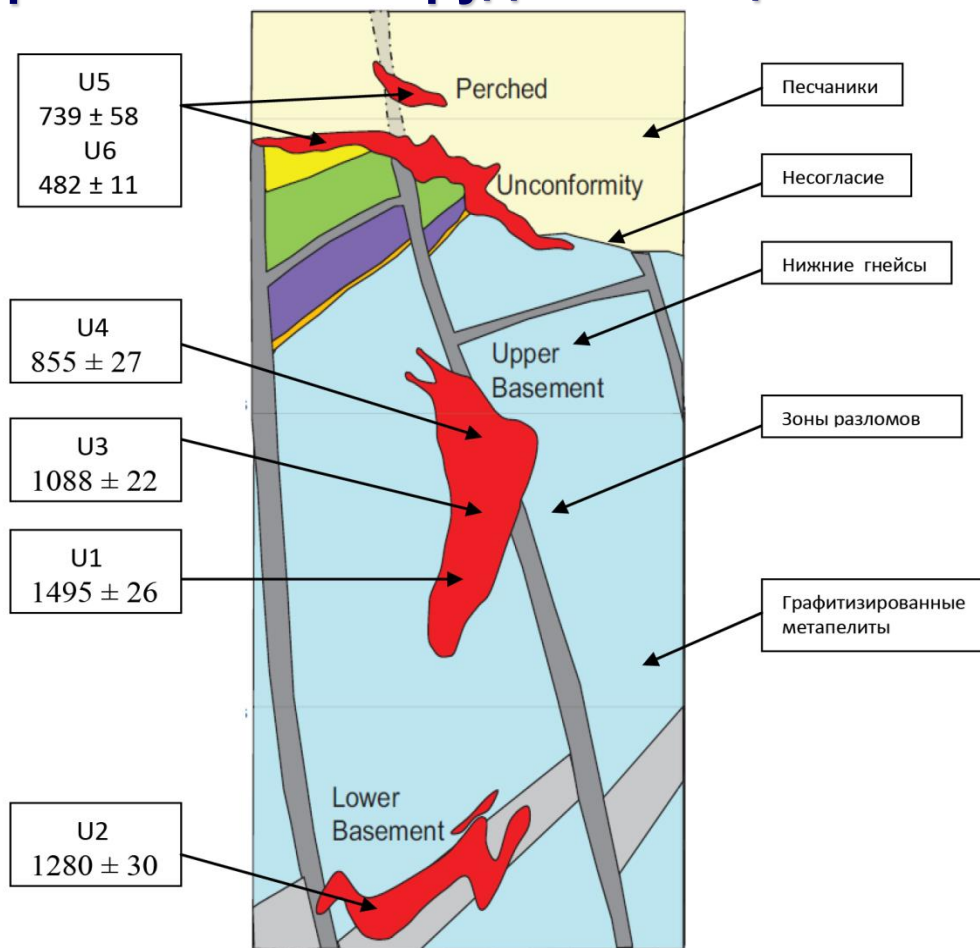
Примеры отложения и/или переотложения U-рудного вещества



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



(6)



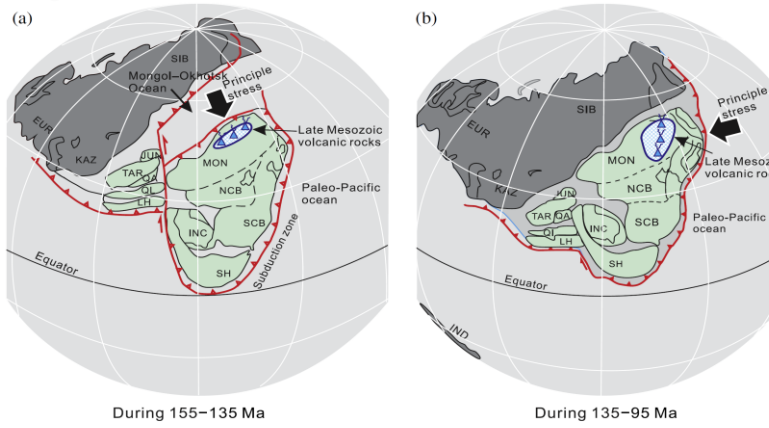
Месторождение Кианна, Shea Creek Project, Athabasca Basin, Canada (по Sheehan et al., 2016)

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

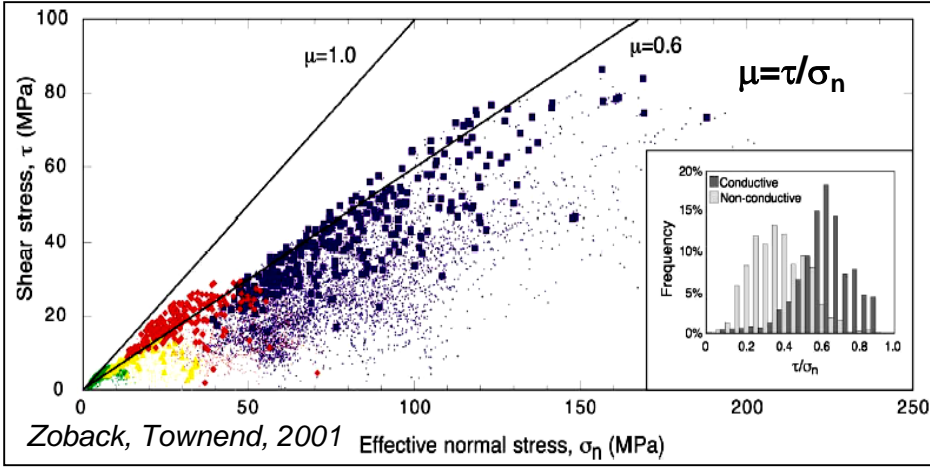
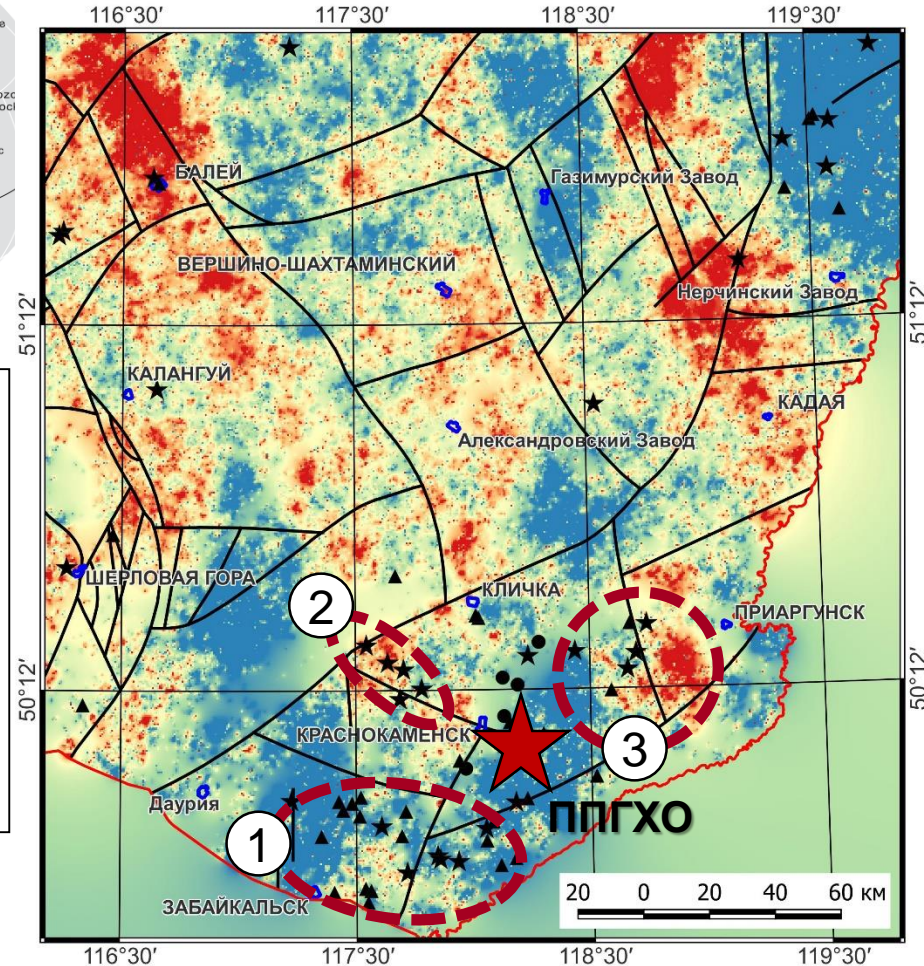
от Nt1 (413±7 Ma) до Nt2 (267±7 Ma) $\Delta \sim 146$ Ma

Минерально-системный подход на основе ГИС моделирования

Палео-реконструкция MZ тектонических событий (Yang et al., 2015)



Проект металлогенического районирования



Выявление рудовмещающих комплексов и рудоносных структур:

- Кинематический анализ линеаментов в поле напряжений-деформаций периода ТМА
- Мультиспектральные характеристики рудосопровождающих метасоматитов
- Нейросетевые технологии анализа факторов рудогенеза

Условные обозначения

- Граница Российской Федерации
- Месторождения и рудопроявления урана
- Тектонические нарушения в фундаменте

Тенденция к сдвигу (μ)

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

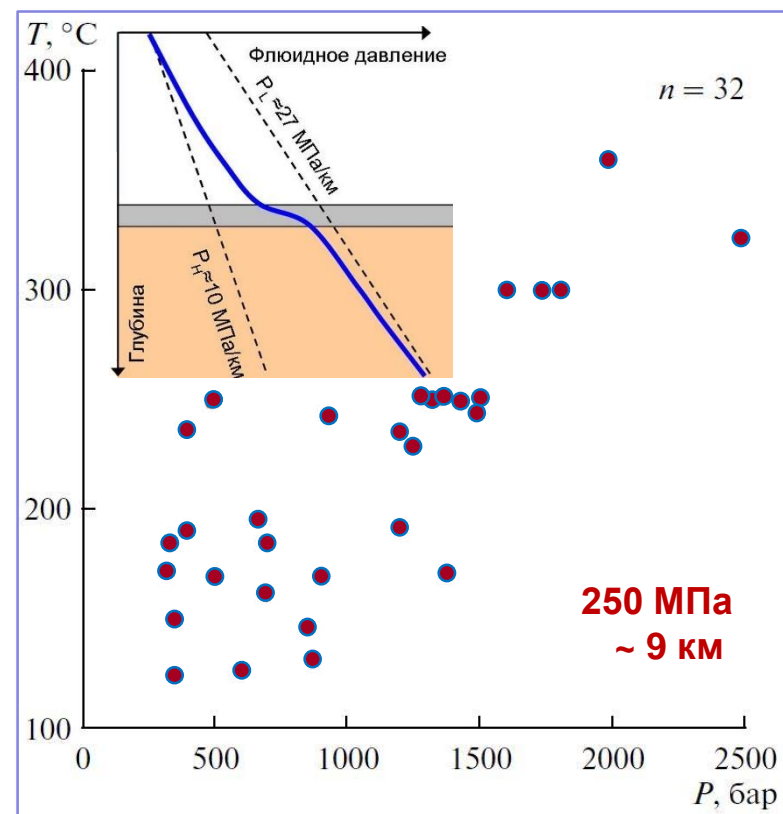
1 – Шамянская впадина, 2 – Родниковая зона, 3 – Куйтунская ВТС

Проблемы оценки глубины формирования гидротермальных месторождений по данным о давлении минералообразующих флюидов

Для ориентировочной оценки глубины формирования гидротермальных месторождений используются данные об интервале изменения давления в ФВ от их максимальных P_{\max} до минимальных P_{\min} значений с учетом ограничений на физически предельные значения этого интервала, которые определяются величинами литостатического и гидростатического давления флюидов (Прокофьев В.Ю., Пэк А.А., 2015).

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
Джеонгю-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

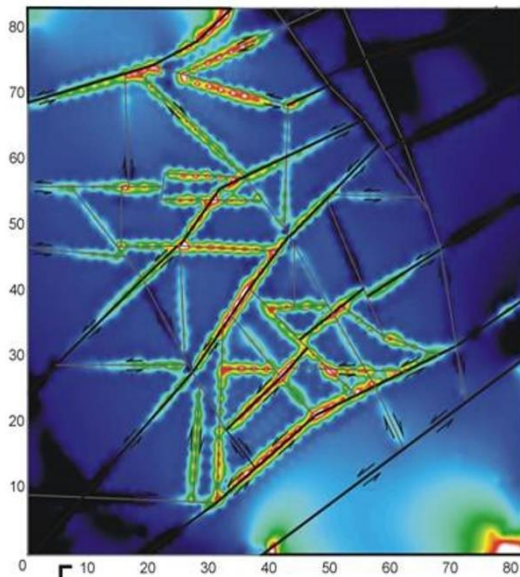
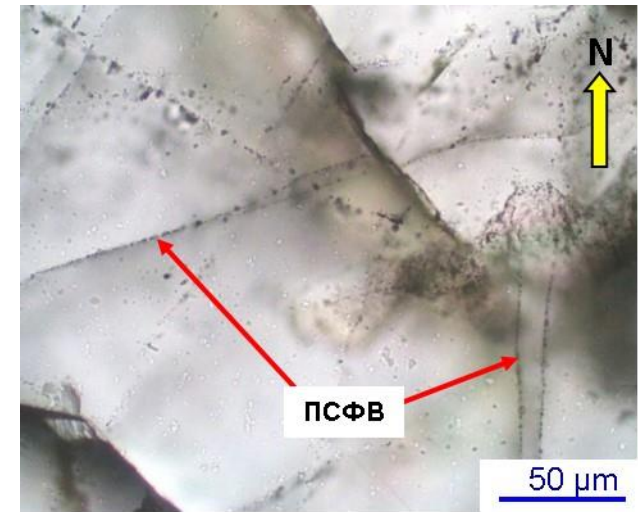
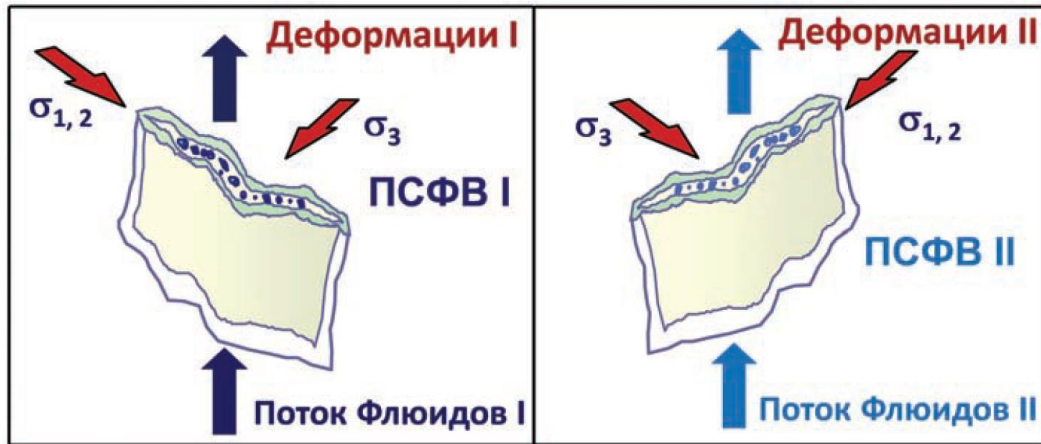
*Метод оценки давления: 1 – пересечение изохоры и изотермы для гетерогенного флюида; 2 – по насыщенным хлоридным рассолам.



Температуры и давления, определенные по ФВ в минералах урановых месторождений (Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Миронова О.Ф., 2015)

**НЕОБХОДИМЫ
СТРУКТУРНЫЕ МАРКЕРЫ !**

Реконструкция флюидодинамических режимов и глубины рудообразования по ПСФВ



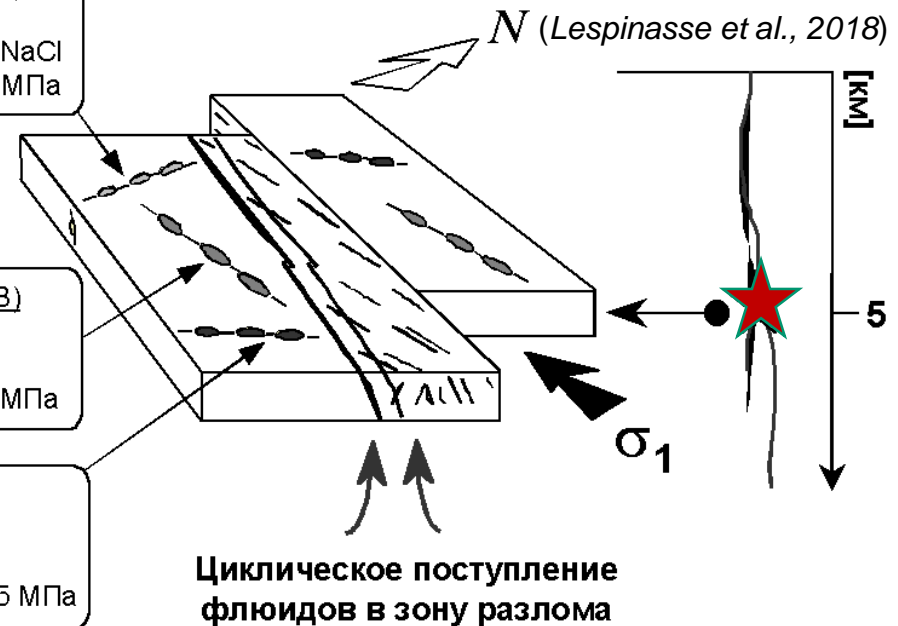
Интенсивность скалывающих напряжений (МПа) в обстановке несоосного сжатия. 2D тектонофизическая модель на ГИС основе (Petrov et al., 2021)

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

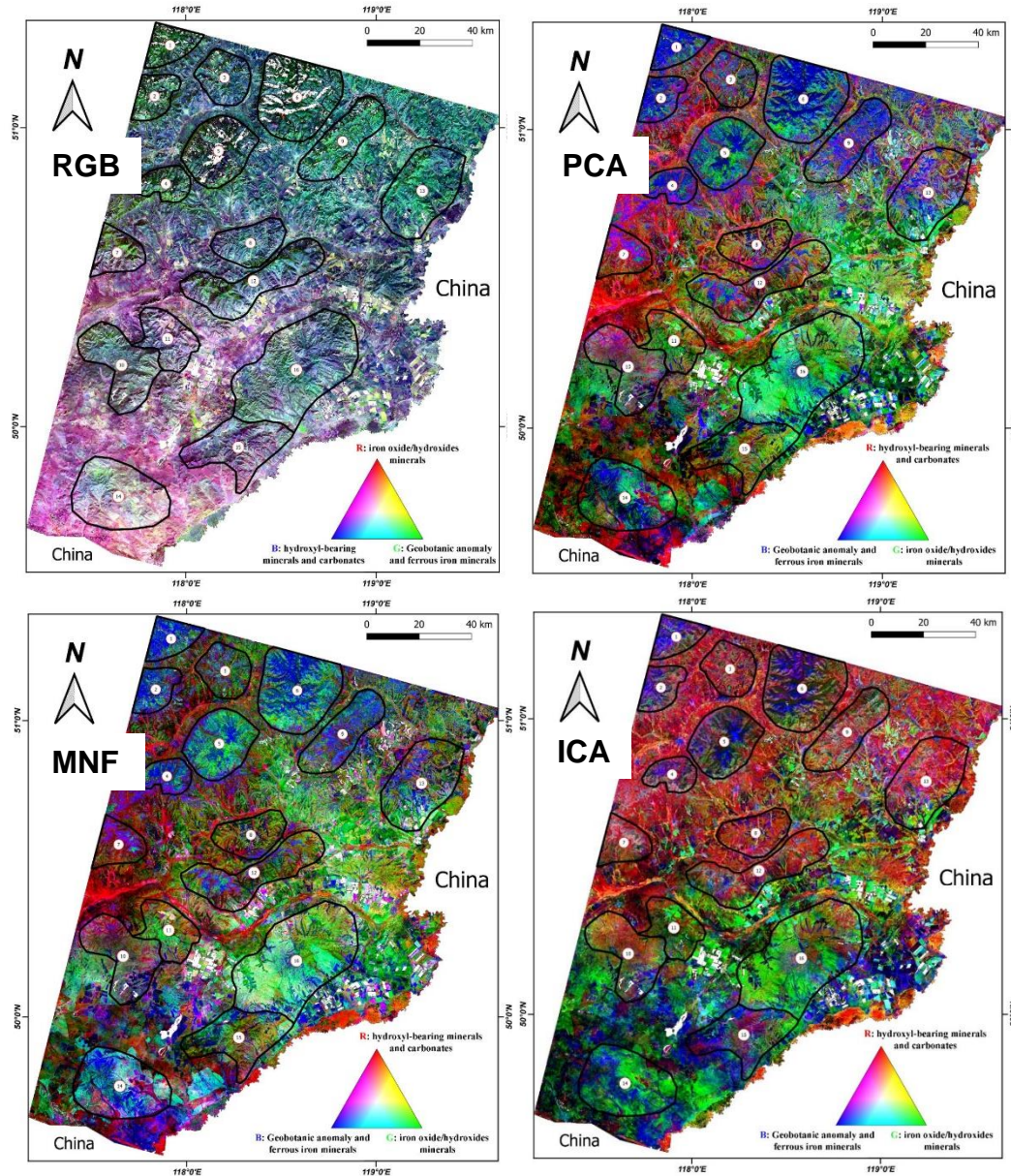
2 система ПГЖВ (СЗ-ЮВ)
 T = 270 - 320°C
 Соленость низкая
 Флюидное давление 45 МПа

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

Зона разлома СЗ простираения



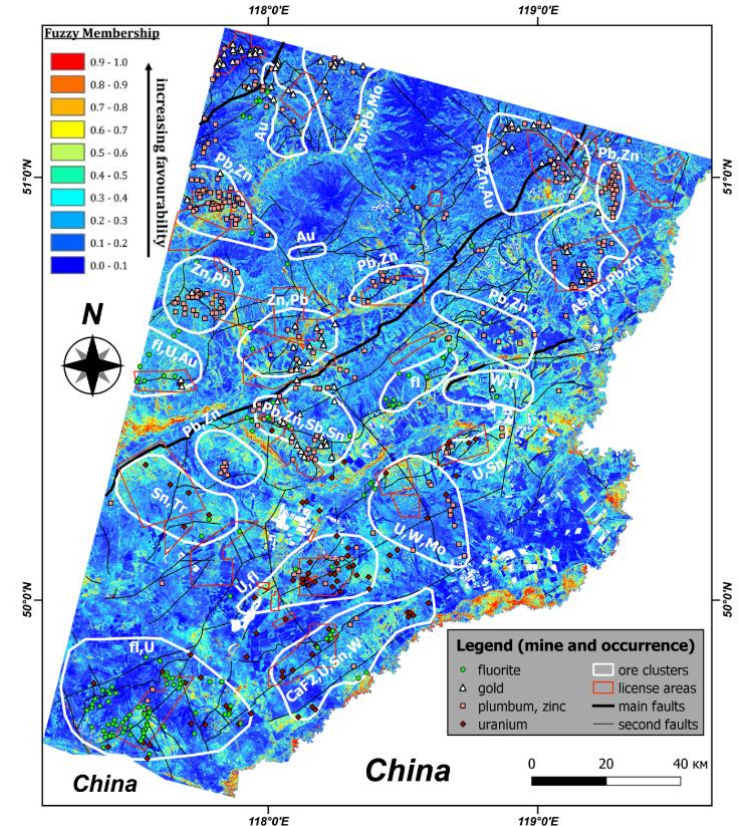
Оценка рудного потенциала территорий по данным ДЗЗ и ГИС



Алгоритм оценки территорий для геолого-минералогического картирования на основе статистических методов обработки данных дистанционного зондирования КА Landsat-8

Основные методы:

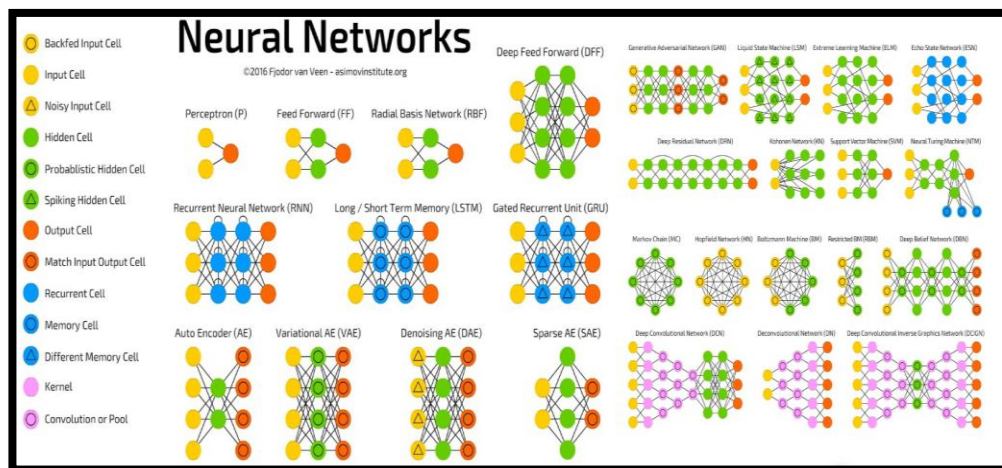
- ▶ анализа главных компонент (PCA)
- ▶ минимальной доли шума (MNF)
- ▶ независимый компонентный анализ (ICA).



Landsat-8 composites (Nafigin et al., 2022)

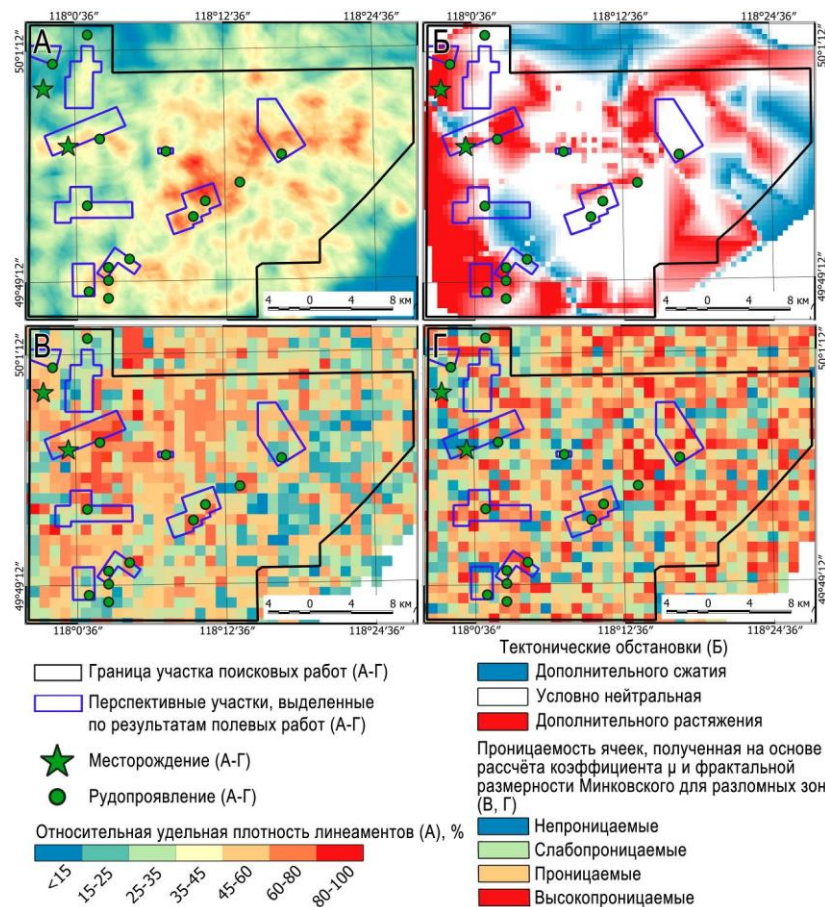
Схема распределения кластеров, перспективных на рудную минерализацию (Au, U, Mo, Pb-Zn, Sn, W, Ta, Nb, Li, флюорит)

ГИС- и нейросетевые технологии для прогноза рудного потенциала



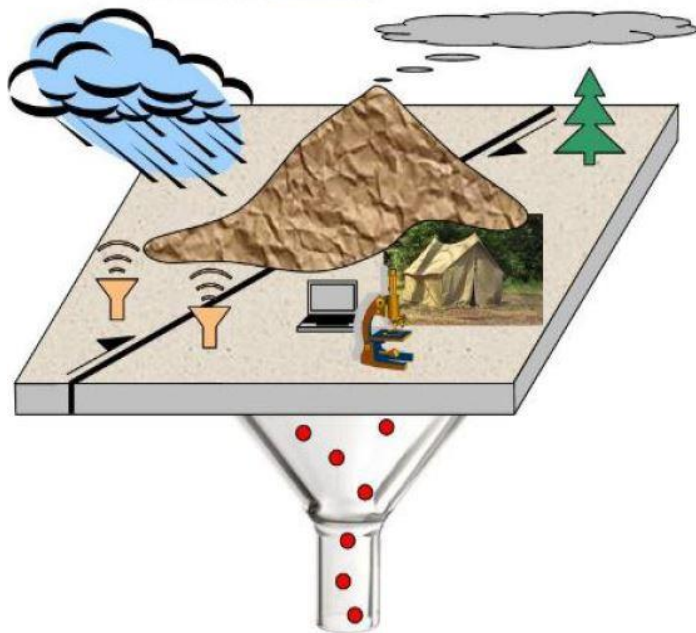
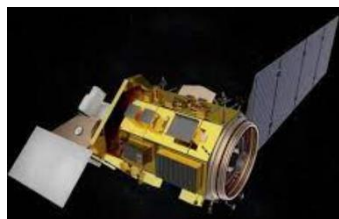
Разнообразие структур нейросетевых моделей

- Нейросети используются для решения различных задач (распознавание лиц, номеров машин, текста) и для каждой разработаны свои модели структур.
- Перспективы использования нейросетевых технологий для прогнозирования рудного потенциала территорий несомненны, особенно в части анализа набора пространственно-временных предпосылок и признаков.



Пример использования ГИС- и нейросетевых технологий для выявления структурно-геологических и тектонических факторов рудогенеза: **А** – плотность линейментов; **Б** – тектоническая обстановка; **В** – распределение проницаемых ячеек (размер 1x1 км) на основе расчёта тенденции к сдвигу разломных зон; **Г** – распределение проницаемых ячеек на основе расчёта фрактальной размерности Минковского.

Роль академической науки в формировании теоретических основ уранового рудообразования



I эшелон: РС МКС, LANDSAT-8 и др.

II эшелон: БПЛА

III эшелон: геология, минералогия, геохимия, петрология, поверхностная геофизика

IV эшелон: глубинная геофизика

С помощью новейших технических средств, методов и технологических решений создавать модели минералообразующих систем урановых месторождений для выделения и обоснования поисковых площадей в рамках актуальных прогнозно-минерагенических исследований

Эшелонированный комплекс наземно-космических средств прогноза рудного потенциала перспективных площадей