



МИГРАЦИЯ УРАНА В РАЗЛИЧНЫХ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВУЛКАНОГЕННОГО ТИПА

ПОЛУЭКТОВ В.В., ПЕТРОВ В.А.

*Стрельцовская кальдера (Мо-U) занимает особое место в структуре
Монголо-Приаргунского вулканического пояса*

- Уникальность запасов U-Мо м-й, локализованных в кальдере;*
- Типовой разрез для Ю. Приаргунья и В. Монголии (Дорнодская ВТС);*
- Детальная изученность м-й кальдеры и структур ее обрамления;*

*Уникальный пример изучения механизмов миграции и накопления U:
Масштабный Тулкуевский карьер, м-е Новогоднее (чехол)
и наиболее глубоководные крупные м-я Антей и Аргунское (фундамент).*

*Соглашения (2000г) между Российской академией наук (ИГЕМ РАН) и Министерством
энергетики США (Лос-Аламосская нац. Лаб.) по проекту «Явления массопереноса урана в
трещиноватых спекшихся туфах». Изучение фильтрационно-транспортных процессов в
зоне аэрации природного аналога (ТОР), в связи обоснованием безопасности хранилища РАО
Юкка Маунтин (Невада, США).*

Минеральная зональность гидротермальных и гипергенных преобразований Тулукуевский карьер (блок 200x200x200, 7 уровней А-Г, сз борт; шт. +520 вдоль разлома 1А)

Эталонные м-я СРП

Вулкан-осадоч этаж

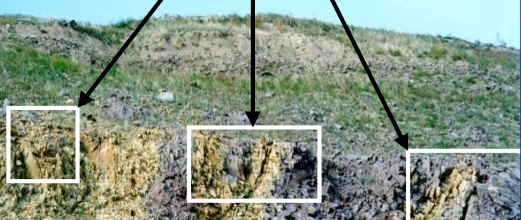
Тулукуй-8, Новогоднее-11

Гранитный фундамент

Антей-3, Аргунское-16

Участки документации

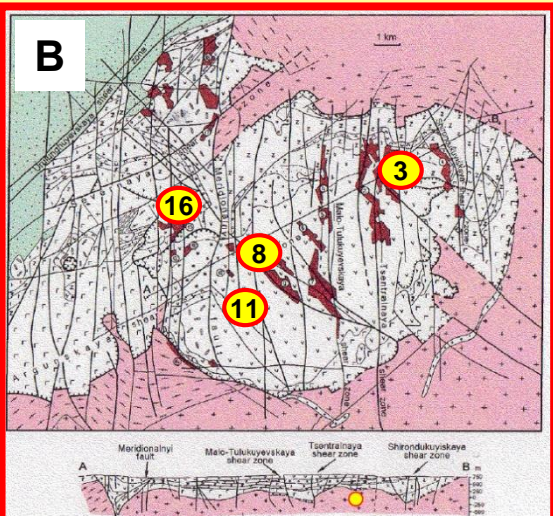
1 м



Тулукуй, уровень А

Геологическая карта СРП

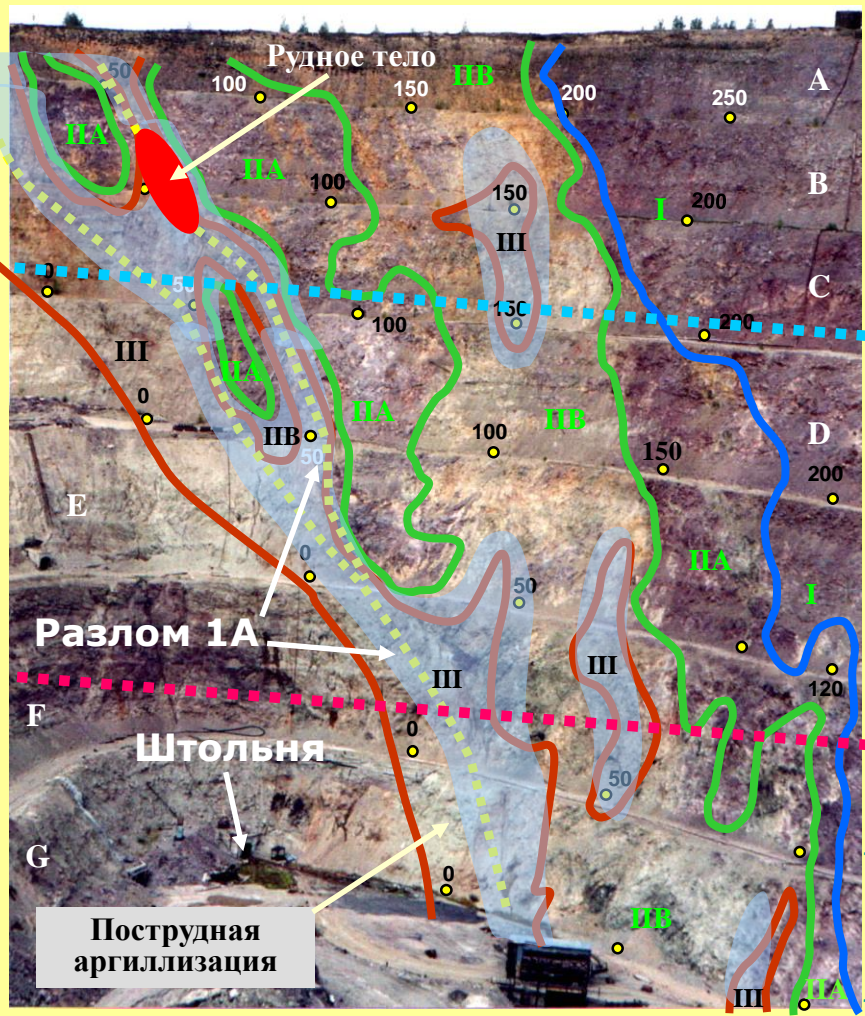
В



Субзона В

Субзона ПО

Субзона НПО



+ 710 m
690
660
630
600
570
540
520

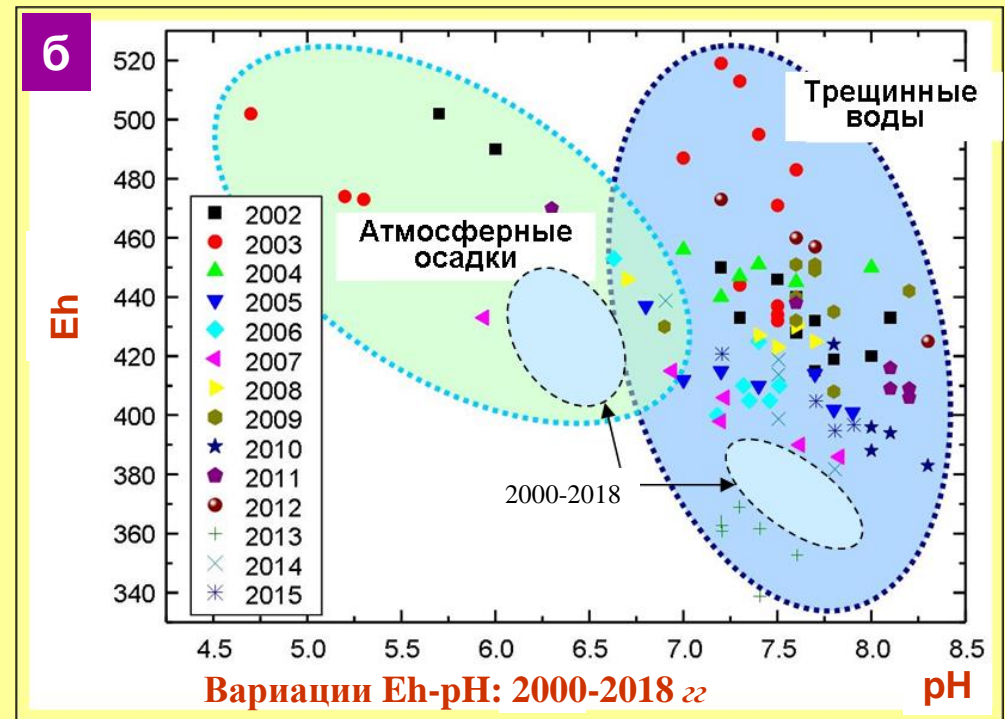
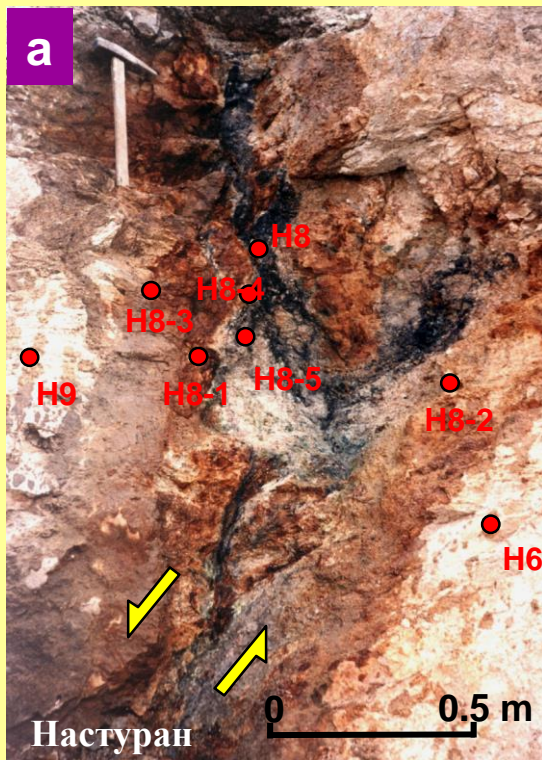
Горизонт вторичного обогачения в зоне древнего окисления

Зона современного обогачения

Зоны прерудных метасоматитов

- I - внешняя** (реликт: KFs, Olg, Q, Bt, Hem/н-обр: Ilt-Sm, Car)
- II (IIA, IIB) - промежуточная** (Q, KFs, Alb/Ilt-Sm, Car, Q, LA)
- III - внутренняя** (Q, KFs/Q, Ilt-Sm, Car, Hem, LA, Ber)

Локализация настурановых руд (а), гидрогеохимия трещинно-жильных вод источников и атмосферных осадков (б) в Тулукуевском карьере за период 2000-2018 гг.



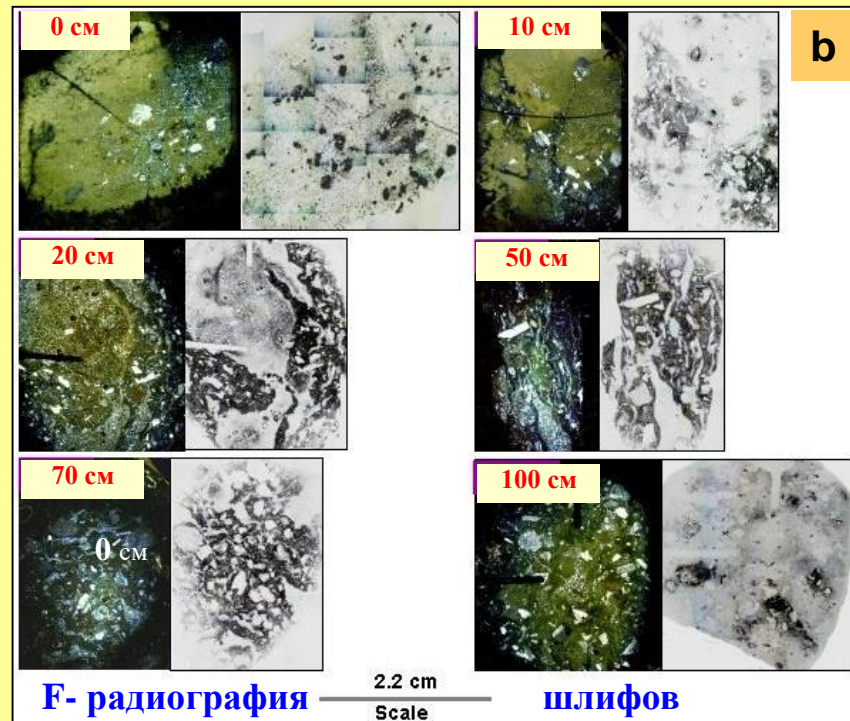
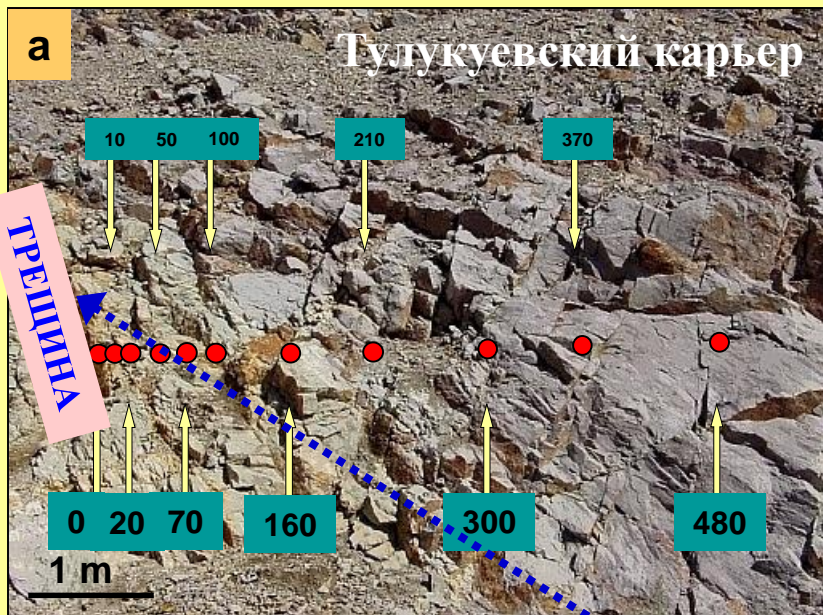
Преобразование U руд – уникальный пример изучения поведения U в окисл. обстановке зоны аэрации. С момента образования (135млн. лет) до вскрытия ТОР, процессы окисления происходили в условиях насыщенности поверхностными и подземными водами.

Последовательность формирования U минерализации
(Л.Н. Белова, О.А. Дойникова и П.М. Карташов)

Л.П. Ищукова: ТОР отличается так разнообразием гипергенных минералов в СРП

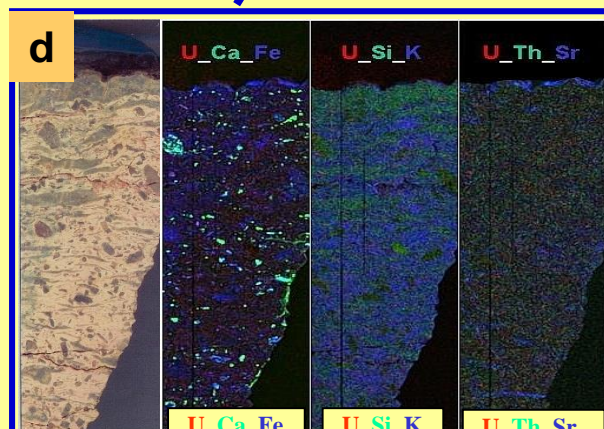
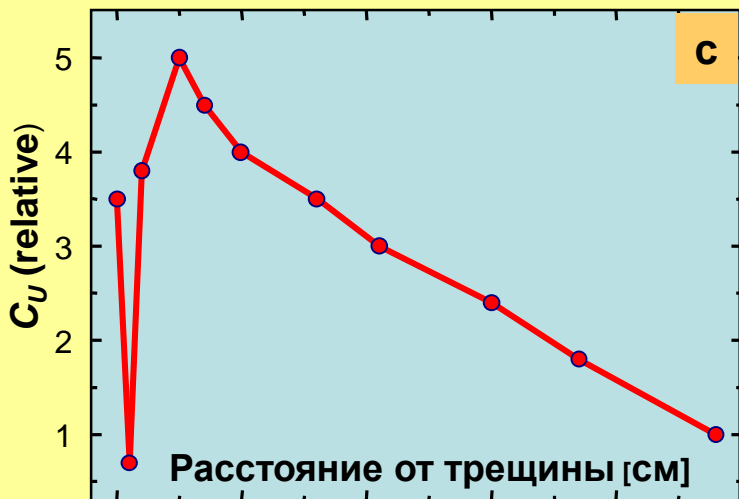
- 1. ПЕРВИЧНЫЕ руды: настуран, коффинит, тухолит.**
- 2. ДРЕВНЯЯ зоны окисления (до отработки ТОР). U минералы: гидронастуран, ургит (начало), уранофан (завершение). Формирование 3 подзон: НПО, ПО и В.**
- 3. ВТОРИЧНЫЕ руды (отработка ТОР, фронт современного окисления): уранофан, хейвеит, калькурмолит...**

Флюидопроводящая гидравлически активная трещина (а), характер распределения (b) и содержания U (с); данные F-радиографии



Препараты облучались в Атомном центре МИФИ тепловыми нейтронами с различной интенсивностью, в зависимости от содержания урана (F-радиография)

Распределение элементов (U,Th,Si,Ca,K,Fe,Sr) в системе гидравлически активная трещина-околотрещинное пространство» (d)



Метод GeoScan - энергодисперсионный (ЭД) РФА (А. Виттенберг, БГР, Ганновер, ФРГ)
 Сканирование по сети 50x50 мкм плоскостей ориентированных в пространстве штуфов (S=100см²).
 Подсчет импульсов на Si-Li детекторе и визуализация данных(d)

Тулукуевский карьер: трахиодацитовые игнимбриты - стекловатый matrix и фьямме

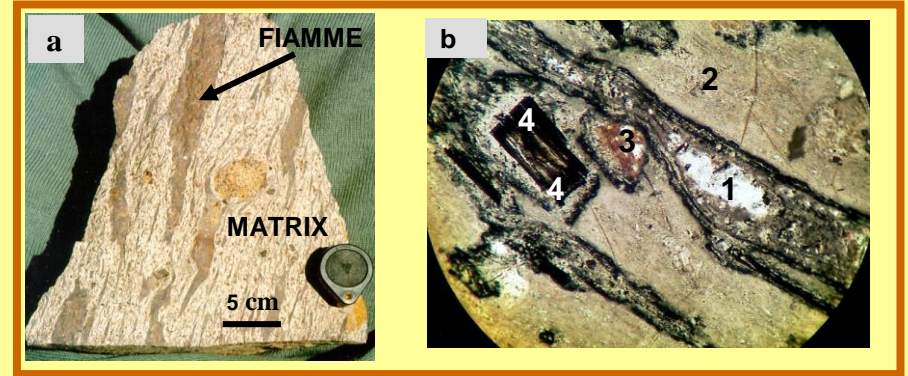
Механизмы миграции и сорбции U в
игнимбритах и вулканических стеклах
м-й Тулукуевское и Новогоднее.

Тулукуевский карьер:

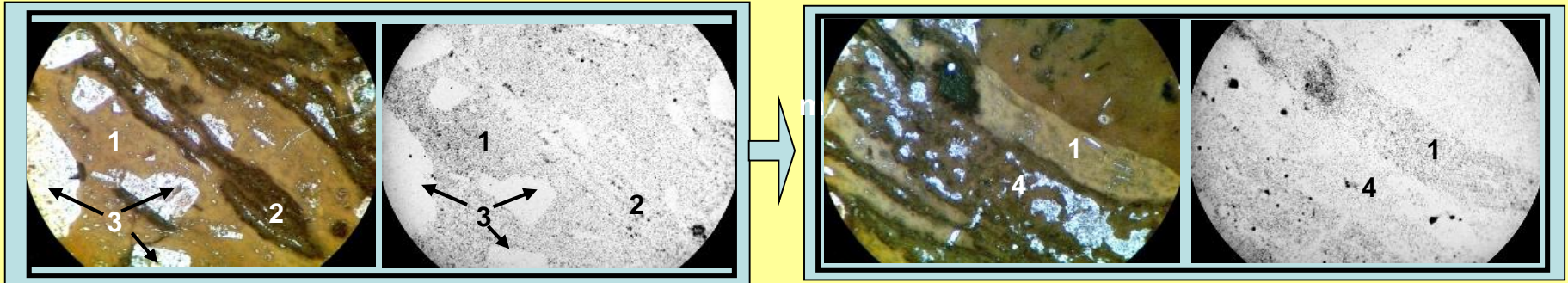
1. ФЬЯММЕ-МАТРИКС игнимбритов;
2. U-сод ВЬСОКО-Si СТЕКЛО;

Новогоднее м-е:

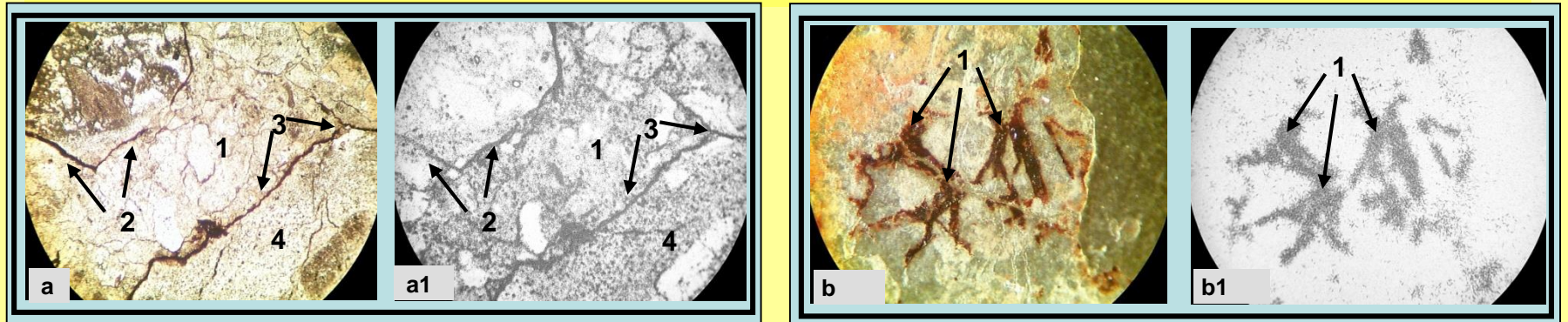
3. ОБСИДИАН-ПЕРЛИТЫ



Распределение U в свежих и измененных игнимбритах (внешняя зона)



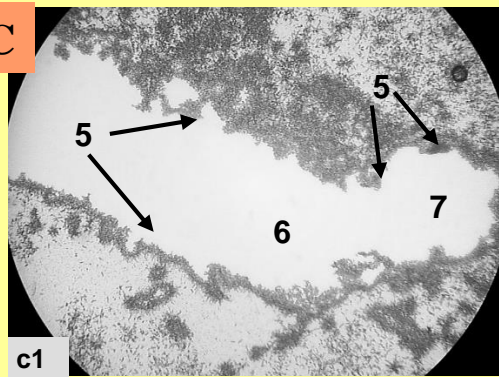
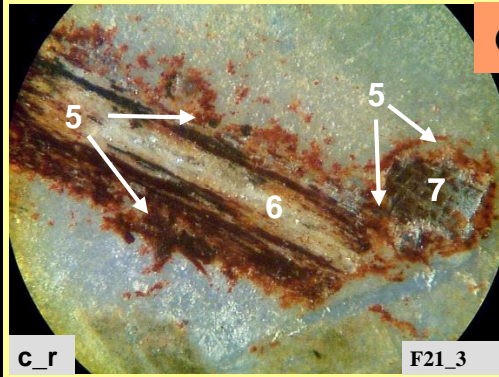
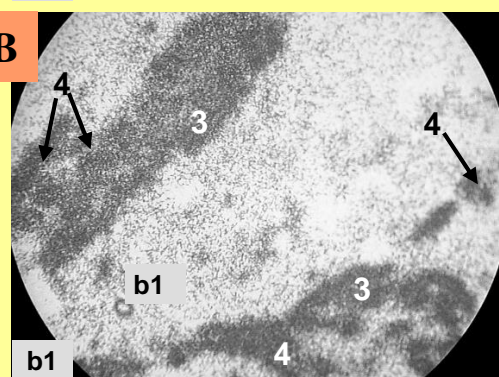
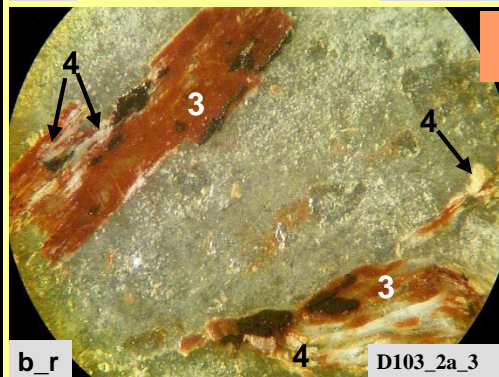
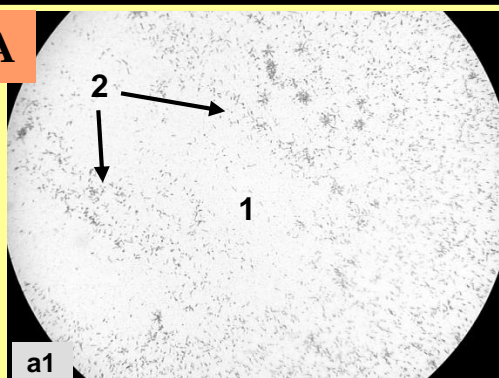
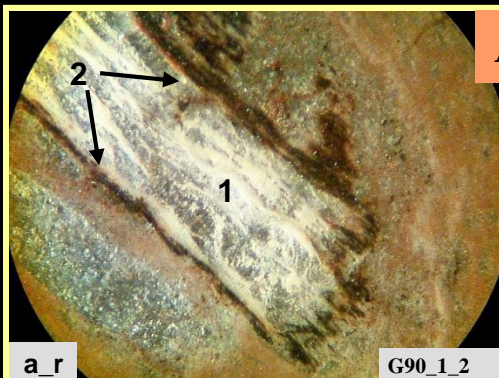
Распределение U в игнимбритах – метасоматоз, катаклиз, микробрекчирование, минерализованные трещины (промежуточная, внутренняя зоны)



Распределение U в измененных биотитах (акцес. минералах) из различных зон минеральной зональности Тулукуевского карьера-важный показатель при оценке его механизмов миграции и сорбции

Шлиф

F-радиография



А – ВНЕШНЯЯ ЗОНА.

В ОТНОСИТЕЛЬНО СВЕЖИХ ИГНИМБРИТАХ СОДЕРЖАНИЕ U В БИОТИТЕ: 6-9 ppm.

В – ПРОМЕЖУТОЧНАЯ / ВНУТРЕННЯЯ ЗОНЫ.

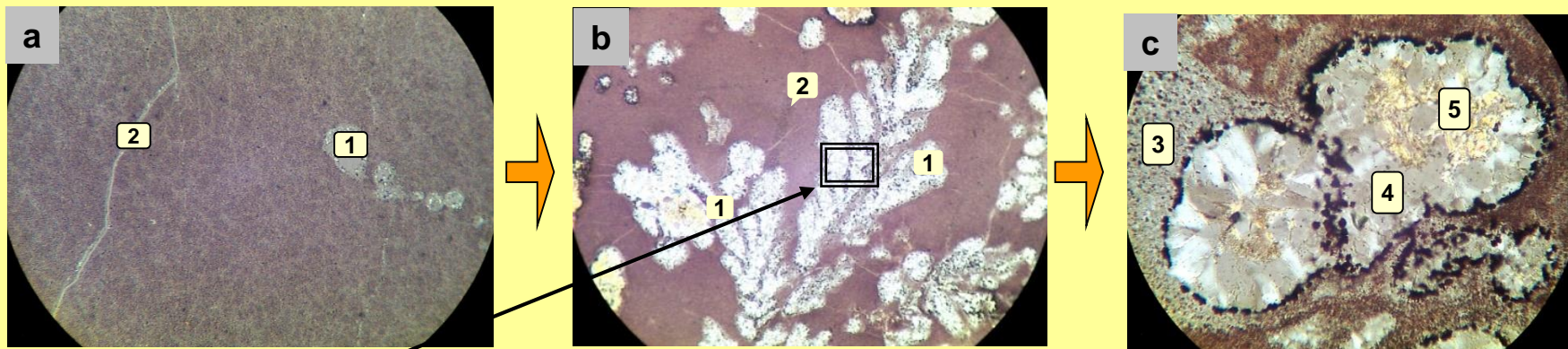
ПОЛНЫЕ ПСЕВДОМОРФОЗЫ ПО БИОТИТУ ГЕМАТИТА (3), LA (4) ОБОГАЩЕНЫ U ПО ВСЕЙ ПЛОЩАДИ ЗЕРЕН. СОДЕРЖАНИЕ U В ГЕМАТИТЕ – 669 ppm; В ЛЕЙКОКСЕНИЗИРОВАННОМ АКЦЕСОРНОМ МИНЕРАЛЕ - 970 ppm.

С – ВНУТРЕННЯЯ ЗОНА, ВБЛИЗИ РАЗЛОМА 1А.

ФИКСИРУЮТСЯ КРАЙНЕ ВЫСОКИЕ (СКВОЗНЫЕ ОТВЕРСТИЯ В ЛАВСАНЕ) СОДЕРЖАНИЯ U В ПСЕВДОМОРФОЗАХ ГЕМАТИТА И LA (5) ПО БИОТИТУ (6) И ТИТАНОМАГНЕТИТ-ИЛЬМЕНИТУ (7).

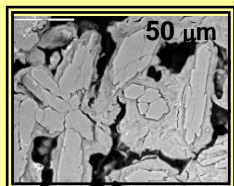
Микрофото шлифа; L, mm 2.78, николи =, «отраженный свет».

Девитрификация массивных высоко-Si вулканических стекол и апостекловатых пород (до 81-88% SiO₂), карьер Тулукуевский



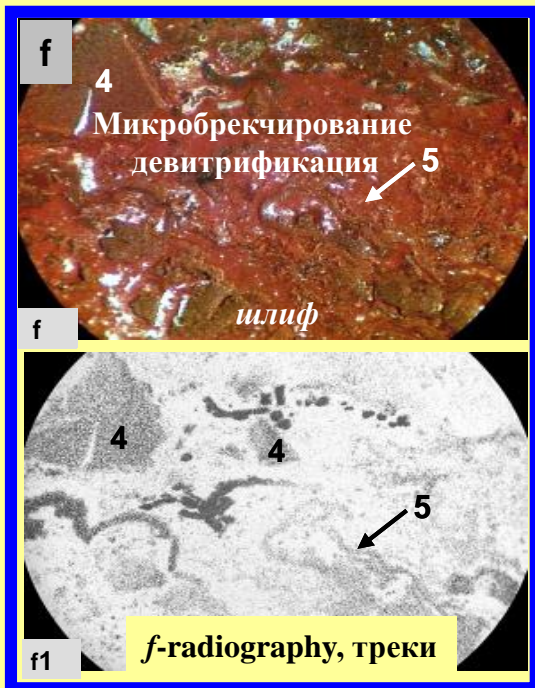
Девитрификация (a→b→c): образование кристаллитов, скопулитов, сферолитов Q-Mic-Fsp состава

Начальная стадия девитрификации с образованием сферолитов и микробрекчирование

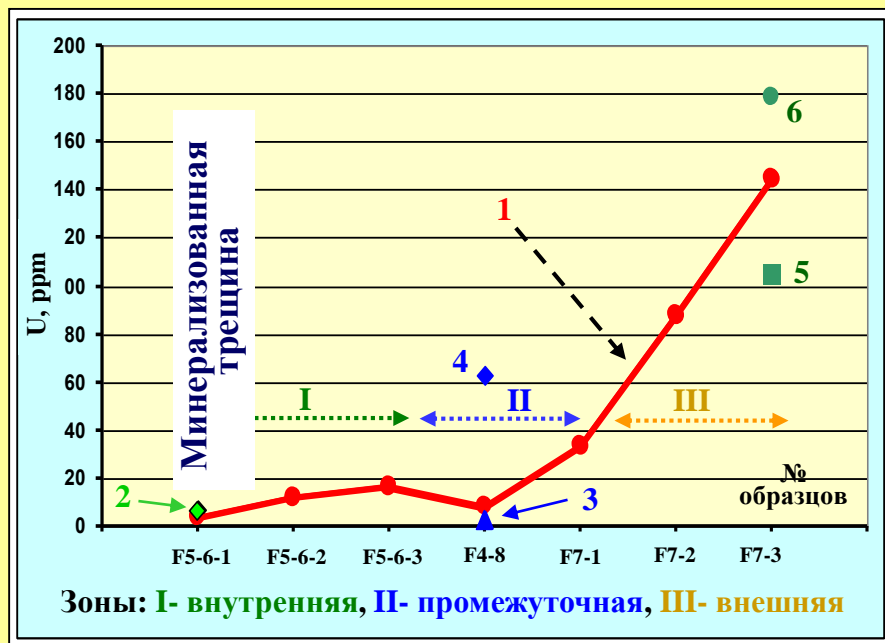


SEM image in backscattered electrons of the crystallites of scapolite type

Перераспределение U (III→II→I) в зональном «желваке» высоко-Si стекла в зоне влияния трещины (f-radiography)



Микрофото: L, мм: a=3.89, b-f =2.78, полускрещ. николи.



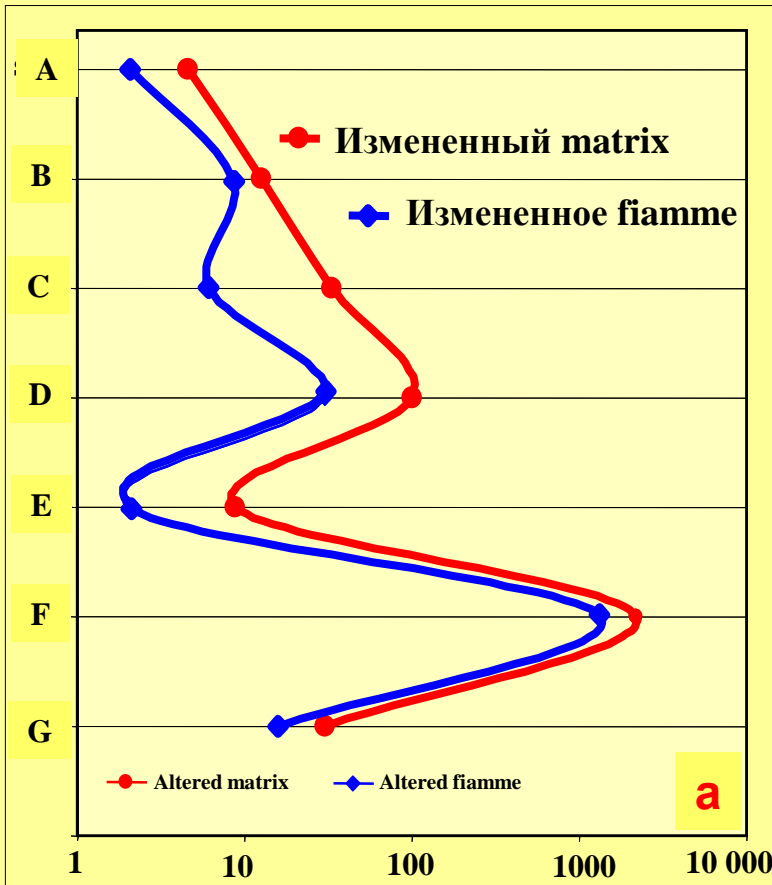
Зоны: I- внутренняя, II- промежуточная, III- внешняя

1-матрице стекла; 2-приконтактовая часть трещины; 3, 4-центр и периферия сферолита; 5trn, bтах -области локальной кристаллизации.



Распределение содержаний U во внутренней зоне III метасоматических ореолов, на разных уровнях (А–G) Тулукуевского карьера (*F-radiography*).

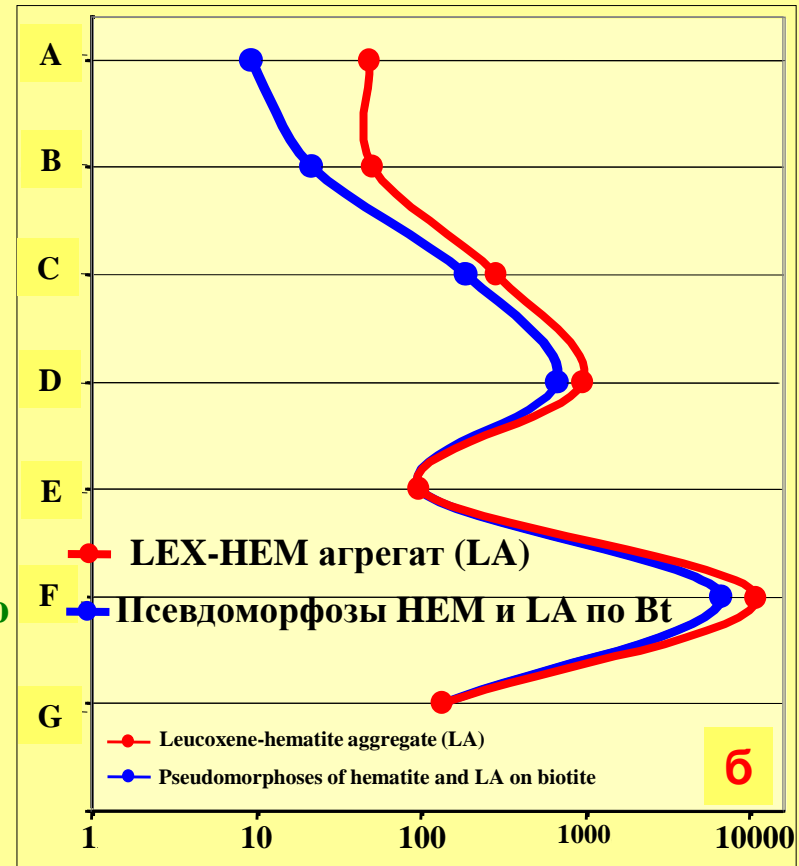
а- измененный matrix и fiamme игнимбритов;
б- Lex-Нем агрегате (ЛА); псевдоморфозы Нем и ЛА по биотиту.



Зона
вторичного
обогащения

Зона
современного
обогащения

U, ppm



Уровни Тулукуевского карьера (А-G)

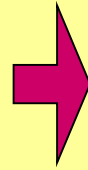
Распределение содержаний U (аналогичные кривые) также оценивались:

- 1- в различных зонах метасоматических ореолов;
- 2- в минералах, вкрапл-х и обломках пород;
- 3- в элементах деформационных преобразований (катаклиз, микропрожилки...);
- 4- в минерализов. и открытых трещинах различной морфологии, масштаба, апертуры, выполнения и протяженности.

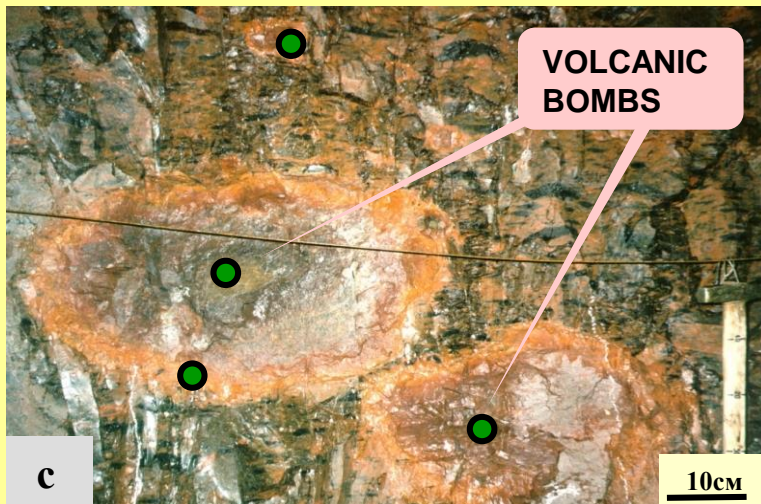
**Флюидалные и массивные обсидиан-перлиты м-я Новогоднее.
Единственная находка за десятилетия разведки и отработки СРП
(шахта, гор +600, гл 300м)**



Относительно «свежие» обсидиан-перлиты



Нижняя часть пластообразного тела обсидиан-перлитов

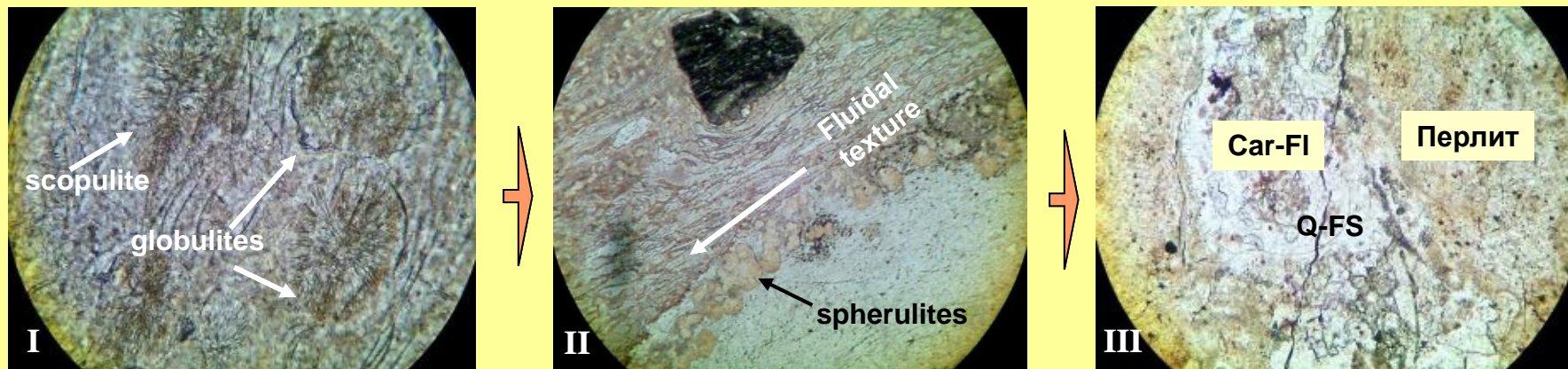


Вулканические бомбы: интенсивное развитие оксидов Fe в приконтактных частях

В пределах Новогоднего м-я предоставляется редкая возможность изучения обсидиан-перлитов кислого состава и сферолитовых риолитов максимальной степени сохранности.

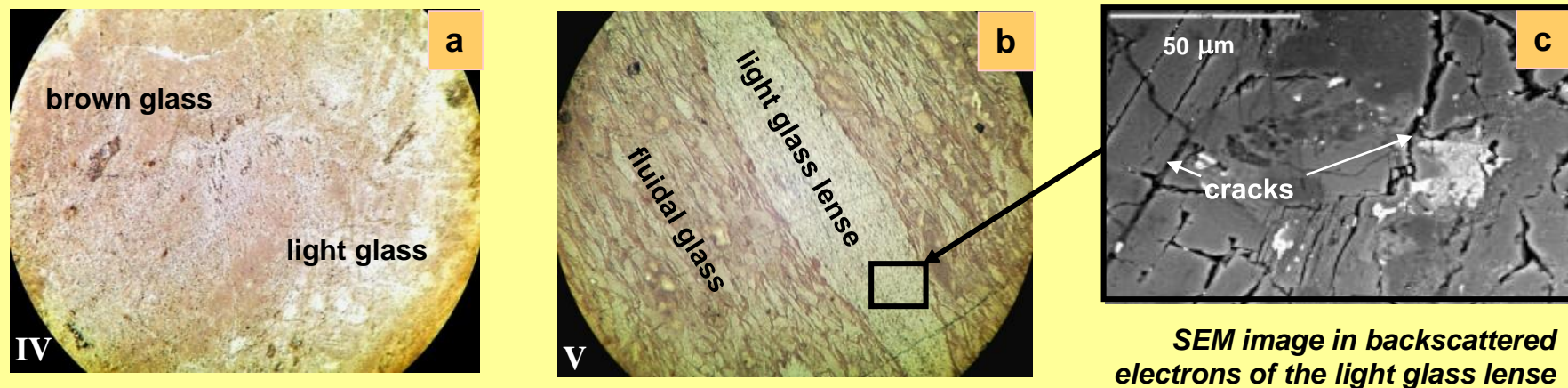
В приконтактных частях пластообразного тела проявился весь спектр постмагматических, гидротермально-метасоматических и деформационных преобразований.

Массивные и флюидальные риолит-риодацитовые вулканические стекла обсидиан-перлитового типа, м-е Новогоднее



Стадии девитрификации: (I) кристаллиты - волосяные трихиты, глобулиты и скопулиты), (II) сферолиты, (III) минералы кристаллизации.

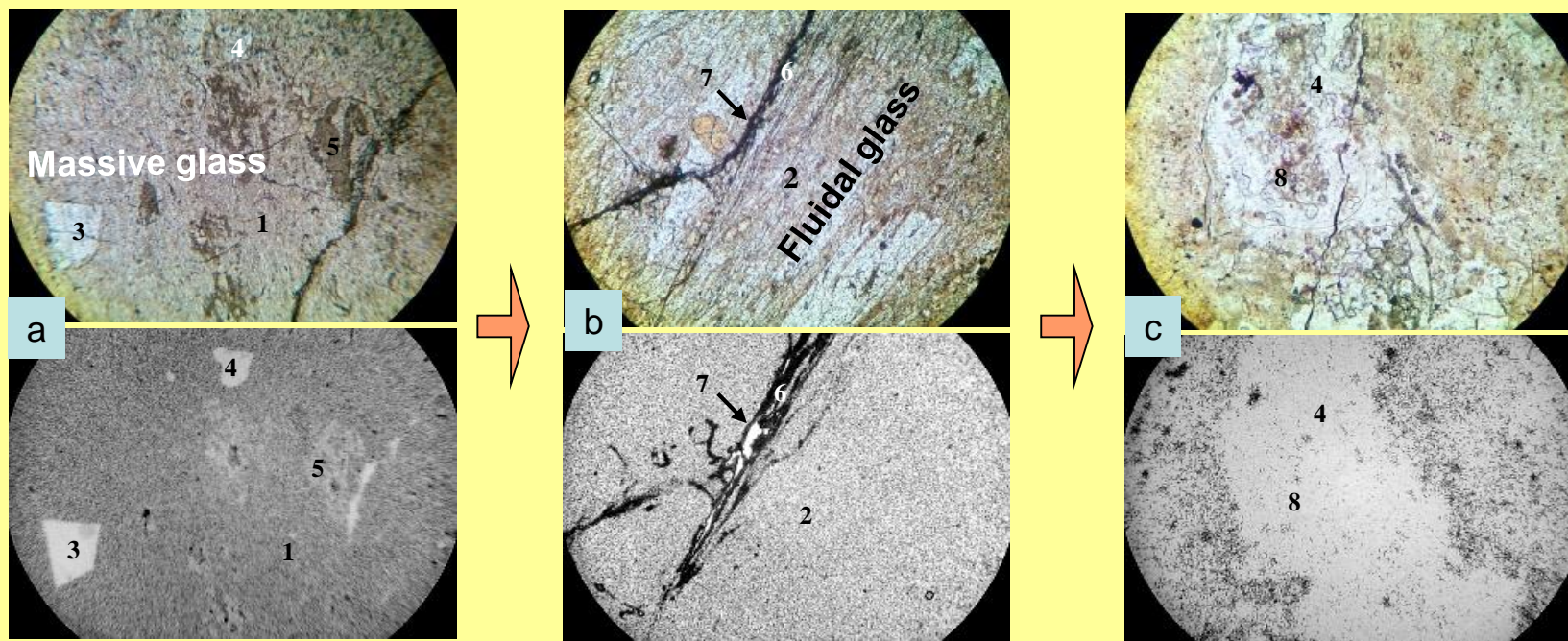
Кристаллиты ⇒ сферолиты ⇒ минералы кристаллизации (Q-FS, Car-FI агрегаты).



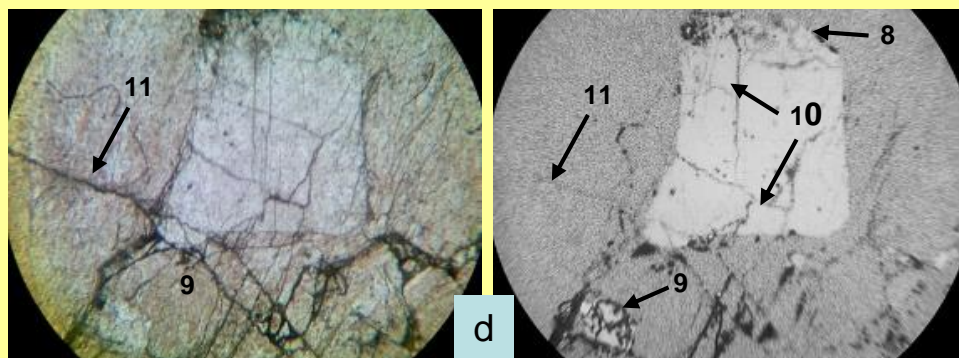
Относительно свежие массивные (a) и флюидальные (b) обсидиан-перлиты с **минерализованными и неминерализованными трещинами (c).**

Микрофото: L, мм: I, IV, V -1.09; II, III – 2.78; николи параллельны.

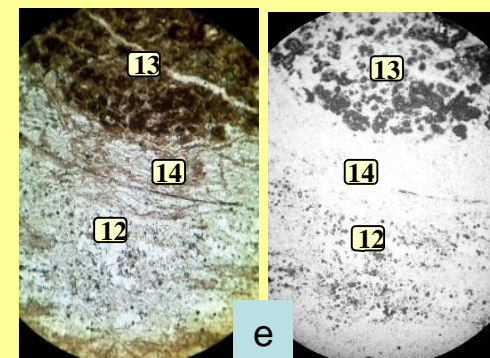
НОВОГОДНЕЕ м-е. Миграция U в вулканических стеклах в процессе девитрификации (a⇒b⇒c). Накопление U в минерализованной трещине (окси-гидрооксиды Fe-Ti, LA) и полный его вынос из зоны низкотемп. метасоматических преобразований (Q, Ab, Sr); f-radiography



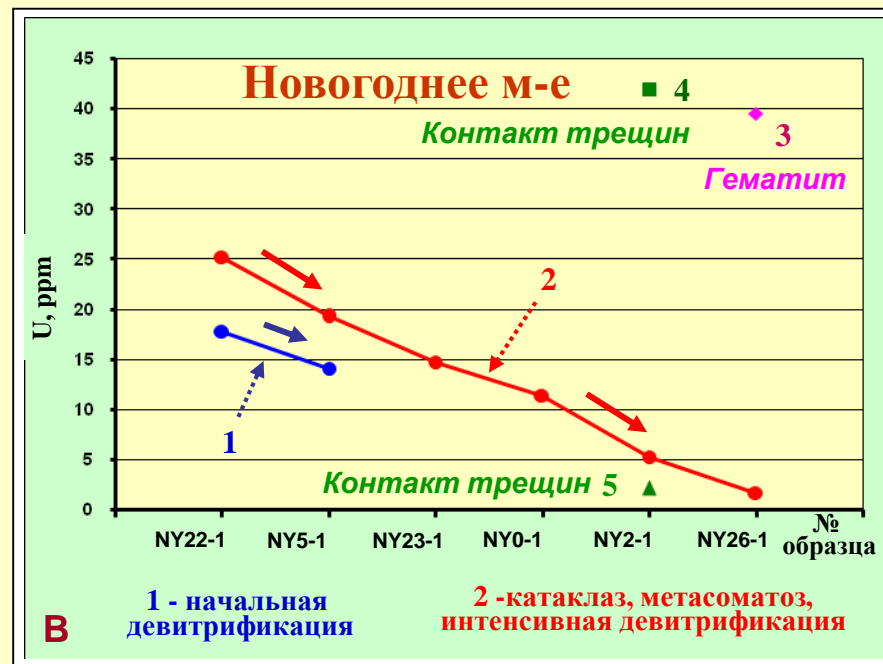
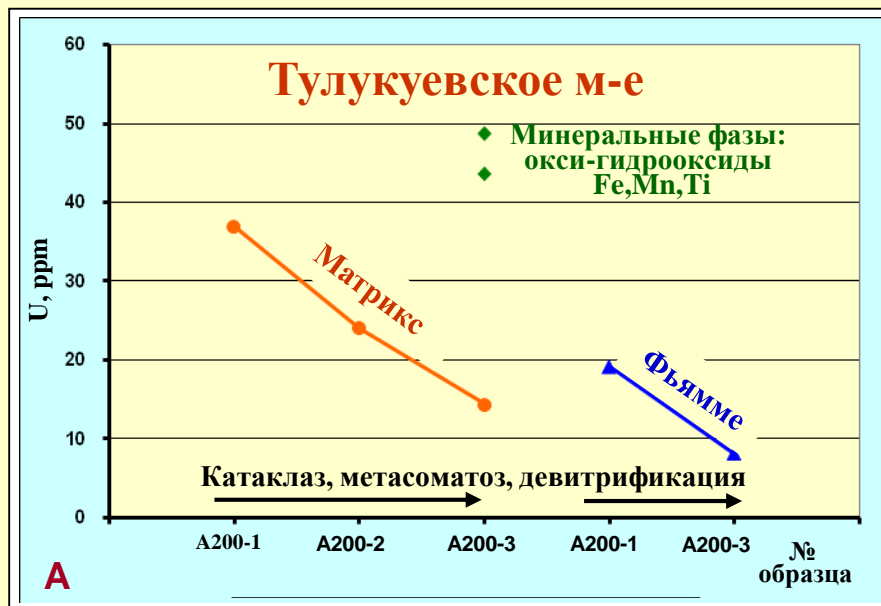
Перераспределение и накопление U в минерализованных трещинах, в приконтактовой зоне минералов-вкрапленников (d) и Ti-содержащих акцессорных минералов (e), а также в процессе катаклаза и микропрожилкования (e) (f-radiography)



Микрофото и f-радиография.
L, мм: a,d=2.78;
б,с,е=3.89; николи параллельны.



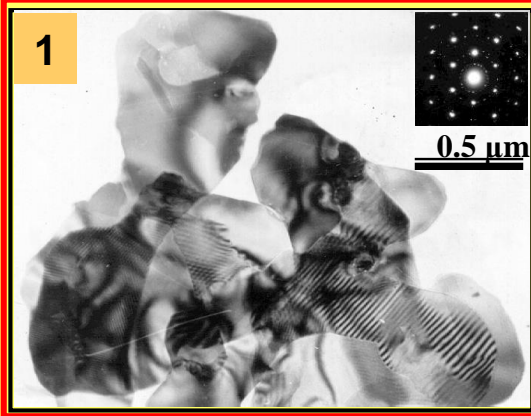
Тулукуевское и Новогоднее м-я: перераспределение U в стекловатом matrix и фиазме игнимбритов (А); при девитрификации, гидротермально-метасоматических и деформационных преобразованиях обсидиан-перлитов (В) (по данным F-radiography)



Методика расчета содержаний U и качественная оценка его распределения (по данным F-radiography)

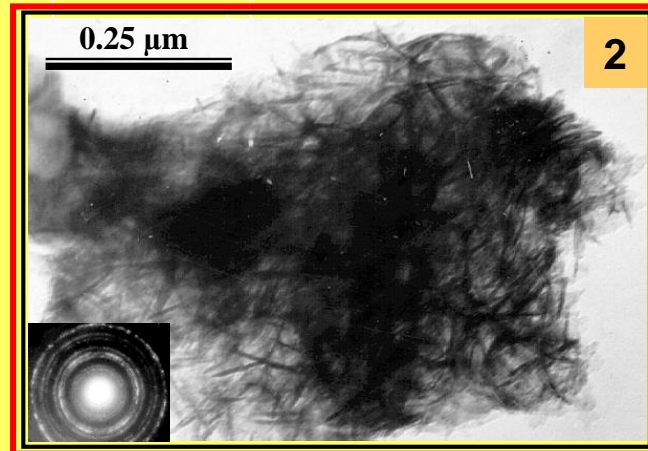
Препараты (шлиф* + лавсан детектор) облучались в МИФИ тепловыми нейтронами с различной интенсивностью потока. Качественная оценка содержаний U- флюенсом 1.7×10^{17} нейтр/см²; количественная – $1.7 \times 10^{13-14}$ нейтр/см². *Пр-пол шлифы на Q стеклах.

Samples, section	Number of sites	U content, ppm		Coefficient of variation
		Average	Range	
<i>Massive glass</i>				
Fresh glass (F10-1)	6	27.35	22.75-28.98	8.45
Altered I glass (F10-2)	6	23.16	20.08-28.35	14.16
Altered II glass (F10-3)	3	18.07	17.34-18.42	3.04
<i>Fluidal glass</i>				
Fresh glass (F10A-1)	5	27.26	23.54-33.24	14.35
Altered I glass (F10A-2)	4	11.55	9.81-17.04	27.53
Area with HEM (F10A-3)	4	49.79	30.74-59.21	26.61



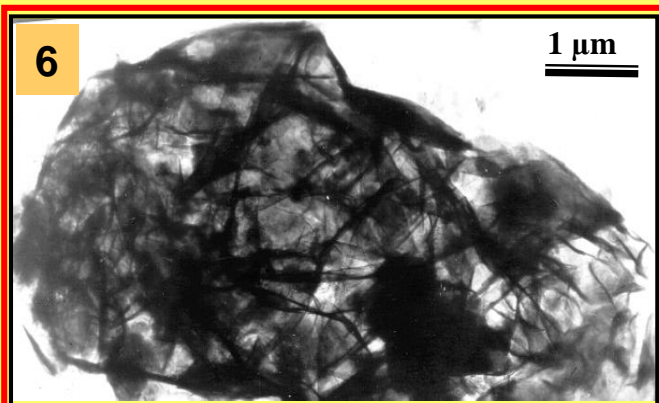
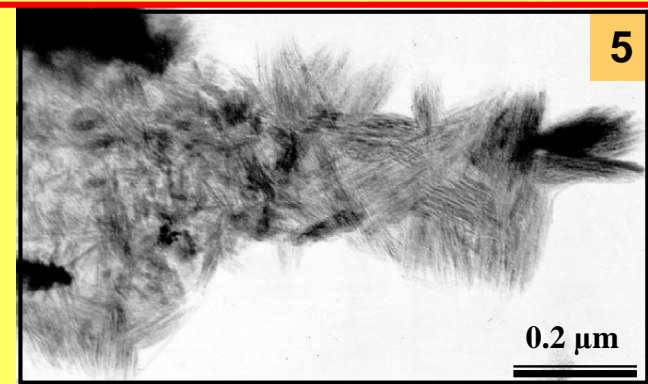
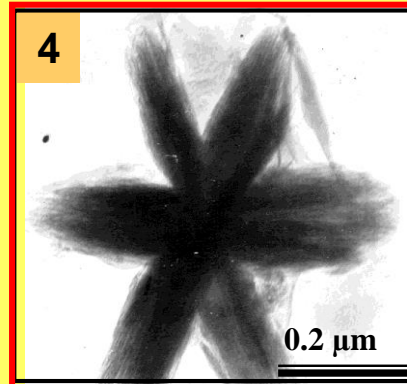
Важнейшие минералы-сорбенты U

ТЕМ агрегатов **ГЕМАТИТА**:
(1) пластинчатые кристаллы
с характерным «муаровым»
узором; (2) дисперсные
спутанноволокнистые
образования



ТУВ присутствует и входит в
состав, впервые обнаруженного
глобулярного **ТУХОЛИТА**, U-
рудная стадия (3)

ТЕМ игольчатого **ГЕТИТА** со сростками-тройниками (4,5)



ТЕМ: спутан-
волокнистые агр-ы
Fe-вернадита (6) и
впервые обнаружен
в зоне разлома **ТОР**
(прото) ферригидрит
(7) со следами гётита и
гематита по краям (7)



Модель миграции и накопления U

Проницаемые геохимические барьеры (ПРБ): **ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ** и **СОРБЦИОННЫЙ**
Важнейший механизм задержки U обусловлен процессами СОРБЦИИ в
восстановительных условиях ПРБ, в зонах тектонических нарушений
(на фоне окисления); U(VI) ⇒ U(IV) – в связи с реакц способностью минералов-сорбентов.

Охвачен весь сорбционный интервал – от крайне высоких содержаний U
в обсидиан-перлитах м-я Новогоднее, до полного его выноса
из минералов-концентраторов верхних уровней Тулукуевского карьера

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ СОРБЦИОННЫЙ РЯД (в порядке убывания):

1. аморфные оксиды Fe ⇒
2. оксиды Ti (лейкоксен), Fe-Ti (ЛА агрегат) ⇒
3. (прото) ферригидрит ⇒
4. гетит ⇒
5. гематит ⇒
6. твердое углеродистое вещество - ТУВ ⇒
7. сидерит, анкерит ⇒
8. окисленные Fe-Mg и Fe (бертьерин) хлориты ⇒
9. кальцит ⇒
10. пирит ⇒
11. «мучнистый карбонат» ⇒
12. смектит, смешаннослойные минералы ⇒
13. иллит ⇒
14. каолинит ⇒
15. полевые шпаты ⇒
16. кварц.

Кумулятивный эффект перераспределения «**ПОРОДНОГО**» и «**РУДНОГО**» U.
Значительное перераспределение «**ПОРОДНОГО**» U во ВШ зоне,
а «**РУДНОГО**» - преимущественно во ВН зоне.

Разнонаправленность процессов «**ГИПОГЕННОГО**» и «**ГИПЕРГЕННОГО**» урана: в рудную стадию от разлома 1А во вмещающие породы, а в гипергенных – перераспределение и «стягивание» к зоне фильтрации метеорных вод. Тенденция осложняется перераспределением U в процессе формирования **древней и современной зон обогащения.**

Постмагматические, гидротермально-метасоматические и деформационные преобразования пород в Стрельцовской кальдере изучались на примере наиболее глубокозалегающих и крупных месторождения фундамента - Антей и Аргунское (скв. гл 2500-2670 м).

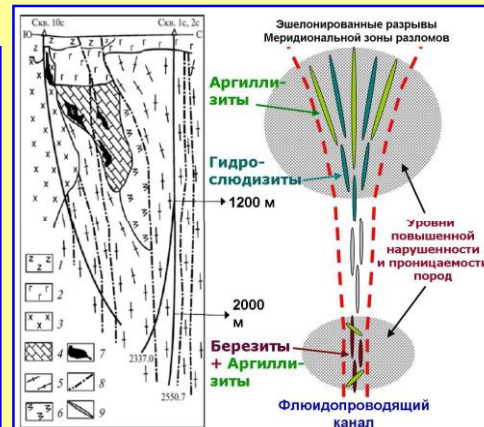
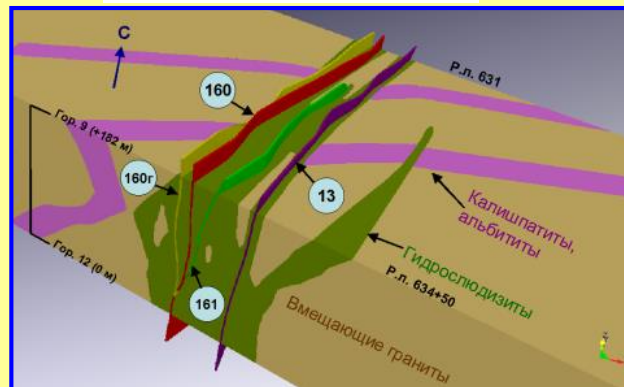
Минеральные и деформационные преобразования пород, проявленные в течение основных геотектонических циклов (ГТЦ и ТМА)

Рифейский ГТЦ ~600 млн. лет назад	Каледонский ГТЦ ~520-410 млн. лет	Герцинский ГТЦ ~360-210 млн. лет	Мезозойская ТМА ~160-100 млн. лет
Постмагматические и гидротермально-метасоматические преобразования			
- Мигматизация Высокотемпературный кварц-полевошпатовый метасоматоз - Рассеянная U-минерализация	- Мигматизация Высокотемпературный кварц-кальципатовый метасоматоз; - Динамометаморфизм	-Кальципатизация -Альбитизация -Грейзенизация -Динамометаморфизм - Динамометаморфическая серицитизация	-Грейзенизация -Предрудный метасоматоз -Рудоспровожающий метасоматоз <i>U-Mo промышленная минерализация</i> -Пострудная аргиллизация
Деформационные (структурно-петрологические) преобразования			
• Бластез-1 • Катаклиз-1 • Милонитизация-1	• Бластез-1 • Катаклиз-1 • Милонитизация-1	• Бластез-2 • Катаклиз-2 • Милонитизация-2	• Катаклиз-3 • Брекчирование и прожилкование
Ведущий тип деформаций			
Преимущественно пластичные (упруго-пластичные)		Хрупко-пластичные	Упруго-хрупкие

Ретроградное изменение температуры флюидов пород кристаллического фундамента

Рифейский ГТЦ: I группа включений 450-400°C
Мигматизация, высокотемпературный кварц-полевошпатовый метасоматоз.
Каледонский ГТЦ: II группа включений 350-320°C*
Мигматизация, высокотемпературный кварц-кальципатовый метасоматоз и динамометаморфизм. Микротрещины этого кластера имеют субширотную (СВВ-ЮОЗ) ориентировку и образовались в обстановке субширотного сжатия.
Герцинский ГТЦ: II (350-320°C) и III (280-240°C) группы включений
Кальципатизация, альбитизация, грейзенизация, динамометаморфизм и динамометаморфическая серицитизация. Кластер микротрещин СЗ-ЮВ простирания.
Мезозойская ТМА: III группа включений 280-240°C
Грейзеноподобные изменения, предрудная березитизация.
IV группа включений 260-200°C
Предрудная низкотемпературная гидрослюдилизация и аргиллизация. Кластеры микротрещин III-IV группы были сформированы в поле напряжений с СЗ-ЮВ и СВ-ЮЗ векторами сжатия.
V группа включений 220-160°C
Рудоспровожающие альбитизация и хлоритизация. Преобладают три направления микротрещин: СЗ-ЮВ, ССВ-ЮЮЗ и СВВ-ЗСЗ. Разноориентированные планарные системы флюидных включений указывают на то, что рудовмещающая разломно-трещинная структура вступила в режим объемной дезинтеграции (возможно на фоне гидроразрыва).
VI группа включений 150-80°C
Заключительные стадии формирования прожилково-вкрапленной U минерализации, пострудной аргиллизациии и гидротермально-метасоматического прожилкования (кальцит, бертьерин, флюорит, каолинит, смектит). Рудоспровожающая метасоматическая хлоритизация и гематитизация отнесены нами к пограничному температурному интервалу включений V и VI группы предположительно.

м-е АНТЕЙ 3D модель



м-е АРГУНСКОЕ Геологический разрез
Низкотемпературные метасоматиты:
березиты, гидрослюдициты, аргиллизиты

I. Радиэкологический аспект изысканий в связи обоснованием долговременной изоляции РАО

Эталонные м-я Тулукуевское, Новогоднее, Антей и Аргунское - рассмотрены в качестве природных аналоговых объектов (ПАО) длительной изоляции ВАО/ОЯТ

Аналоговыми исследованиями охвачен широкий спектр U м-й в гранитах и вулканитах: Юкка Маунтин (США), Сьерра Бланка (Мексика), Эль Беррокал (Испания), Палмоту (Финляндия), Камаиши (Япония) и Санерли (Китай) и др. Однако большинство прогнозных моделей миграции U не учитывают феномен накопления U в ПРБ (Перельман, 1979) и их роль в задержке урана.

Первый отечественный объект захоронения РАО

Этот многолетний (2000-2020 гг) опыт был использован при изучении механизмом миграции U и других актинидов, а также сорбционных свойств минералов в отношении актинидов и других радионуклидов в породах Нижнеканского массива (НКМ)

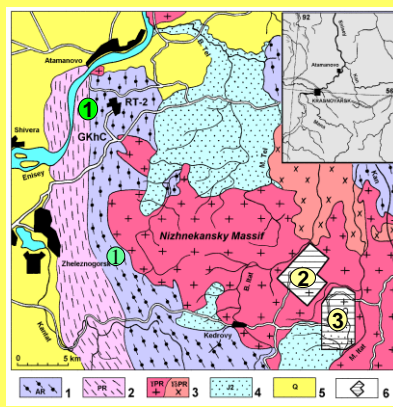
Совместные исследования с кафедрой радиохимии МГУ, Федеральным ведомством по геонаукам и природным ресурсам, Ганновер, Университетом Гёте, Франкфурт-на-Майне, Германия, Институтом физической химии и электрохимии (ИФХЭ РАН)

Исследование кинетики сорбции, коэффициентов распределения радионуклидов ($^{239,240}\text{Pu}$, $^{241,243}\text{Am}$, $^{135,137}\text{Cs}$, ^{226}Ra , ^{79}Se , $^{237,239}\text{Np}$) НКМ (Красноярский край, уч. Енисейский)

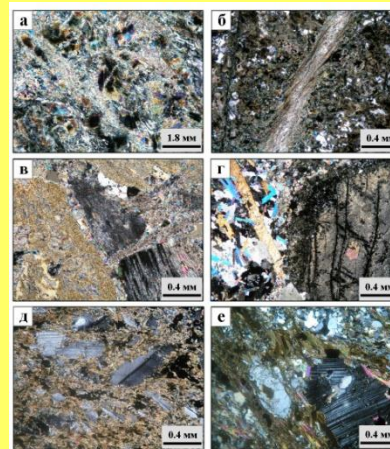
«Свежие» плагиигранитоиды и полосчатый Bt-Slm плагиигранитоид



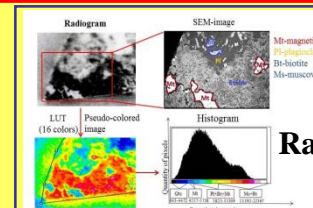
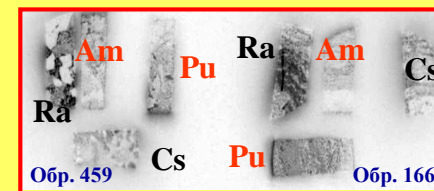
Геологическая карта Нижнеканский гранитоидный массив



Интенсивно амфиболитизированный габбро-диабаз с Mu, Bt, Chl, Tlc, Sr.



Радиограммы плашек гранито-гнейсов



Расчет относит эффект сорбции (RSE). Анализ радиограмм сорбции Ra. SEM image фрагм обр. 166

II. Комплекс проводимых исследований может быть использован при обосновании поисков, разведки и отработки руд на урановорудных объектах, а также при рассмотрении возможных источников рудного вещества.