

Санкт-Петербургский Государственный Университет

Институт наук о Земле

СОКОЛОВА Лидия Александровна

Выпускная квалификационная работа

**Реконструкция истории образования кольцевого хребта Кондер по
результатам термохронологических исследований**

Уровень образования: бакалавриат

Направление *05.03.01 "Геология"*

Основная образовательная программа *СВ.5018 "Геология"*

Научный руководитель: доцент
кафедры геохимии, к.г.-м.н.,
Якубович О.В.

Рецензент: Ведущий научный
сотрудник, Институт Геологии
и Геохронологии Докембрия
РАН, д. г.-м. н.,
Мочалов А. Г.

Санкт-Петербург

2022

Содержание

Введение	3
1. Геологическое описание массива Кондёр	4
1.1. Россыпное месторождение платиновых металлов	7
2. Материал	10
3. Методы	11
3.1. Электронная микроскопия и электронно-зондовый анализ	11
3.2. ИК-спектроскопия	11
3.3. Изучение кинетики выделения гелия	11
3.4. Низкотемпературная геотермохронология	14
3.4.1. (U-Th)/He метод	14
3.4.2. Трековый метод	18
4. Результаты	20
4.1. Химический состав	20
4.2. Трековое датирование	24
4.3. U-Th-He датирование	24
4.4. Кинетика выделения гелия	25
5. Обсуждение	27
5.1. Дислокации	27
5.2. Термохронологические реконструкции	27
Заключение	30
Список литературы	34

Введение

Массив Кондёр находится в Аяно-Майском районе Хабаровского края и представляет большой интерес, поскольку с платиноносными ультраосновными породами массива Кондёр связано россыпное месторождение платиновых металлов рек Кондёр-Уоргалан. Образование этого уникального по своим запасам россыпного месторождения связывают в том числе и с особенностями экзогенного развития региона. В этой работе представлены результаты термохронологических исследований, направленных на реконструкцию скорости эксгумации массива Кондёр в близповерхностных условиях.

Цель работы: восстановить историю эксгумации массива Кондёр с использованием методов низкотемпературной термохронологии.

Задачи:

- 1) Определить время эксгумации пород, используя U-Th-He изотопную систему в апатите;
- 2) Изучить кинетику выделения гелия из апатита;
- 3) На основе полученных данных дополнить модель эксгумации массива Кондёр (модель Мочалова-Хорошиловой).

1. Геологическое описание массива Кондёр

Массив Кондёр (Рис. 1) расположен в Аяно-Майском районе Хабаровского края, на Омнинско-Майском плоскогорье. Ближайшими населёнными пунктами являются села Джигда и Нелькан (75 и 100 км соответственно). Административный центр – Хабаровск – находится в 1100 км к югу. Геологически массив приурочен к юго-восточной части Алданского щита, юго-восточной части Сибирской платформы. В этой же части Алданского щита известно несколько похожих массивов (Mochalov et al., 2014).

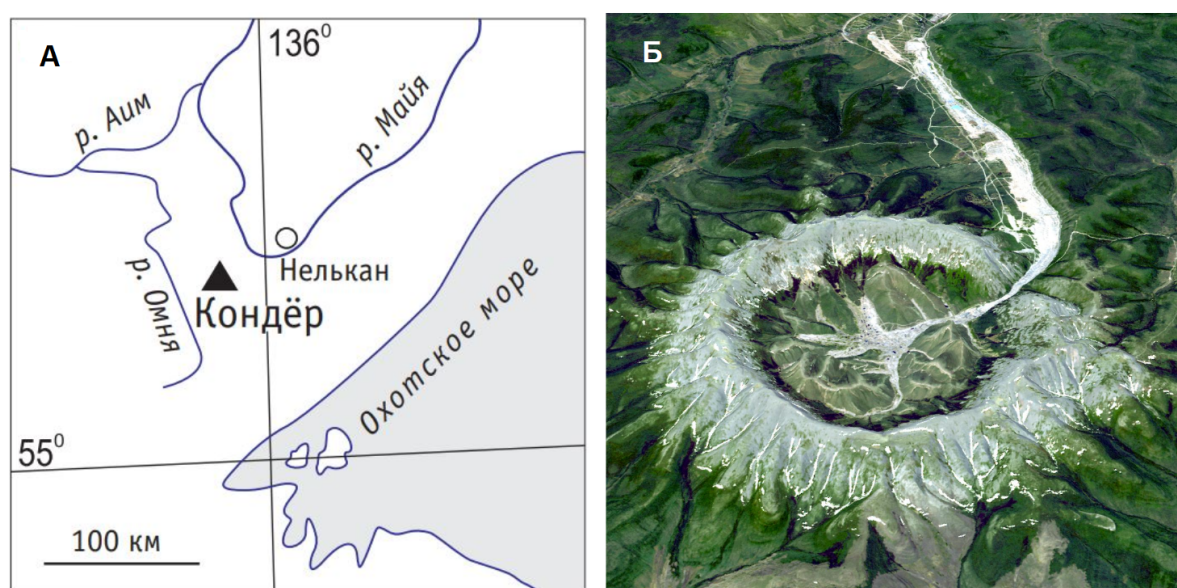


Рис. 1. А. Схема расположения массива Кондёр (Мочалов, 2019); б) спутниковая фотография массива Кондёр (NASA, 2006).

Хребет имеет кольцевую форму, диаметром около 8 километров. Абсолютные отметки хребта варьируются от 1130 до 1387 м. Внутренние склоны имеют крутизну до 40°, внешние – менее 30°. Хребет окружает чашеобразную котловину.

На внутренних склонах хребта берут начало притоки ручья Кондер, образуя радиальную гидросеть. С этой гидросетью связано крупное россыпное месторождение платиноидов.

Тектонически на данной территории можно выделить два структурных этажа: кристаллический фундамент и платформенный чехол. Кристаллический фундамент представлен архейскими метаморфическими породами. Эти породы обнажаются на внутреннем склоне массива Кондёр. Породы платформенного чехла представлены

среднерифейскими терригенными отложениями. Породы среднего рифея делятся на кондерскую и омнинскую свиту. Кондерская свита также обнажается на внутренних склонах хребта. Омнинская перекрывает кондерскую свиту и обнажается на внешних склонах массива. Породы на расстоянии до 1 км имеют периклинальное падение под углом до 60°, дальше – выполаживаются.

Массив локализован в зоне пересечения крупных разломов: субмеридионального Бераинского и субширотного Кондеро-Нетского. Эти разломы имеют архейское и протерозойское заложение, глубина залегания 15-20 км (Хорошилова et al., 1993)

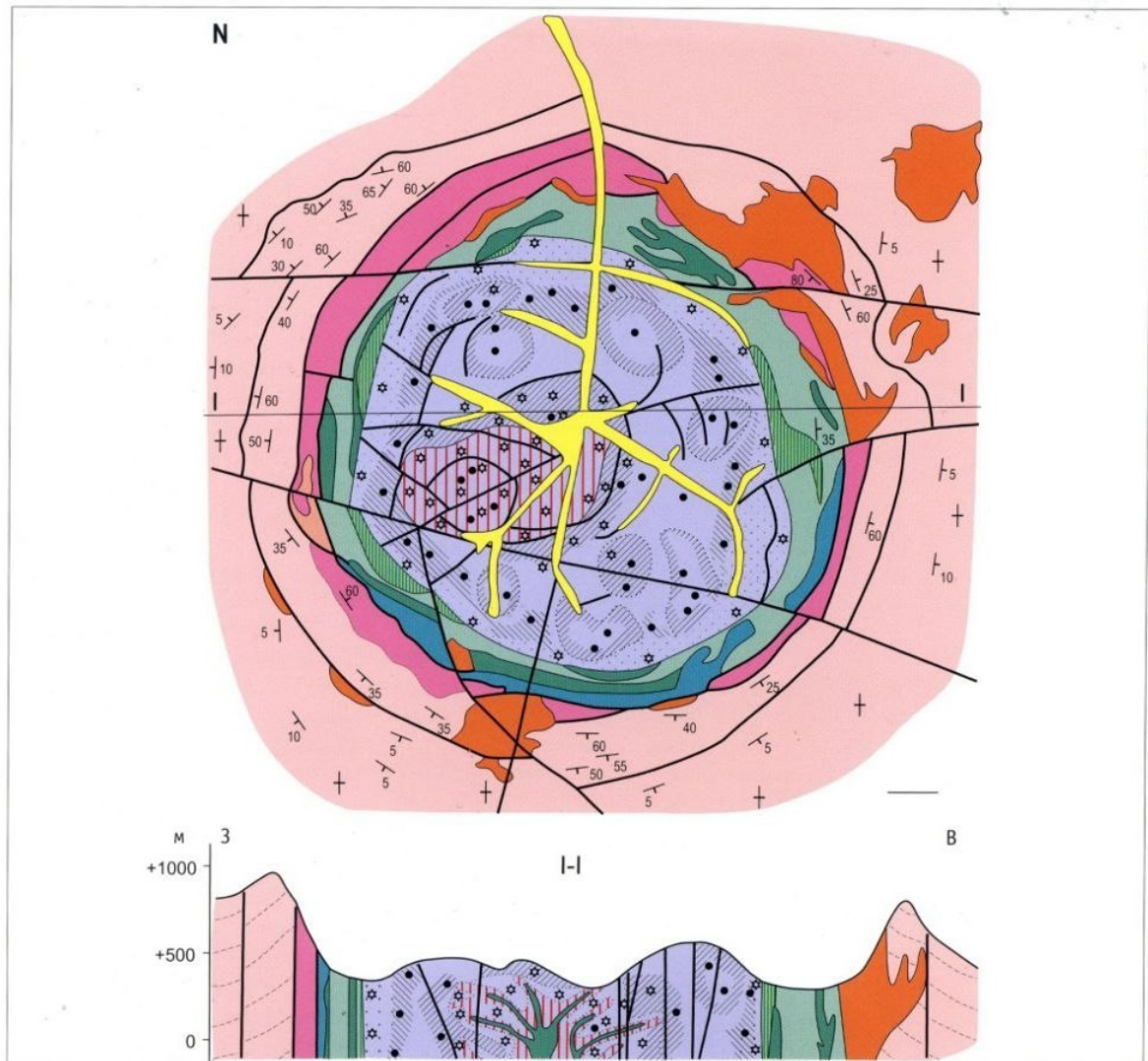
Происхождение массива обусловлено внедрением интрузий Алданского и Кондерского комплексов в раннеархейские и среднерифейские породы. По строению (Рис. 2) массив является концентрически-зональным.

Кондерский комплекс представлен дунитами и клинопироксенитами. Дунитами кондерского комплекса сложено ядро массива диаметром около 5,5 км. Среди дунитов различаются мелкозернистые, среднезернистые и пегматоидные разновидности. Дуниты являются основным источником платиноидов и хромшпинелидов. Дунитовое ядро окружено кольцевым телом клинопироксенитов шириной до 1 км. Контакт дунитов с клинопироксенитами в основном проходит по кольцевому периклинальному разрыву.

Алданский комплекс представлен тремя сериями (Гурович et al., 1994): вулканогенной, монцонитоидной и щелочной. Также к алданскому комплексу относятся контактовые и метасоматические образования, сформированные за счет внедрения интрузий данного комплекса.

К вулканогенной серии относится две фазы: первая включает силлы и дайки субщелочных диоритовых порфиритов, трахиандезитов. Ко второй относятся дайки эксплозивных брекчий и туфов, имеющих риолитовый состав. На территории массива образований вулканогенной серии нет, но в радиусе до 8 километров такие образования встречаются, что означает связь таких образований с Кондерской структурой.

К монцонитовой серии относится две фазы. Первая включает габбро и косьвиты. Эти породы слагают на контакте с клинопироксеновым кольцом изогнутные дуговые тела длиной до 6 км и шириной до 0,4 км. Косьвиты слагают дуги, расположенные ближе к центру массива, а габбро – внешние. Косьвитами также сложены многочисленные дайки в пределах дунитового ядра, а также крупная интрузия в западной части.



- | | |
|---|--|
| <p>1 – породы позднего протерозоя (алевролиты, песчаники, гравелиты и их роговики).</p> <p>2 – породы раннего архея (гнейсы, кристаллические сланцы, мраморы доломитовые) и гнейсовидные плагиограниты.</p> <p>3–7 – магматические породы мезозоя (J_3-K_1) (не показаны дайки и жильные комплексы шонкинит-пикритов, щелочных и нефелиновых сиенитов и их пегматитов, косьвитов, габбро, диоритов, гранитов):
 3 – дуниты: (а) мелкозернистые, (б) мелко-, средне-, крупнозернистые, (d) пегматоидные, (e) магнетитизированные;</p> <p>8 – метасоматиты: (а) диопсидовые с оливином, магнетитом и биотитом внутреннего периклинального разрыва, (b) центральные щелочные титаномagnetит-флогопит-амфибол-клинопироксеновые (не показаны диопсидиты, амфиболиты, боулингит-монтморилонит-серпентиниты, цеолиты, различные скарны).</p> <p>9 – участки дунитов с повышенными содержаниями МПГ: (а) магматогенно-флюидно-метасоматический $Pt>mun$; (b) флюидно-метаморфогенный $Pt>Ir-mun$; не показаны: магматогенный $Pt>mun$ в кумулятивных разнозернистых дунитах, пироксенитах; магматогенно-флюидно-метасоматический $Pt>Os-mun$ клинопироксеновых жил и шлиров в дунитах; магматогенно-флюидно-метасоматический $Pt>Pd-mun$ дунитов (3e) и метасоматитов (8b).</p> | <p>4 – клинопироксениты и верлиты;</p> <p>5 – косьвиты;</p> <p>6 – габбро;</p> <p>7(a) монцониты, монцодиориты, сиенит-диориты, 7(b) граниты пегматоидные.</p> <p>10 – россыпи платиновых металлов.</p> <p>11 – залегание пластов: (а) наклонное, (b) горизонтальное.</p> <p>12 – границы и разломы: (а) геологические границы; (b) фациальные границы; (d) разломы.</p> |
|---|--|

Рис. 2. Схема геологического строения массива Кондёр (Мочалов, 2019)

Вторая фаза включает в себя субщелочные кварцевые диориты и кварцевые монцодиориты, щелочно-полевошпатовые сиениты. Породы этой фазы обнажаются в северо-востоке от массива. Дайки щелочно-полевошпатовых сиенитов встречаются только на контакте с дунитовым ядром (Mochalov et al., 2014).

Щелочная серия представлена интрузиями щелочных и фельдшпатоидных сиенитов, их пегматитов и щелочными гранитами. Щелочные сиениты представлены меланитовыми сиенитами (образуют единичные дайки на периферии массива) и эгириновыми, эгрин-арфведсонитовыми, апатит-арфведсонитовыми сиенитами (в основном в центральной части дунитового ядра). Фельдшпатоидные сиениты представлены: луювритами, канкринитовыми луювритами и другими разновидностями луювритов. Породы этой группы встречаются на периферии дунитового ядра.

Внедрение интрузий монцонитоидной и щелочной серий сопровождалось метасоматическими и контактовыми изменениями на вмещающие породы. Всего таких пород выделено 11 разновидностей (Гурович et al., 1994).

Раньше считалось, что кондерский комплекс имеет протерозойский возраст, но последние данные изотопно-геохимических исследований указывают на то, что кондерский комплекс имеет раннемеловой возраст (Savatenkov and Mochalov, 2018). Породы алданского комплекса имеют раннемеловой возраст (Емельянов and Моралев, 1973). Таким образом, породы двух комплексов относятся к одному этапу мезозойской тектоно-магматической активации Алданского щита.

1.1. Россыпное месторождение платиновых металлов

Запасы платиновых металлов в россыпном месторождении рек Кондёр-Уоргалан является крупным, значение запасов составляет более 120 т (Мочалов, 2019).

Месторождение имеет суммарную протяженность более 60 км при средней ширине около 360 м. Большая часть запасов приурочена к долине р. Кондёр (65%) и р. Уоргалан (23%), остальная часть – в притоках 1, 2 и 3 порядка. Платиноносные пески приурочены к разновозрастным слоям. Средняя толщина платиноносных песков составляет 2,4 м. Платиноносные толщи перекрывают отложения с непромышленными содержаниями ЭПГ, которые имеют мощность 5,5 м. Продуктивность песков составляет примерно от 2 до 5 г/м³ (Mochalov et al., 2014). Помимо ЭПГ, в толще платиноносных песков присутствуют самородное золото, серебро, хромшпенелиды.

Долина реки Кондер построена сложно (Рис. 4), из-за того, что её составля-

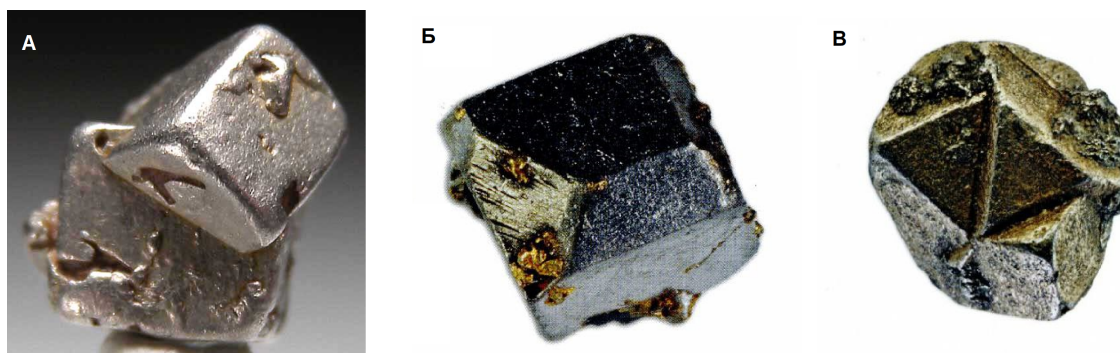


Рис. 3. Кристаллы изоферроплатины(Мочалов, 2019)

ющей частью является погребленный аллювий. Аллювиальные отложения можно разделить на 5 комплексов разного возраста: плиоцен-ранний плейстоцен, средний плейстоцен, поздний плейстоцен и голоцен. Наиболее высокую продуктивность имеет плиоцен-раннеплейстоценовые пески(Хорошилова et al., 1993).

Количество минералов платиновой группы, представленных в платиноносных песках, составляет почти 100 минеральных видов Pt, Ir, Os, Pd, Rh и Ru. В россыпях также встречается самородное золото, серебро, самородки титаномагнетита. Наиболее значимая часть находится в местах разрушения в пределах массива Кондер. МПГ встречаются в следующих породах массива: дуниты, хромититы, оливиниты, пироксениты, косвиты, щелочные метасоматиты, щелочные пегматиты и сульфидно-малахитовые породы. В элювии этих пород находят агрегаты МПГ в сростках с нерудными минералами.

Минералы платиновой группы массива Кондер относятся к следующим парагенетическим минеральным ассоциациям (Мочалов, 2019):

- 1) Pt тип, платиновый магматогенный;
- 2) Pt > Ir тип, иридисто-платиновый флюидно-метаморфогенный;
- 3) Pt тип, платиновый магматогенно-метасоматический.

Главным россыпеобразующим минералом является изоферроплатина (Рис. 3) и её сростаниями с самородной платиной и тетраферроплатиной.

Выделяется пять типов россыпеобразующих формаций:

- 1) Магматогенный платиновый;
- 2) Магматогенно-флюидно-метасоматический платиновый;

- 3) Магматогенно-флюидно-метасоматический иридисто-платиновый;
- 4) Магматогенно-флюидно-метасоматический осмисто-платиновый;
- 5) Магматогенно-флюидно-метасоматический палладисто-платиновый.

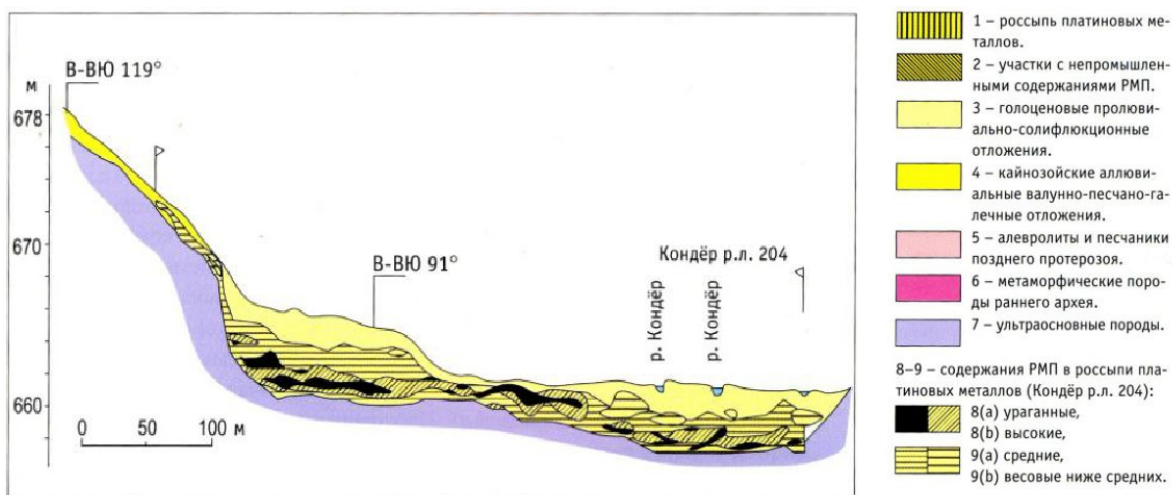


Рис. 4. Геологический разрез Кондёрской платинометаллической россыпи по поисковой линии 204 (по данным Аяно-Майского ГПО (Геол. Просп. Экспедиция))(Мочалов, 2019)

2. Материал

Материал для исследования (Таблица 2) был предоставлен Якубович О.В. (образец 43-я), Петровым С.В. (образец 333) и Мочаловым А.Г. (образцы М1 и М2). Основным материалом для исследования являлся апатит (Рис. 5), извлеченный из скважин и отобранный из поверхностных выходов метасоматитов по косвитам (апатит-магнетитовые клинопироксениты). Породообразующим минералом косвитов является диопсид. Апатит является аксессуарным минералом, но в некоторых случаях его содержание может достигать 8%. Магнетит в основном представлен ксеноморфными агрегатами, заполняющими пространство между зернами пироксена. В метасоматитах помимо клинопироксена, апатита и магнетита, присутствуют амфибол и биотит (Mochalov et al., 2014).

Таблица 1. Изучаемые образцы

Образец	Привязка
43-Я	Скважина 183
333	Скважина
М1	Водораздел между р. Аномальный и р. Прямой, ближе ко второму
М2	р. Аномальный



Рис. 5. А. Фотография вмещающей породы – метасоматит по косвитам; Б. Апатит из метасоматитов, образец 333.

3. Методы

3.1. Электронная микроскопия и электронно-зондовый анализ

Для определения химического состава образцов использовалась электронная микроскопия и электронно-зондовый микроанализ с помощью сканирующего электронного микроскопа с приставками. Этот метод основан на взаимодействии выпускаемого электронного пучка и исследуемого объекта. Из электронной пушки выпускается пучок электронов, далее пучок взаимодействует с поверхностью образца и генерируются различные ответные сигналы, которые регистрируются детекторами.

Первичные исследования проводились в РЦ СПбГУ "Микроскопия и микроанализ" на Hitachi TM3000 с приставкой OXFORD на сколах зерен, для более детальных результатов исследования проводились в РЦ СПбГУ "Геомодель" на Hitachi S-3400N и количественного энерго-дисперсионного микроанализа EDX - AzTec Energy 350 на полированных шайбах и пластинках.

3.2. ИК-спектроскопия

Съемка ИК-спектров выполнялась на ИК-Фурье спектрометре BRUCKER VERTEX-70. Для исследования было взято 3 мг препарата, предварительно отснята фоновая таблетка KBr (спектроскопически чистый), количество KBr 200 мг. Фоновый спектр автоматически вычитался из спектра изучаемого вещества. Разрешение снимаемого спектра 2 см^{-1} . Область съемки от 350 до 4000 см^{-1} .

3.3. Изучение кинетики выделения гелия

Для описания миграции гелия из минерала используется две модели: односкачковая и диффузионная.

Традиционно, низкотемпературная термохронология опирается на диффузионную модель. Диффузионная модель предполагает, что выход атома из решетки минерала определяется временем его блуждания в зерне, соответственно количество энергии, необходимое для того, чтобы покинуть кристаллическую решетку, зависит от размера зерна.

Односкачковая модель предполагает, что энергия, затраченная на первый скачок для выхода из дефекта больше, чем энергия, необходимая для последующей диффу-

зии, и поэтому не учитывает размер зерна.

В реальности процесс миграции гелия, скорее всего, представляет собой сочетание односкачковой и диффузионной моделей (Рис.6).

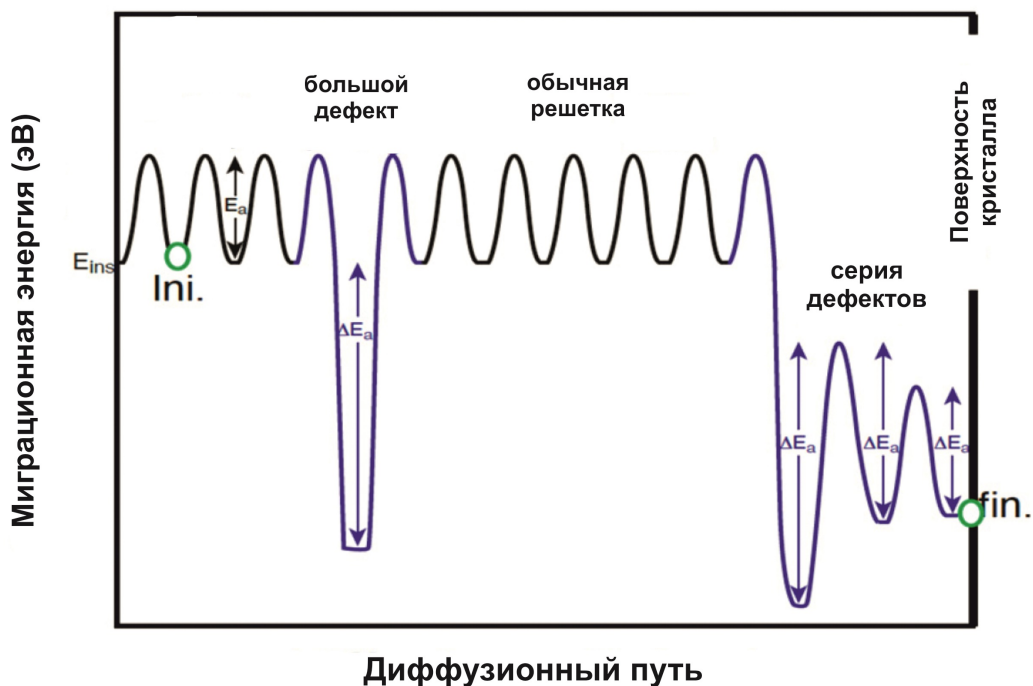


Рис. 6. Схема диффузионного пути, по Gautheron et al. (2022). E_a – энергия активации, зеленый круг – атом радиогенного гелия.

Энергия, необходимая для того, чтобы покинуть место дефекта больше, чем энергия, необходимая для того, чтобы перемещаться по кристаллической решетке (диффундировать).

При изучении кинетики выделения гелия можно посчитать кинетические параметры для минералов: энергию активации и частотный фактор (Shukolyukov et al., 2009).

Скорость миграции атомов радиогенного гелия можно представить:

$$\frac{dHe}{dt} = -kHe(t) \quad (1)$$

где k - частотный фактор и может быть посчитан:

$$k = k_0 e^{-\frac{E}{RT}} \quad (2)$$

где k_0 – значение частотного фактора при $T=0$, E – энергия активации миграции, R – газовая постоянная, T – температура в кельвинах.

Дифференциальная форма закона миграции гелия выглядит следующим образом:

$$He_t = He_0 e^{-kt} \quad (3)$$

а для нахождения кинетических параметров:

$$\frac{He_0}{He_t} = e^{k_0 e^{-\frac{E}{RT} t}} \quad (4)$$

$$\ln \ln \frac{He_0}{He_t} = \ln k_0 + \ln t - \frac{E}{RT} \quad (5)$$

Поскольку это уравнение прямой линии в координатах $\ln \ln \frac{He_0}{He_t} - 1/T$, величину энергии активации миграции E и частотного фактора k_0 можно вычислить по параметрам этой линии.

Изучение кинетики выделения гелия из апатита проводится методом ступенчатого отжига. В данной работе измерения проводились на масс-спектрометре МСУ-Г-01-М в ИГГД РАН. Для измерения отбирается зерно около 1 мм, далее оно помещается в масс-спектрометр, и в вакууме происходит ступенчатый нагрев: постепенно повышается температура нагрева, на каждой ступени производится одинаковое количество измерений выделенного гелия. По полученным измерениям строится кривая выделения гелия в минерале.

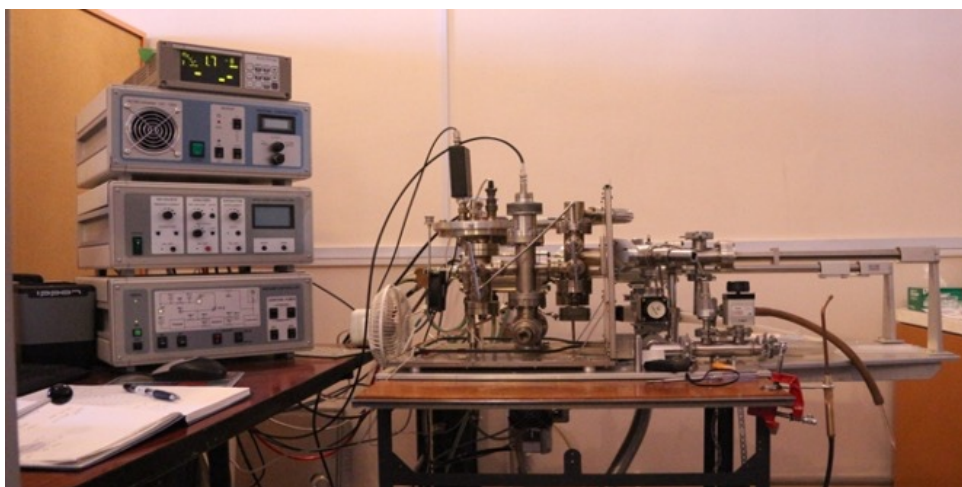


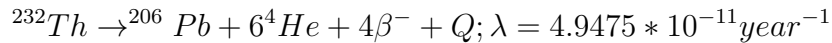
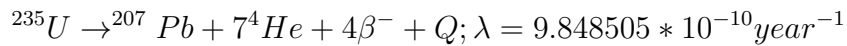
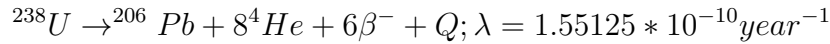
Рис. 7. Масс-спектрометр МСУ-Г-01-М для анализа микроколичеств гелия

3.4. Низкотемпературная геотермохронология

Низкотемпературная термохронология - раздел изотопной геохронологии, в котором температурно-временная эволюция геологических тел реконструируется на основе изотопного возраста, полученного для горных пород и минералов с помощью низкотемпературных методов.

3.4.1. (U-Th)/He метод

Геохронология по радиогенному гелию основана на альфа-распаде ^{235}U , ^{238}U и ^{232}Th , одним из стабильных продуктов которого является ^4He .



Где Q – выделенная энергия, λ – постоянная распада.

Иногда может учитываться гелий, полученный из радиоактивного распада ^{147}Sm , но из-за маленькой скорости распада эту составляющую чаще всего опускают.

Уравнение для накопленного радиогенного гелия выглядит следующим образом:

$$^4\text{He} = 8^{238}\text{U}(e^{\lambda^{238}t} - 1) + 7^{235}\text{U}(e^{\lambda^{235}t} - 1) + 6^{232}\text{U}(e^{\lambda^{232}t} - 1) \quad (6)$$

По накопленному гелию определяют "гелиевый возраст" минерала. Из-за того, что гелий крайне подвижный, при повышении температуры может произойти потеря гелия из минерала.

Температура закрытия – температура, при прохождении которой система становится закрытой (при остывании). Для каждого минерала и метода температура закрытия разные. Для (U-Th)/He системы система является закрытой когда в решетке начинает накапливаться гелий.

Для расчета температуры закрытия используется уравнение (Dodson, 1973):

$$T_c = R \frac{R}{E \ln \frac{A\tau D_0}{a^2}} \quad (7)$$

где R – газовая постоянная, E – энергия активации, τ – постоянная времени, с которой уменьшается коэффициент диффузии D , a – масштаб диффузии, A – численная константа, зависящая от геометрии и постоянной затухания (k) исходного вещества.

При датировании зерен следует учитывать эффекты (Рис. 8), связанные с большими тормозными путями альфа-частиц (имплантированная и эджектированная компоненты). Из-за высоких энергий и маленького размера, альфа-частицы, произведенные из U и Th имеют тормозной путь порядка нескольких миллиметров в воде и нескольких сантиметров в воздухе. В апатите альфа-частицы имеют тормозной путь до 22 мкм (Reiners et al., 2018).

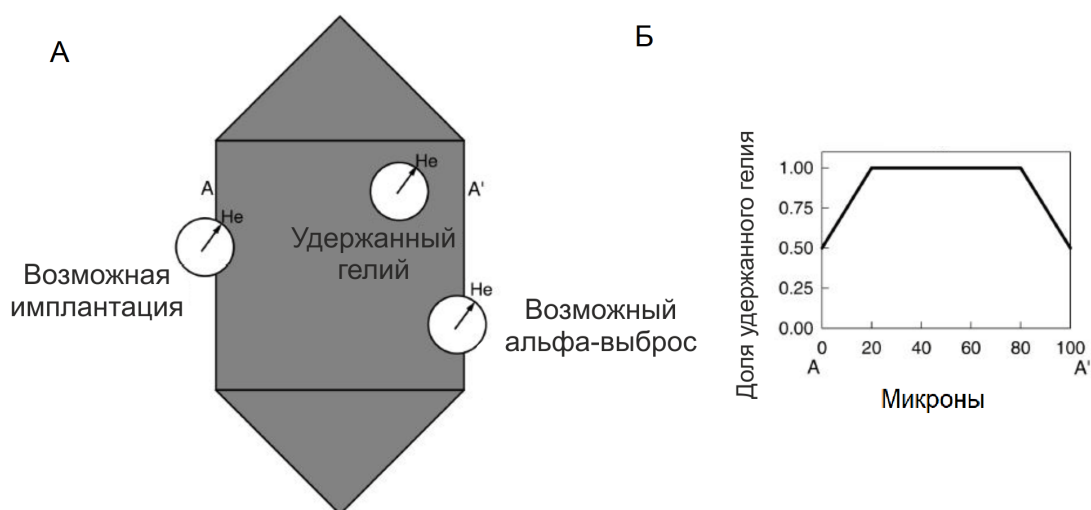


Рис. 8. По Farley (2002) А. Три варианта поведения гелия в кристалле. Центр круга обозначает нахождение родительского нуклида U или Th , и край белого круга с надписью He указывает геометрическое место точек, где альфа частица может остановиться. Стрелка указывает на одну из возможных траекторий. Б. График изменения доли удержанного гелия по линии $A-A'$

Альфа-выброс – эффект основан на том, что при распаде материнского изотопа альфа частица может вылететь за пределы минерала. Чем меньше зерно, тем больше вероятность потери радиогенного гелия. Для коррекции вводятся поправки, основанные на геометрии минеральных зерен (Reiners et al., 2018). При датировании фрагментов больших зерен введение поправки не требуется (Farley et al., 1996).

Имплантация – эффект основан на том, что в породе в соседстве с датировемым минералом мог быть еще источник радиогенного гелия, из-за чего в датировемый

минерал имплантируются альфа-частицы из внешнего материала. Если в породе датируемый минерал находился рядом с минералом с высоким содержанием гелия (например, циркон), полученный возраст для такого минерала может быть выше, чем есть на самом деле (Gautheron et al., 2012). Один из способов избежать эффект имплантации гелия – механическая абразия – с поверхности удаляется 20 мкм до проведения анализа. Это не решает проблему внутренней диффузии, которая может возникнуть в результате имплантации. Для получения достоверных данных с использованием этого метода, нужно использовать большие зерна, чтобы материала было достаточно для удаления (Spiegel et al., 2009).

Для датирования (U-Th)/He методом требуется измерить содержание He, U и Th в минерале. Порядок действий:

1) Отбор зерна

Для расчета возраста лучше всего выбирать однородные зерна без включений (Рис. 9), поскольку содержание включений может повлиять на концентрации гелия, урана и тория, и, как следствие, на конечный результат.

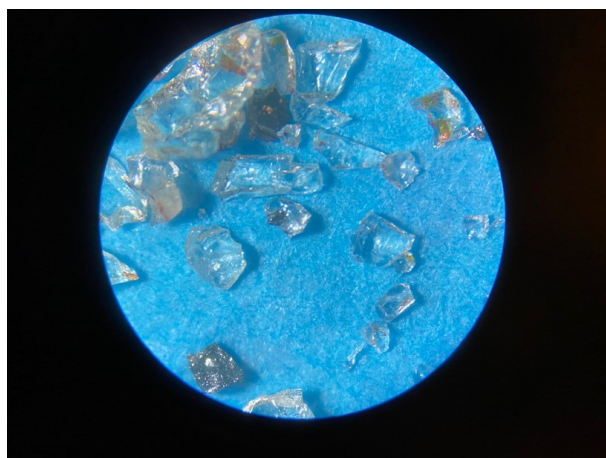


Рис. 9. Отбор зерна

По форме зерна должны быть близкие к идиоморфной, так как в дальнейшем может потребоваться коррекция альфа-выброса. Коррекция альфа-выброса может понадобиться, если зерно не является внутренним фрагментом больших зерен, так как в таких зернах выброс гелия будет уравновешен внедрением гелия из соседних зон. По размеру зерна должны быть больше 50 мкм, в которых содержится больше вещества для анализа, что приводит к более высокой аналитической точности, из-за того, что альфа-частица при радиоактивном распаде

может пролетать расстояние около 22 мкм (Reiners et al., 2018).

2) Измерение гелия

Для удобства первым измеряется гелий. В контексте данной работы измерения проводились на масс-спектрометре МСУ-Г-1 в ИГГД РАН. Для измерения заранее отобранное зерно кладется в конвертик из танталовой фольги (Рис. 10), после чего загружается в сам масс-спектрометр. Далее конвертик с зерном подвергается ступенчатому нагреву в высоковакуумной печи. Образец сначала греется на температуре 400 °С, далее температура постепенно повышается, на каждой "ступени" проводится около 5 съемок спектра. Гелий выделяется при нагреве до 1100 °С, измерения проводятся до тех пор, пока гелий не перестанет выделяться в камеру при увеличении температуры. После измерений конвертик извлекается.

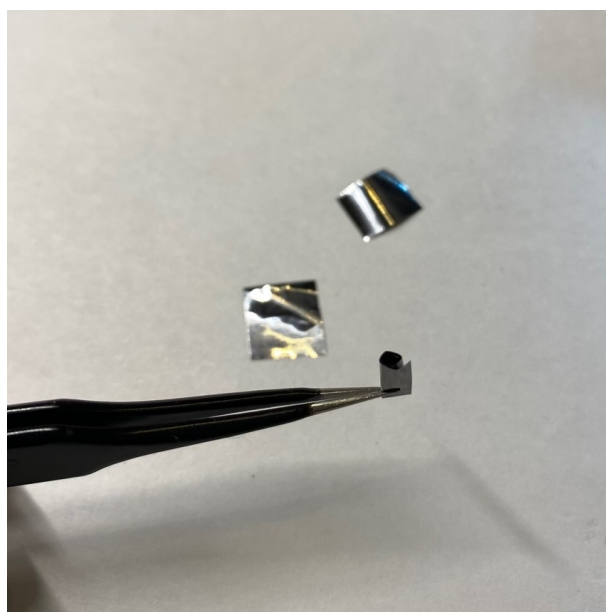


Рис. 10. Конвертик из танталовой фольги

3) Измерение U, Th

Следующим этапом является измерение изотопов урана и тория. После измерения гелия к апатиту добавляется смешанный трассер $^{235}\text{U} - ^{230}\text{Th}$, после чего происходит разложение в концентрированной кислоте HNO_3 . Измерение U и Th проводятся на ICP-MS в 5% растворе HNO_3 . В контексте данной работы измерения проводились в ГЕОХИ РАН на ICP-MS ELLEMENT XR (Thermo Scientific).

4) Расчет возраста

По измеренным данным можно посчитать гелиевый возраст минерала. Измеренные содержания гелия, урана и тория переводятся к атомарным. Уравнение (x) не имеет аналитического решения относительно t . Поэтому для расчета используется формула (10) для приближенного вычисления (Meesters and Dunai, 2005).

Сначала высчитывается P – современная скорость производства гелия:

$$P = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 \quad (8)$$

где $p_1 = 8\lambda_1[^{238}U]$, $p_2 = 7\lambda_2[^{235}U]$, $p_3 = 6\lambda_3[^{232}Th]$, $p_4 = \lambda_4[^{147}Sm]$ (опционально)

Потом для вычисления необходимо найти средневзвешанную константу распада:

$$\lambda_{mw} = \sum_j \frac{p_j \lambda_j}{P} \quad (9)$$

Итоговая формула для вычисления возраста:

$$t = \frac{1}{\lambda_{mw}} \ln\left(1 + \frac{\lambda_{mw}}{P} [He]\right) \quad (10)$$

где t - рассчитываемый возраст, λ_{mw} - средневзвешанная константа распада, P - современная скорость производства гелия, $[He]$ - атомное количество гелия.

Для удобства используется программа IsoplotR (Vermeesch, 2018).

3.4.2. Трековый метод

Трековый метод основан на спонтанном делении ^{238}U . При спонтанном делении атом урана делится на два дочерних изотопа примерно одинаковой массы. При делении два дочерних изотопа "разлетаются" в разные стороны, из-за чего движущаяся частица нарушает целостность решетки, в результате чего образуются треки деления (радиационные дефекты (Рис. 11)) (Gleadow et al., 2002). Спонтанное деление также происходит в ^{234}U , ^{235}U и ^{232}Th , но периоды полураспада у этих изотопов крайне малы, чтобы производить достаточное количество естественных треков по сравнению с ^{238}U (Hurford, 2019).

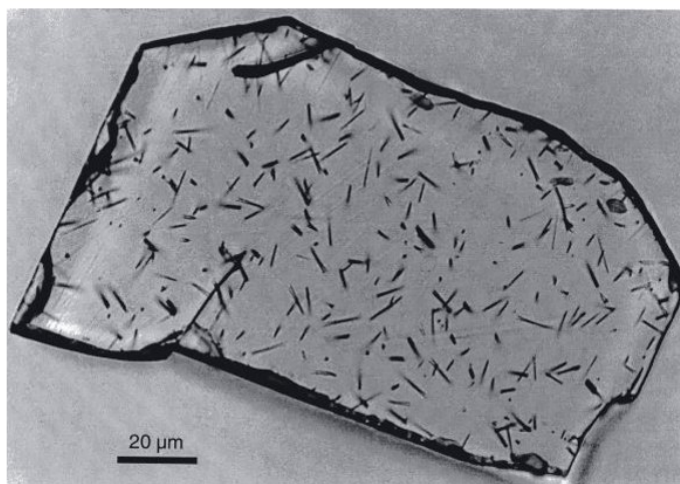


Рис. 11. Радиационные дефекты – треки (Gleadow et al., 2002)

1) Подготовка

Для изучения отбираются зерна без включений, имеющие хорошую оптическую видимость. Из отобранных зерен готовятся пластинки на стеклах с помощью эпоксидной смолы. После застывания смолы пластинки требуется отполировать, чтобы в итоге зерна апатита были вскрыты и отполированы (Chung, 2014).

2) Травление

Поскольку размер треков не превышает 60 микрон, для подсчета треков требуется провести химическое травление. Для этого предварительно отполированную пластинку требуется при 20°C опустить на 20 секунд в 5 М раствор HNO_3 . После этих процедур размер треков будет достаточен для детектирования их в микроскопе с увеличением 100х.

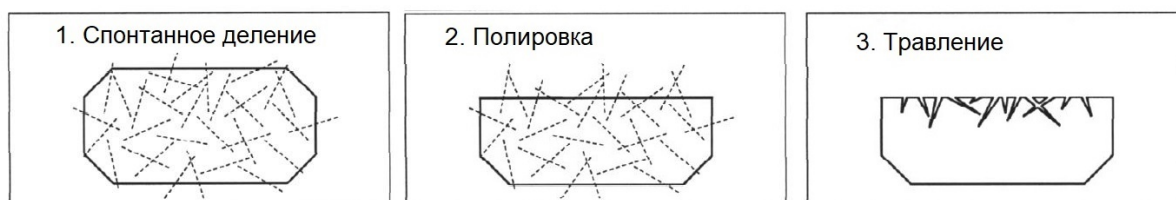


Рис. 12. Этапы подготовки пластинки (Gleadow et al., 2002)

4. Результаты

4.1. Химический состав

Для подтверждения того, что анализируемые зерна действительно являются апатитом был проведен микронзондовый анализ фрагментов зерен в РЦ "Микроскопии и Микроанализа". Результаты этих измерений подтвердили, что все зерна являются апатитом, однако рассчитать его состав из этих измерений не представлялось возможным. Для определения более точного состава апатита из части этих зерен была сделана шайба и изучена в РЦ "Геомодель" результаты представлены в таблице 2. Спектры 1-5 – образец 43-Я, спектры 6-10 – 333.

Таблица 2. Результаты

№ спектра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P2O2	43.83	44.21	45.64	43.39	43.26	45.17	43.86	44.57	44.55	43.67
SiO2	0.55	0.59	0.45	0.59	0.23	0.17	0.34	0.13	0.26	0.32
CaO	56.73	56.67	57.77	55.25	55.65	56.32	55.08	55.73	55.6	54.05
SrO	–	–	–	–	–	0.21	0.19	0.24	0.21	0.19
F	1.12	1.18	1.3	1.02	1.41	1.37	1.2	1.44	1.17	1.53
Cl	–	0.05	–	–	0.05	–	–	–	–	0.05

Для определения наличия гидроксил группы была сделана ИК-спектроскопия.

Полученный ИК-спектр (Рис. 13) является достаточно типичным для фосфатных апатитов. Помимо этого, регистрируется незначительная примесь карбонат-иона. Также, полосы поглощения при 3544 и 3573 см^{-1} свидетельствуют о наличии гидроксил-иона.

Супергруппа апатита имеет формулу (Pasero et al., 2010): $M_1M_2M_3(PO_4)_X$. Где $M = Ca^{2+}, Pb^{2+}, Sr^{2+}$ и др., $T = P^{5+}, As^{5+}, Si^{4+}$ и др., $X = F^-, (OH)^-, Cl^-$. При расчетах формул (Булах et al., 2014) коэффициент F не превышает 0.3. Таким образом, данный апатит можно характеризовать как гидроксилapatит с примесями Si (в позиции T), Sr и Na (в позиции M). Более точной классификации для поставленных целей работы не требуется.

В апатите встречается множество флюидных включений, а также минеральные включения (диопсид и бадделлит) (Рис. 17) При исследовании сколов образцов с помощью электронного микроскопа, на поверхности замечены полости, заполненных

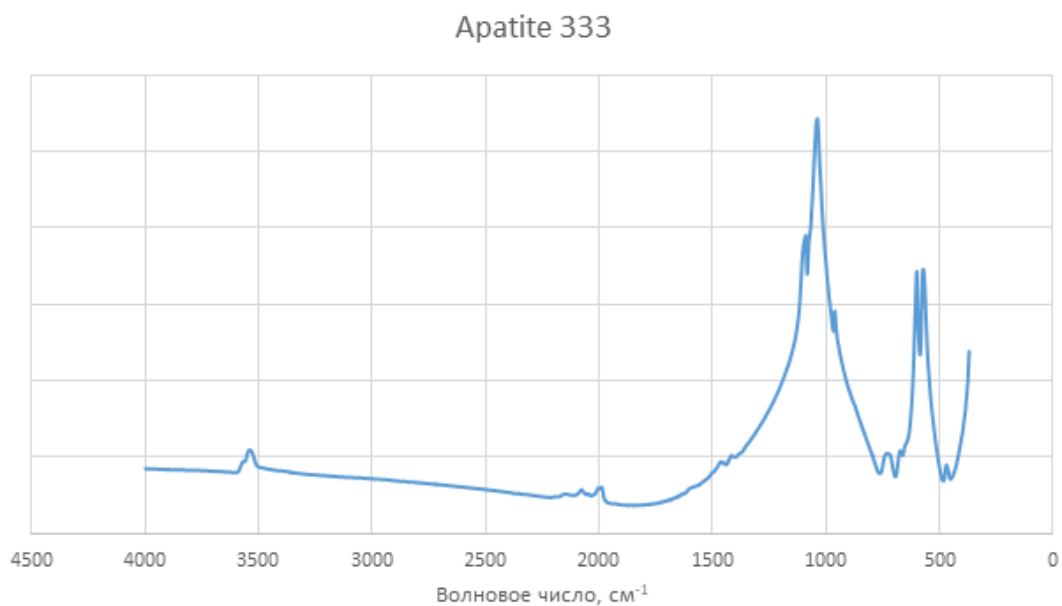


Рис. 13. ИК-спектр поглощения апатита 333

минеральными включениями, такими как: соединения золота, серебра, железа и др (Рис. 14, 15, 16). Поскольку эти соединения исследовались не в полированном виде, рассчитать их формулу невозможно.

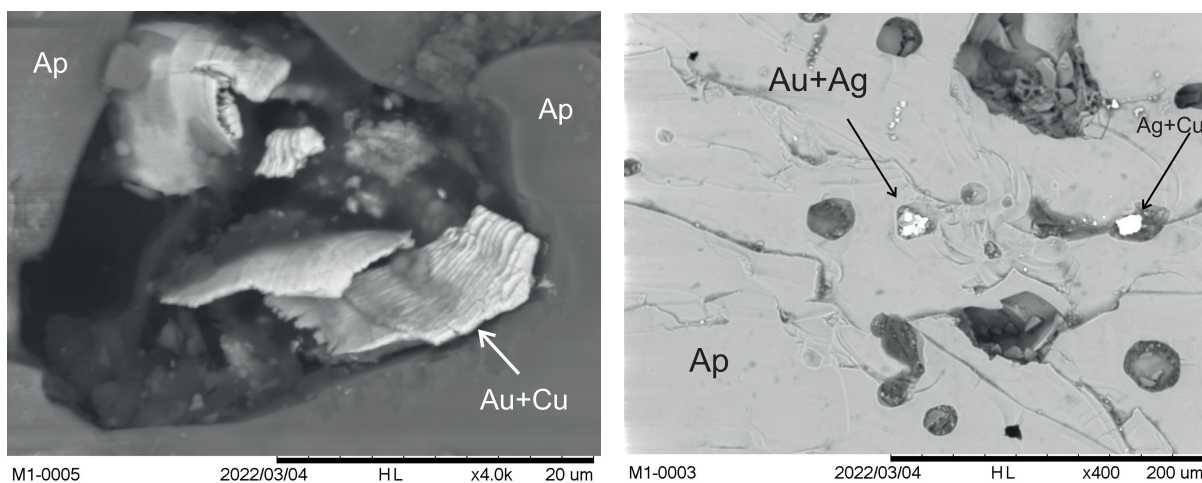


Рис. 14. Рудные включения соединений серебра (Ag), золота (Au) и меди (Cu) в апатите (Ap), образец M1

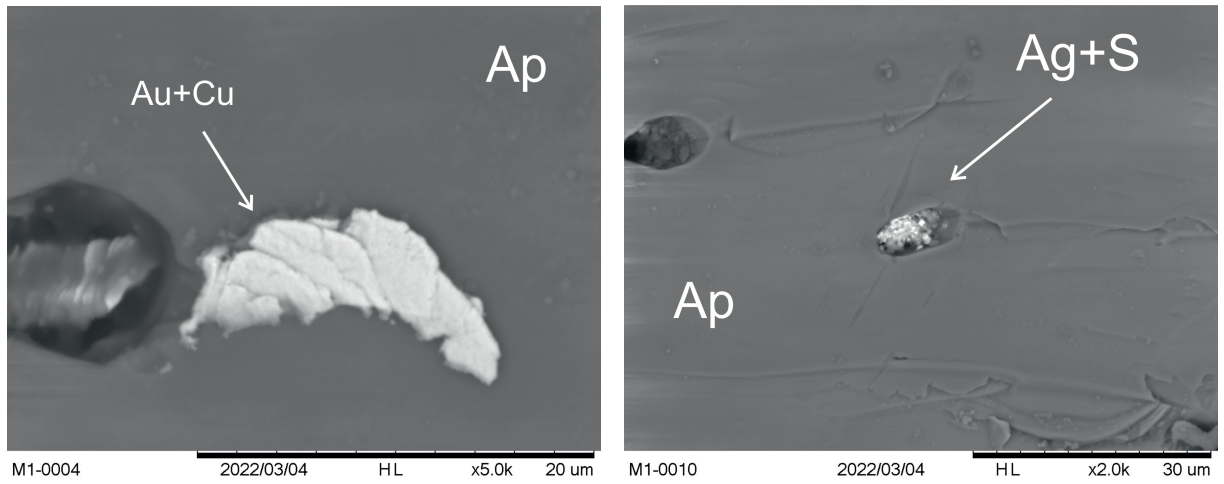


Рис. 15. Рудные включения соединений серебра (Ag) и серы (S), золота (Au) и меди (Cu) в апатите (Ap), образец M1

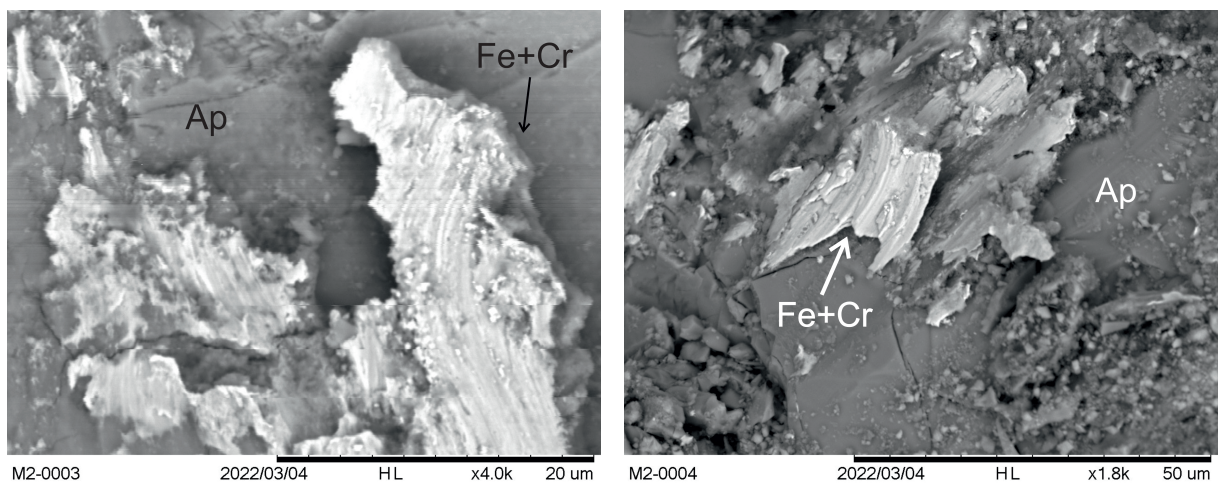


Рис. 16. Рудные включения соединений железа (Fe) и хрома (Cr) в образце M2

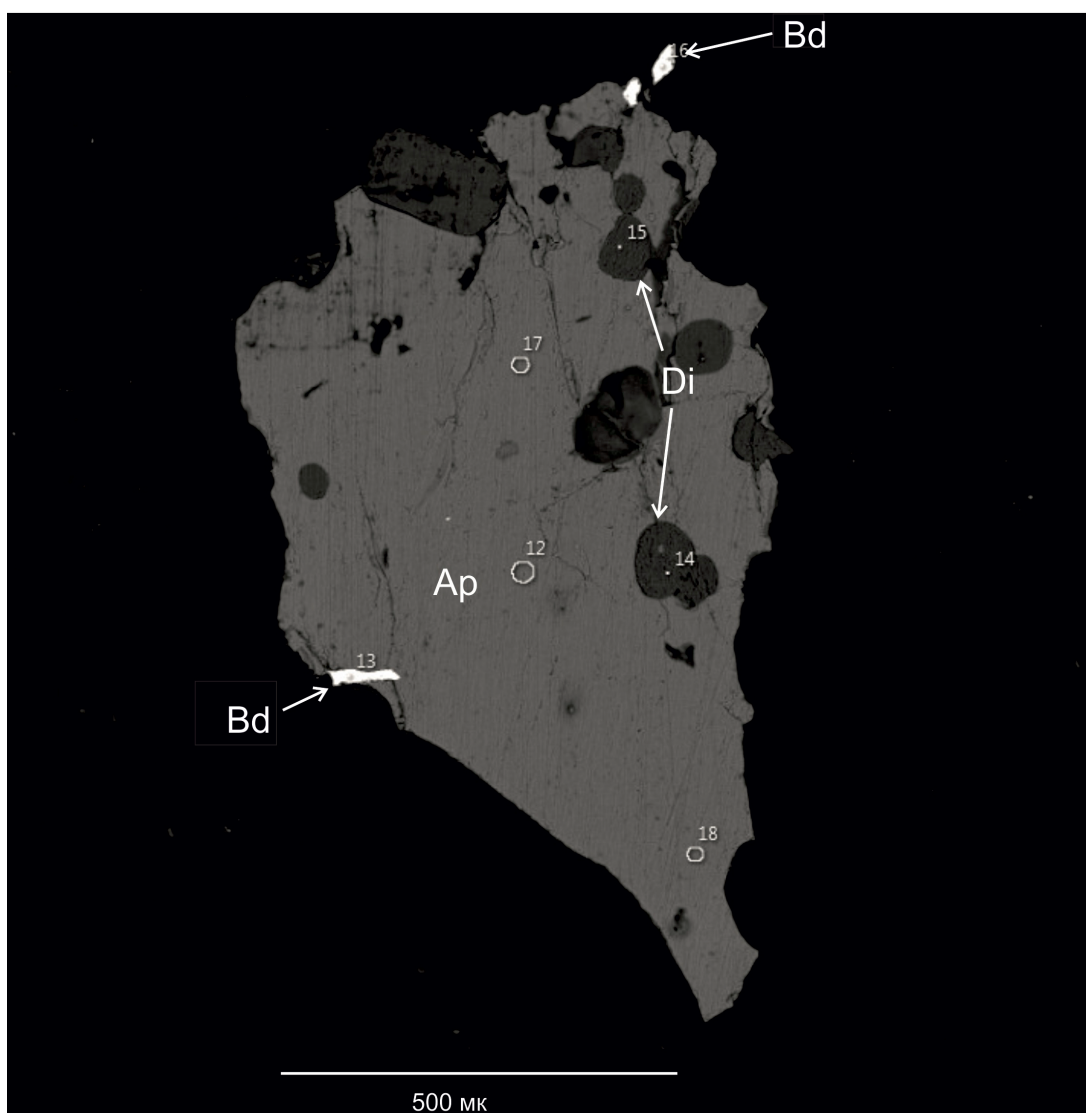


Рис. 17. Включения бадделеита (Bd) и диопсида (Di) в апатите (Ap), образец 333

4.2. Трековое датирование

При изучении подготовленных пластинок под оптическим микроскопом, обнаружили нетипичные формы дефектов, отличные от треков (Рис. 18). В литературе описывается как дислокации в структуре (Gleadow et al., 2002). Наличие дислокаций затрудняет достоверный подсчет треков, и, как следствие - трековое датирование.

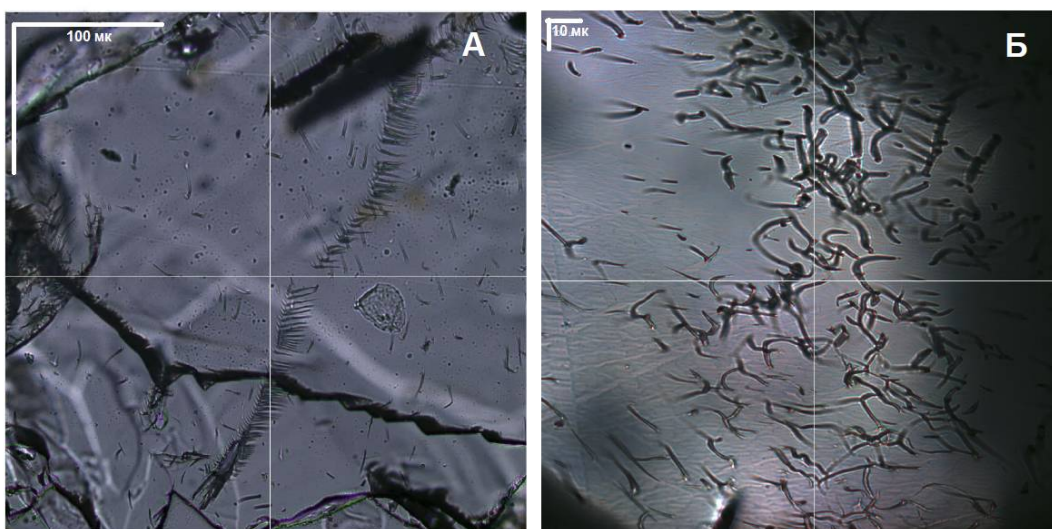


Рис. 18. Дислокации в образцах 333 (А) и 43-я (Б)

4.3. U-Th-He датирование

Для проверки надежности последующих измерений, было проведено датирование апатита Дуранго. Этот апатит является эталонным в (U-Th)/He датировании, поэтому, воспроизводимость и совпадение с литературными данными результатов указывает на то, что техника датирования надежна. Результаты датирования представлены в таблице. Все результаты имеют воспроизводимый возраст, совпадающий с литературными данными (Zeitler et al., 1987).

Таблица 3. Данные расчета возрастов апатита Durango

№	[He]	err[He]	[U]	err[U]	[Th]	err[Th]	t	s(t)
Dur-4(1)	$1.7 \cdot 10^{12}$	$2.7 \cdot 10^{11}$	$7.8 \cdot 10^{12}$	$1.31 \cdot 10^{12}$	$1.4 \cdot 10^{14}$	$2.42 \cdot 10^{13}$	33.11	5.33
Dur-4(2)	$7 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^9$	$3.6 \cdot 10^{12}$	$6.82 \cdot 10^{11}$	$5.9 \cdot 10^{13}$	$1.06 \cdot 10^{13}$	31.67	1.27

Результаты датирования апатита Кондёр представлены в таблице. Возрасты имеют высокую дисперсию значений. Для образца 43-Я значения варьируются от 68 млн

лет до 92 млн лет, средний возраст – 79.2 млн лет. Для образца 333 характерен разброс значений от 83 до 104 млн лет, средний возраст – 82.8 млн лет. Полученные значения имеют высокую дисперсию.

Таблица 4. Данные расчета возрастов апатита Кондёр

№	[He]	err[He]	[U]	err[U]	[Th]	err[Th]	t	s(t)
43-Я-1	$1.67 \cdot 10^{12}$	$5.97 \cdot 10^9$	$2.9 \cdot 10^{12}$	$4.15 \cdot 10^{11}$	$4.3 \cdot 10^{13}$	$4.97 \cdot 10^{12}$	70.4	2.3
43-Я-2	$3.37 \cdot 10^{12}$	$5.97 \cdot 10^9$	$7.46 \cdot 10^{12}$	$1.3 \cdot 10^{12}$	$8.97 \cdot 10^{13}$	$1.28 \cdot 10^{13}$	92.7	4.3
43-Я-3	$1.34 \cdot 10^{12}$	$5.97 \cdot 10^9$	$2.83 \cdot 10^{12}$	$3.52 \cdot 10^{11}$	$5.42 \cdot 10^{13}$	$4.32 \cdot 10^{12}$	67.8	1.6
43-Я-4	$2.78 \cdot 10^{12}$	$2.54 \cdot 10^{10}$	$7.65 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{11}$	$8 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{12}$	86	3
333-1	$3.16 \cdot 10^{11}$	$6 \cdot 10^9$	$7.25 \cdot 10^{11}$	$1.08 \cdot 10^{11}$	$9.54 \cdot 10^{12}$	$7.02 \cdot 10^{11}$	83.9	3.5
333-2	$9.69 \cdot 10^{11}$	$1.16 \cdot 10^{10}$	$2.07 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{13}$	$8 \cdot 10^{11}$	104	9
333-3	$5.32 \cdot 10^{11}$	$2.7 \cdot 10^8$	$1.48 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{13}$	$6 \cdot 10^{11}$	83	3.5
333-4	$1.26 \cdot 10^{12}$	$6 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{12}$	88	3

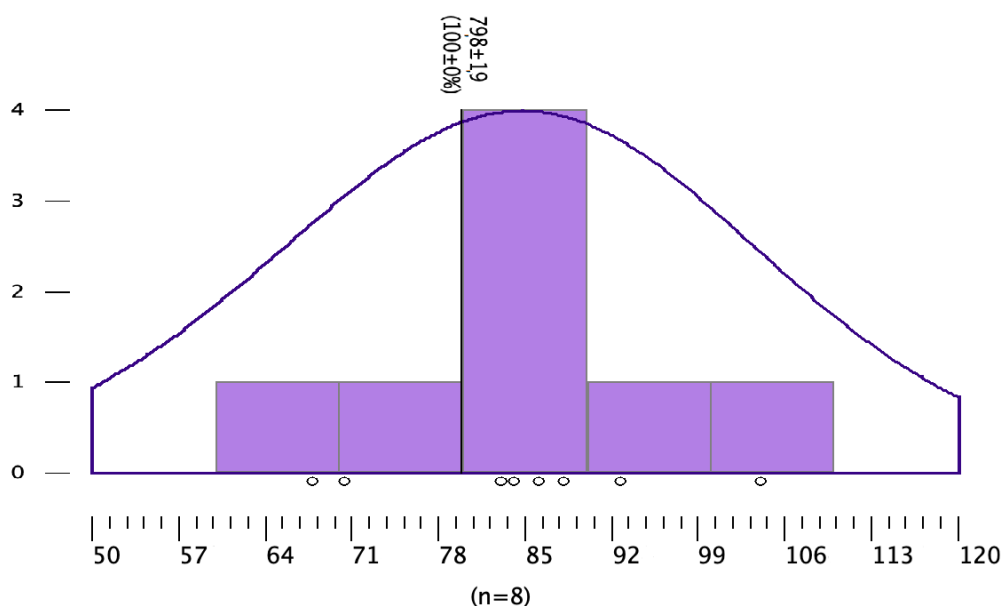


Рис. 19. Гистограмма полученных значений возрастов апатита Кондёр

4.4. Кинетика выделения гелия

Поскольку в литературе наличие дислокаций связывается с аномалиями поведения гелия в образцах (McDannell et al., 2018), был проведен анализ кинетики выделения гелия в апатите Кондёр и в стандартном апатите Дуранго.

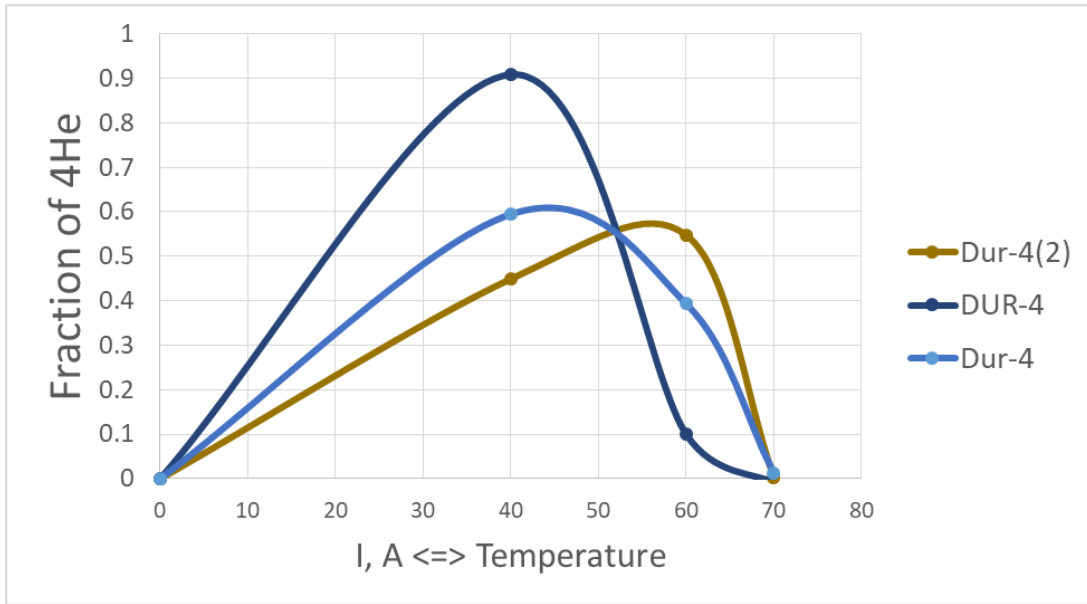


Рис. 20. Кинетика выделения гелия в стандартном апатите Дуранго

В стандартном апатите Durango большая часть гелия выделялась на 40 ампер, т.е. примерно при 700 °С.

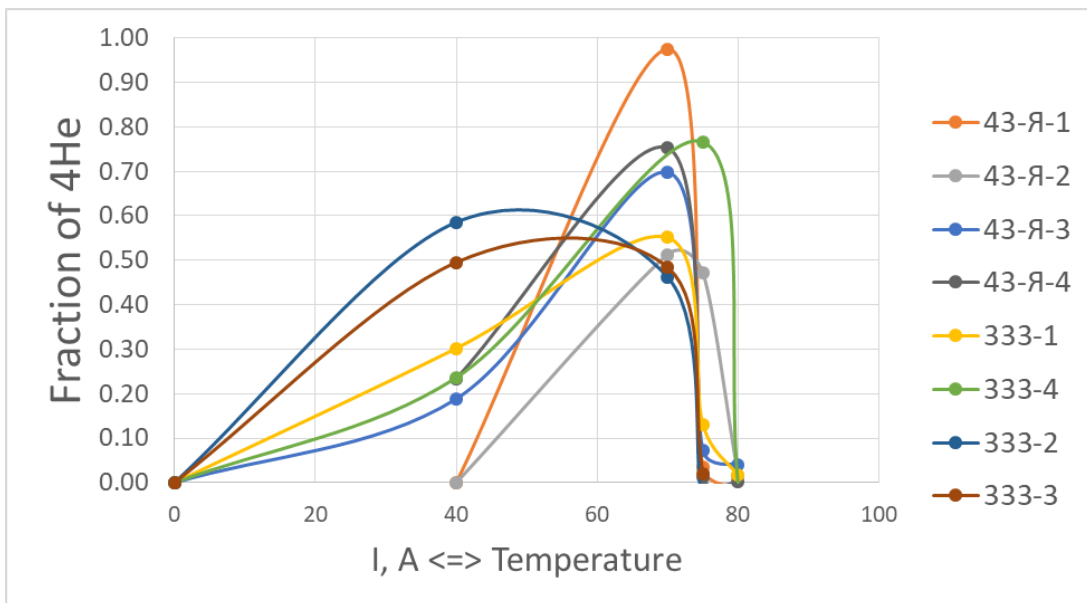


Рис. 21. Кинетика выделения гелия в апатите Кондёр

В апатите из месторождения Кондёр большая часть гелия выделялась примерно при 900-1000 °С.

Исследования проводились при одинаковых условиях съемки (длительность нагрева) и для зерен близкого размера.

5. Обсуждение

5.1. Дислокации

Дислокации в кристаллах могут образовываться как при росте кристалла, так и после кристаллизации (Пунин and Штукенберг, 2008). Дислокации, образованные при росте делятся на краевые и винтовые. Эти виды дислокаций образуются в процессе роста кристаллов из-за напряжений, возникающих вследствие неоднородностей химического состава кристалла или при образовании автодеформационных дефектов.

Дислокации, образованные после кристаллизации образуются в результате воздействия внешних сил. Такие дислокации невелики и часто имеют искривленную и петлеобразную форму (Амелинкс, 1968; Гречушников et al., 1981). Время образования таких дислокаций определить невозможно.

Морфологически дислокации, обнаруженные в апатите Кондёр похожи на дислокации, образованные в результате внешнего воздействия. Такие дислокации могли возникнуть при тектонических событиях. Среди таких событий: тектоническое поднятие в неоген-четвертичное время (Хорошилова et al., 1993) или при внедрении более молодых субкомплексов (после косьвитов). В первом варианте коррекция результатов не требуется, но для второго требуется коррекция оценки температуры закрытия.

По графику кинетики выделения гелия видно, что гелий в апатите Кондёр удерживается лучше, чем в стандартном апатите Дуранго, что также может быть связано с наличием дислокаций.

5.2. Термохронологические реконструкции

Возрасты, полученные низкотемпературными методами соответствуют времени, когда образец прошел определенную глубину.

Для стандартного апатита Durango температура закрытия (U-Th)/He системы равна примерно 70° (Farley, 2000). Эта же температура обычно используется для интерпретации полученных данных (Wolf et al., 1996). Но минералов из разных мест кинетические параметры могут отличаться, как в случае апатита из месторождения Кондёр. Для расчета температуры закрытия используется формула (Dodson, 1973), в которой используется энергия активации (один из кинетических параметров).

В случае апатита из месторождения Кондёр температура закрытия будет равна примерно 100 °.

Геотермический градиент – параметр, характеризующий скорость изменения температуры горных пород с изменением глубины. Средний термический градиент для верхней части континентальной земной коры – 30°C/км (Петров, 2010).

Таким образом, температуре закрытия (U-Th)/He системы в апатите Кондёр будет соответствовать глубина около 3 км.

Зная возраст прохождения определенной температуры образцом, можно посчитать скорость эксгумации. Эксгумация – процесс выведения на поверхность Земли породы (Петров, 2010). Эксгумация может совершаться за счет тектонических процессов (тектоническая эксгумация) и за счет эрозии (England and Molnar, 1990).

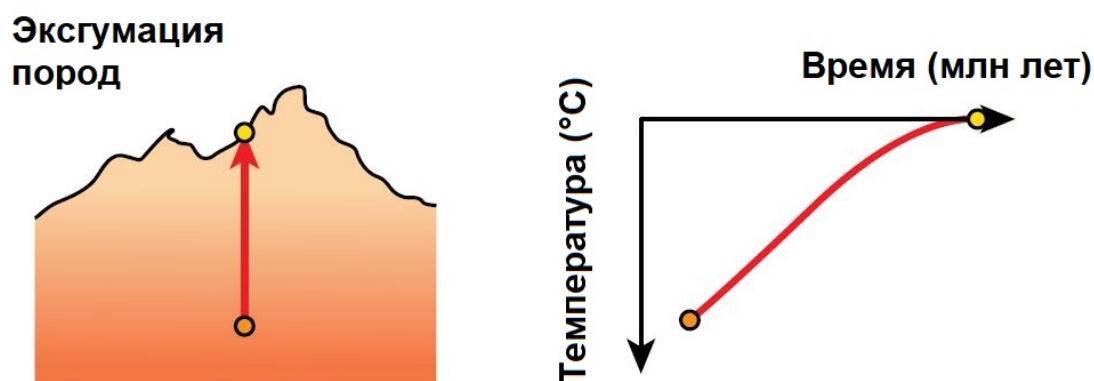


Рис. 22. Эксгумация пород и график T-T – зависимость температуры от времени, по Flowers et al. (2022)

Скорость эрозии варьирует в зависимости от геологической обстановки. Обстановка, в которой находится массив Кондёр (плоскогорье) имеет среднюю скорость эрозии 30-40 м/млн лет (Dunai, 2010).

Средний полученный возраст апатита – около 80 млн лет. Это означает, что примерно 80 млн лет назад датируемые образцы были на глубине 3 км. В неоген-четвертичное время произошло тектоническое поднятие (Хорошилова et al., 1993) на 600 м. Таким образом, можно рассчитать среднюю скорость эксгумации за период с 80 до 24 млн лет. Средняя скорость эксгумации составляла около 42 м/млн лет.

Таким образом можно утверждать, что массив выводился на поверхность только за счет эрозии, и тектонической активности в интервале времени с 80 до 24 млн лет в районе массива не было.

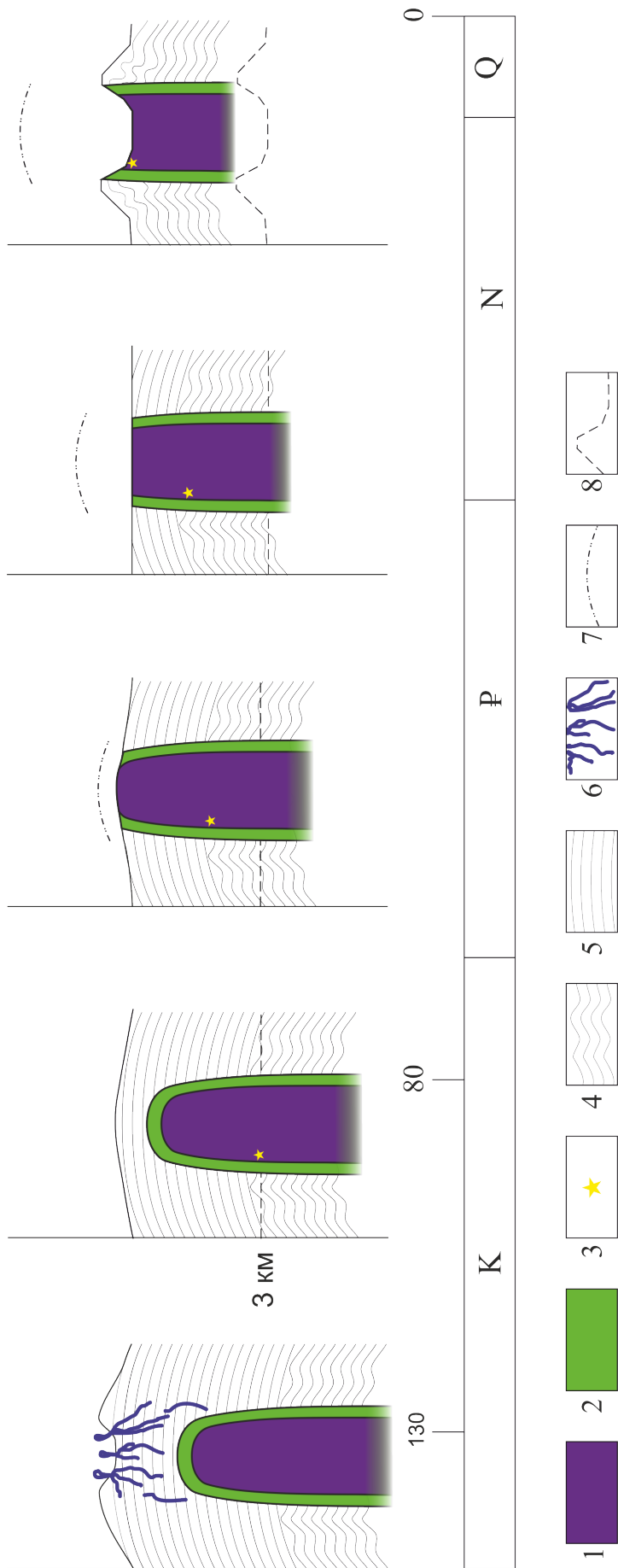


Рис. 23. Дополненная модель экзгумации (по Хорошилова et al. (1993), с изменениями. Условные обозначения: 1 – Кондёрский комплекс; 2 – Алданский комплекс; 3 – место взятия пробы; 4 – породы кристаллического фундамента; 5 – осадочные породы платформенного чехла; 6 – флюиды; 7 – предполагаемая поверхность первичного купола; 8 – изотерма, соответствующая 100 °С

Заключение

Массив Кондёр в период 80-24 млн лет эксгумировался только за счёт эрозии, что подтверждает предположение о том, что накоплению высоких концентраций платины в россыпях способствовала длительная пенецилизация.

Различие в кинетике выделения гелия в исследуемом и в эталонном апатитах указывает на связь наличия дислокаций и увеличении сохранности гелия в апатите, что подтверждает предположение о том, что для корректной интерпретации U-Th-He данных необходимо исследовать миграционные параметры в каждом конкретном зерне.

Список литературы

- 12 International Platinum Symposium Field trip 2 : PGM placer deposits and their sources in the ultramafic and alkaline rocks of the concentrically zoned Konyor massif, Far East, Russia / Mochalov A. G., Golovkin S. A., Petrov S. V., Borozdin A. P., Yakibovich O. V., Safay A. A., Prikhodko V. S., Antonov A. A., and Korneev S. I. — 2014.
- Мочалов А. Г. Замечательные минералы платины массива Кондёр (Хабаровский край). — Москва, 2019. — Р. 128. — ISBN: 978-5-6044022-1-4.
- Хорошилова Т. С., Мочалов А. Г., Махоркина Т. И. Россыпные месторождения "Кондер" и "Чад" Аяно-Майского района хабаровского края. — Магадан, Москва, 1993.
- Геология, петрология и рудоносность Кондёрского массива / Гурович В. Г., Землянухин В. Н., Емельяненко Е. П., Каретников А. С., Квасов А. И., Лазаренков В. Г., Малич К. Н., Мочалов А. Г., С. Приходько В., and Степашко А. А. — 1994.
- Savatenkov V., Mochalov A. Age and sources of dunites of Kondyor massive (Aldan shield) // Доклады Академии Наук. — 2018. — Vol. 482, no. 5. — P. 577–582.
- Емельянов А. А., Моралев В. В. О возрасте массивов щелочных пород Алданской и Южно-Верхоянской провинций // Изв. ВУЗов, геология и разведка. — 1973. — P. 15–23.
- Continental Crust Evolution with (U-Th)/ He Thermochronology : A Review / Gautheron C, Hueck Mathias, Ternois S, Heller Beatrix, Sarda Philippe, and Tassan-got Laurent. — 2022.
- Geothermochronology based on noble gases: I. Stability of the U-Xe isotopic system in nonmetamict zircons / Shukolyukov Yu A., Fugzan M. M., Paderin I. P., Sergeev S. A., and Krylov D. P. // Petrology. — 2009. — Vol. 17, no. 1. — P. 1–24.
- Dodson Martin H. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems // Contributions to Mineralogy and Petrology. — 1973. — Vol. 40, no. 3. — P. 259–274. — Access mode: <https://doi.org/10.1007/BF00373790>.
- Geochronology and thermochronology / Reiners P.W., Carlson R.W., Renne P.R., Cooper K.M., Granger D.E., McLean N.M., and Schoene B. — 2018. — P. 464.

- Farley Kenneth A. (U-Th)/He dating: Techniques, calibrations, and applications // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. — 2002. — Vol. 47. — P. 819–844.
- Farley K. A., Wolf R. A., Silver L. T. The effects of long alpha-stopping distances on (U-Th)/He ages // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. — 1996. — nov. — Vol. 60, no. 21. — P. 4223–4229.
- Accounting for long alpha-particle stopping distances in (U–Th–Sm)/He geochronology: 3D modeling of diffusion, zoning, implantation, and abrasion / Gautheron Cécile, Tassan-Got Laurent, Ketcham Richard A., and Dobson Katherine J. // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. — 2012. — nov. — Vol. 96. — P. 44–56.
- Apatite (U-Th-Sm)/He thermochronology of rapidly cooled samples: The effect of He implantation / Spiegel Cornelia, Kohn Barry, Belton David, Berner Zsolt, and Gleadow Andrew // *Earth and Planetary Science Letters*. — 2009. — Vol. 285, no. 1-2. — P. 105–114.
- Meesters A. G.C.A., Dunai T. J. A noniterative solution of the (U-Th)/He age equation // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. — 2005. — Vol. 6, no. 4. — P. 4–6.
- Vermeesch Pieter. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology // *Geoscience Frontiers*. — 2018. — Vol. 9, no. 5. — P. 1479–1493. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>.
- Fission track dating of phosphate minerals and the thermochronology of apatite / Gleadow Andrew J.W., Belton David X., Kohn Barry P., and Brown Roderick W. // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. — 2002. — Vol. 48, no. May 2016. — P. 579–630.
- Hurford Anthony J. An Historical Perspective on Fission-Track Thermochronology // *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology* / ed. by Fitzgerald P. G., Malusà M. G. — Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment, 2019.
- Chung Ling. Sample preparation technique used by the University of Melbourne. — Melbourne, 2014. — P. 1–15.

- Nomenclature of the apatite supergroup minerals / Pasero Marco, Kampf Anthony R., Ferraris Cristiano, Pekov Igor V., Rakovan John, and White Timothy J. // *European Journal of Mineralogy*. — 2010. — Vol. 22, no. 2. — P. 163–179.
- Булах А. Г., Золотарёв А. А., Кривовичев В. Г. Структура, изоморфизм, формулы, классификация МИНЕРАЛОВ. — 2014. — ISBN: 9785288054839.
- U-Th-He dating of apatite: A potential thermochronometer / Zeitler P. K., Herczeg A. L., McDougall I., and Honda M. — 1987. — Vol. 51. — P. 2865–2868.
- Screening apatites for (U-Th)/He thermochronometry via continuous ramped heating: He age components and implications for age dispersion / McDannell Kalin T., Zeitler Peter K., Janes Darwin G., Idleman Bruce D., and Fayon Annia K. // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. — 2018. — Vol. 223. — P. 90–106. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.11.031>.
- Пунин Ю. О., Штукенберг А. Г. Автодеформационные дефекты кристаллов. — Санкт-Петербург : Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2008. — P. 318. — ISBN: 978-5-288-04759-6.
- Амелинкс С. Методы прямого наблюдения дислокаций. — Мир, 1968. — P. 440.
- Современная кристаллография. Том 4. Физические свойства кристаллов / Гречушников Б.Н., Желудев И.С., Залесский А.В., Пикин С.А., Семилетов С.А., Чистяков И.Г., Урусовская А.А., and Шувалов Л.А. — Москва : Наука, 1981. — P. 496.
- Farley K. A. Helium diffusion from apatite: General behavior as illustrated by Durango fluorapatite // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 2000. — Vol. 105, no. B2. — P. 2903–2914.
- Wolf R. A., Farley K. A., Silver L. T. Helium diffusion and low-temperature thermochronometry of apatite // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. — 1996. — nov. — Vol. 60, no. 21. — P. 4231–4240.
- Петров О. В. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ В ТРЕХ ТОМАХ. Том третий. — Издательство ВСЕГЕИ, 2010.
- England P., Molnar P. Surface uplift, uplift of rocks, and exhumation of rocks // *Geology*. — 1990. — Vol. 18, no. 12. — P. 1173–1177.

(U-Th)/ He chronology : Part 1 . Data , uncertainty , and reporting / Flowers R M, Zeitler P K, Danišik M, Reiners P W, Gautheron C, Ketcham R A, Metcalf J R, Stockli D F, Enkelmann E, and Brown R W. — 2022. — no. April. — P. 1–33.

Dunai T. J. Cosmogenic Nuclides: Principles, Concepts and Applications in the Earth Surface Sciences. — 2010.