

**Российская Академия Наук
Уральское отделение
Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого**

На правах рукописи

**ХИЛЛЕР
Вера Витальевна**

**СОСТАВ, КРИСТАЛЛОХИМИЯ, ЭВОЛЮЦИЯ U-Th-Pb-СИСТЕМЫ
РЯДА МИНЕРАЛОВ-ГЕОХРОНОМЕТРОВ ПО ДАННЫМ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность: 25.00.05 – минералогия, кристаллография

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Екатеринбург – 2010

Работа выполнена в Институте геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург).

Научный руководитель: Член–корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук **Вотяков С.Л.**

Научный консультант: Доцент, кандидат физико-математических наук **Щапова Ю.В.** (Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург)

Официальные оппоненты: Доктор геолого-минералогических наук **Краснобаев А.А.** (Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург)

Кандидат физико-математических наук **Мурзакаев А.М.** (Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург)

Ведущая организация Институт минералогии УрО РАН (г. Миасс)

Защита диссертации состоится **23 ноября 2010 года в 14⁰⁰** часов на заседании диссертационного совета Д 004.021.02 при Институте геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН по адресу: 620151, г. Екатеринбург, пер. Почтовый, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геологии и геохимии УрО РАН и на сайте <http://www.igg.uran.ru>.

Автореферат разослан « 22 » октября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д. 004.021.02,
кандидат геолого-минералогических наук

Чашухин И.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Уран и торий – наиболее распространенные элементы среди актиноидов; они образуют собственные минеральные виды (уранинит, коффинит, торианит, торит и др.), а также входят в виде изоструктурной примеси в некоторые минералы (монацит, циркон, ксенотим и др.). Для U-Th-содержащих минералов типичны сложная кристаллохимия, разнообразие типов изоморфизма, радиационное разрушение структуры (метамиктизация), гетерогенность зерен по химическому составу и возрасту. Исследования кристаллохимических и структурных особенностей этих минералов актуальны в связи с их использованием в качестве минералов-геохронометров, а также для прогнозирования долговременной стабильности разрабатываемых на их основе вейст-форм для утилизации радионуклидов.

Абсолютное датирование – одна из центральных задач в науках о Земле. В последнее десятилетие для решения этой задачи получил новый импульс метод химического (неизотопного) датирования, основанный на электронно-микронном анализе; популярность метода дополнительно выросла в связи с развитием расчетных подходов к определению возраста. В настоящее время известны четыре основных расчетных метода: датирование из единичного анализа в точке [Montel et al., 1996]; из Me*-Pb-изохроны (Me* – «модифицированные» содержания Th и U) - метод CHIME (chemical Th-U-total Pb isochron method) [Suzuki et al., 1991]; из расчёта U/Pb и Th/Pb-возрастов с представлением аналитических данных в трёхмерном Th-U-Pb-пространстве [Rhede et al., 1996] или на упрощенной двумерной Th/Pb-U/Pb-диаграмме без поправки на нерадиогенный свинец [Cocherie, Albarede, 2001]. Несмотря на большое количество работ, в настоящее время ряд проблем химического микронного датирования остаются нерешенными. Первая проблема связана с аппаратной реализацией метода, оптимизацией условий измерения и др.; вторая – с выбором корректного способа обработки экспериментальных данных и расчета возраста; третья группа проблем, общая для изотопных и химических методов датирования, состоит в поиске кристаллохимических критериев замкнутости U-Th-Pb-системы, кристаллохимических индикаторов возможных вторичных преобразований и возрастной гетерогенности минералов. Актуально совершенствование экспериментальных методик микронного анализа и расчетных подходов к обработке аналитических данных, изучение факторов, определяющих погрешность возраста, повышение воспроизводимости данных, объективности их анализа с возможностью отбраковки недостоверных результатов по кристаллохимическим критериям.

Цель и основные задачи работы. Цель – исследование состава и кристаллохимии ряда U-Th-содержащих минералов, компьютерное моделирование эволюции их U-Th-Pb-системы, использование результатов при химическом датировании минералов из ряда геологических объектов Урала и прилегающих территорий.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. анализ литературы по кристаллохимии, физике процессов радиационного разрушения структуры U-Th-содержащих минералов, по методикам их химического датирования;
2. совершенствование методики микронного анализа U-Th-содержащих минералов;

3. разработка методики обчета геохимических данных при химическом датировании минералов на основе вычислительного эксперимента по моделированию временной эволюции их U-Th-Pb-системы;
4. изучение особенностей кристаллохимии и изоморфизма U и Th в структуре минералов из ряда геологических объектов Урала и прилегающих территорий;
5. химическое микрозондовое датирование минералов.

Фактический материал. В основу работы положены исследования образцов U-Th-содержащих минералов, предоставленных специалистами различных организаций: 30 проб монацита (около 100 различных зёрен), 5 проб уранинита, 4 торита, торрианит, коффинит и чевкинит – всего более 1500 микрозондовых анализов.

Исследования выполнены автором на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX 100 в лаборатории физических и химических методов анализа минерального вещества Института геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург).

Защищаемые положения.

1. Определены оптимальные аналитические условия анализа ряда минералов-геохронометров (монацита, уранинита, торита, торрианита, коффинита) на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX 100, что позволило для элементов Th, U, Pb снизить пределы обнаружения до 130, 50 и 60 ppm и относительные погрешности определения содержаний до 3,0, 0,6 и 1,1%, соответственно.

2. На основе компьютерного моделирования временной эволюции U-Th-Pb системы минерала разработана методика обчета и анализа микрозондовых данных, позволяющая обоснованно выбирать способы корректного расчета химического возраста.

3. Состав, кристаллохимические особенности и изоморфизм U и Th являются индикаторами полигенности минералов и создают химическую основу для датирования. Сопоставление полученных значений химического возраста с изотопными данными служит этому надёжным подтверждением.

Научная новизна.

1. Для рентгеновского микроанализатора Cameca SX 100 усовершенствована методика анализа состава U-Th-содержащих минералов, позволяющая снизить погрешность определения содержания U, Th, Pb; методика основана на обоснованном выборе аналитических линий, стандартных образцов, условий измерения (времени, последовательности измерения элементов и т.д.), выборе положения фона, коррекции содержания, наложения аналитических линий; прописаны особенности методики применительно к минералам, содержащим U и Th в качестве основных или изоморфных примесных элементов.

2. Предложен новый подход к обработке и анализу данных по содержанию элементов U, Th, Pb в U-Th-содержащих минералах, позволяющие в рамках химического (неизотопного) метода выполнять оценки возраста минералов; корректность и границы применимости указанного подхода установлены на основе вычислительного эксперимента по моделированию временной эволюции содержания U, Th, Pb в минералах, в том числе в условиях привноса и/или потери радиогенного свинца.

3. Впервые на основе анализа состава и пространственного распределения химических элементов в зёрнах U-Th-содержащих минералов из геологических объектов Урала, обоснован вывод о том, что особенности состава и текстуры индивидов, кристаллохимии и изоморфизма U и Th содержат информацию о сохранности или час-

тичной/полной «переустановке» U-Th-Pb-системы минералов под действием внешних воздействий, что позволяет делать предварительные заключения о гомогенности/гетерогенности минералов по возрасту и создают химическую основу для их датирования.

Практическая значимость.

1. Разработанная методика анализа минералов-геохронометров внедрена в практику аналитической работы ЦКП «Геоаналитик» УрО РАН. Результаты работы могут быть использованы в других микронзондовых лабораториях и центрах коллективного пользования, работающих в области исследования минерального вещества.

2. Результаты работы внедрены в процесс обучения студентов специальности «Физика минералов» физического факультета Уральского госуниверситета (г. Екатеринбург); разработана лабораторная работа и научно-методические материалы для практических занятий студентов и магистрантов.

3. Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., тема НИР «Геохимия, микроструктура и радиационные явления в минералах-концентраторах радиоактивных элементов как основа для петрогенетических, геохронологических и материаловедческих приложений», программ Президиума РАН №23 «Научные основы инновационных энергоресурсосберегающих экологически безопасных технологий оценки и освоения природных и техногенных ресурсов» и №20 «Создание и совершенствование методов химического анализа», программы УрО РАН «Состав, структура и физика радиационно-термических эффектов в фосфатных и силикатных минералах и стеклах как основа для геохронологических построений и создания материалов для утилизации радионуклидов», а также при поддержке гранта РФФИ № 09-05-00513.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на I Всероссийской научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования» (г. Миасс, 26-29 марта 2009), XVI Российском симпозиуме по растровой электронной микроскопии (г. Черноголовка, 31 мая-3 июня 2009 г.), II Всероссийской конференции «Фундамент, структуры обрамления Западно-Сибирского осадочного бассейна, их геодинамическая эволюция и проблемы нефтегазоносности» (г. Тюмень, 24-26 апреля 2010 г), XI Всероссийском петрографическом совещании «Магматизм и метаморфизм в истории Земли» (г. Екатеринбург, 24-28 августа 2010 г), Всероссийской научной конференции «Уральская минералогическая школа – 2010» (г. Екатеринбург, 27-30 сентября 2010 г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 работ, из них 9 статей, в том числе 5 в реферируемых журналах и 16 тезисов докладов.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю член-корр. РАН Вотякову С.Л. за предложенную тему исследований и помощь в работе над диссертацией. Неоценимую помощь в обсуждении результатов оказала к.ф.-м.н. Щапова Ю.В. Большое спасибо к.г.-м.н. Ерохину Ю.В. за постоянную поддержку, конструктивную критику и внимание к работе. Особая благодарность Конюшковой Н.Н. (ГЕОХИ РАН) за стажировку и передачу неоценимого опыта по электронно-зондovому микроанализу, Романенко И.М., Конилову А.Н. и Вирюс А.А. (ИЭМ РАН) за предоставленные стандарты, научные советы и литературу по теме диссертации, Куликовой И.М. (ИМГРЭ РАН) за интересные идеи. Автор признателен сотрудникам Института геологии и геохимии УрО РАН Осиповой Т.А.,

Гмыре В.Г., Бородиной Н.С., Пушкареву Е.В., Поротникову А.В., Ронкину Ю.Л., Горбуновой Н.П., Неупокоевой Г.С., Захарову А.В., Замятину Д.А. за дружескую поддержку и участие. За представленные образцы автор признателен Поповой В.И., Попову В.А. (ИМин УрО РАН), Губину В.А. (УрФУ), Ерохину Ю.В., Осиповой Т.А., Иванову К.С., Козлову П.С., Мурзину В.В. (ИГГ УрО РАН).

Объем и структура работы

Диссертационная работа содержит введение, 4 главы, выводы и список цитируемой литературы, состоящий из 228 наименований. Работа изложена на 201 странице печатного текста, включая 139 рисунков, 52 таблицы и состоит из разделов:

- **введения**, где сформулированы цель и задачи, научная новизна, практическое значение работы и представлены основные положения, выносимые автором на защиту;
- **первой главы**, где проанализированы литературные данные по химическому датированию, составу и изоморфизму U-Th-содержащих минералов; обоснована актуальность постановки проблемы и выбор объектов исследования;
- **второй главы**, где описаны этапы проведения анализа, выбор оптимальных условий измерения, а также приведены параметры коррекции и учёта спектральных наложений для ряда U-Th-содержащих минералов на микроанализаторе Cameca SX 100;
- **третьей главы**, посвященной обоснованию новых подходов и совершенствованию способов обсчета аналитических данных на основе вычислительного эксперимента по эволюции модельной U-Th-Pb-системы минералов;
- **четвертой главы**, в которой развиты экспериментальные методики и вычислительные подходы использованы для изучения U-Th-содержащих минералов из различных геологических объектов; изучен их химический состав, кристаллохимические особенности, проведены расчеты химического Th-Pb- и U-Pb-возраста.

Дальнейшее изложение материала диссертации дается согласно защищаемым положениям.

ПЕРВОЕ ЗАЩИЩАЕМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Определены оптимальные аналитические условия анализа ряда минералов-геохронометров (монацита, уранинита, торита, торинита, коффинита) на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX 100, что позволило для элементов Th, U, Pb снизить пределы обнаружения до 130, 50 и 60 ppm и относительные погрешности определения содержания до 3,0, 0,6 и 1,1%, соответственно.

Пробоподготовка, поиск и идентификация минералов-геохронометров. Анализируемые образцы (зёрна монацита, уранинита, торита, торинита, коффинита) исследовались в полированных шлифах пород или шашках. Первый способ подготовки образцов предпочтителен, поскольку позволяет изучать каждое зерно в ассоциации с минералами-спутниками. Для создания проводящего слоя все образцы напыляли углеродом при давлении 0,04 мБар и напряжении на электродах 4 В, использовали спектрально-чистые углеродные электроды марки ОСЧ.

Поиск монацита, уранинита, торинита, торита и коффинита в шлифе проводили по BSE-изображениям, обладающим достаточно высокой яркостью вследствие высокого среднего атомного номера данных соединений; в ряде случаев эти изображения позволяют выявить зональность зерен и позволяют выбирать точки анализа. Идентификацию минералов проводили по энергодисперсионным спектрам.

Качественный анализ U-Th-содержащего минерала включает запись спектра с использованием пяти волновых спектрометров, идентификацию характеристических линий и определение качественного элементного состава (рис. 1). Измерения проводились при ускоряющем напряжении 15 кВ, силе тока пучка 250 нА, времени измерения интенсивности на пике для Th, U и Pb по 400 с (на фоне – 200 с), для Y, P, Si и Ce – 20 с (10 с на фоне), для остальных – по 10 с; в табл. 1 приведены условия регистрации характеристических линий. Для каждого из элементов индивидуально подобраны параметры детектора и последовательность измерения.

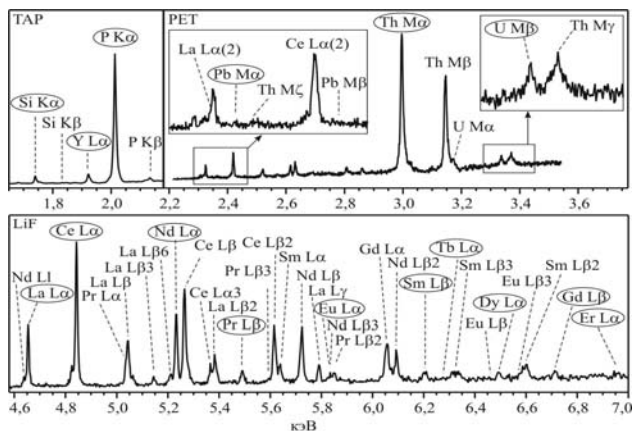


Рис. 1. Рентгеновские спектры монацита из гранитных пегматитов Адуйского массива, снятые на волновых спектрометрах.

Таблица 1

Условия регистрации характеристических линий U-Th-содержащих минералов

Элемент	Линия	Станд. образец	Содержание, мас. %	Кристалл-анализатор	$\text{Sin}\Theta \cdot 10^5$	Фон слева	Фон справа
Y	<i>Lα</i>	YPO_4	48,35	TAP	25114	-450	450
Ca	<i>Kα</i>	Пироп	2,87	LPET	38387	-500	500
Pb	<i>Ma</i>	$\text{Pb}_2\text{P}_2\text{O}_7$	70,43	LPET	60416	-1000	1200
P	<i>Kα</i>	CePO_4	13,18	PET	70421	-300	400
Ce	<i>Lα</i>	CePO_4	59,60	LiF	63576	-600	600
Si	<i>Kα</i>	Пироп	19,75	TAP	27738	-500	500
U	<i>Mβ</i>	UO_2	88,15	LPET	42459	-1100	650
S	<i>Kα</i>	BaSO_4	13,74	LPET	61389	-530	500
Th	<i>Ma</i>	ThO_2	87,88	PET	47301	-1000	700
La	<i>Lα</i>	LaPO_4	59,39	LiF	66161	-600	600
Nd	<i>Lα</i>	NdPO_4	60,30	LiF	58842	-1000	600
Pr	<i>Lβ</i>	PrPO_4	59,74	LiF	56069	-370	480
Sm	<i>Lβ</i>	SmPO_4	61,29	LiF	49620	-400	500
Gd	<i>Lβ</i>	GdPO_4	62,35	LiF	45863	-400	500
Dy	<i>Lα</i>	DyPO_4	63,11	LiF	47401	-500	500
Eu	<i>Lα</i>	EuPO_4	61,54	LiF	52665	-500	755
Er	<i>Lα</i>	ErPO_4	63,78	LiF	44321	-500	500
Tb	<i>Lα</i>	TbPO_4	62,59	LiF	49066	-620	800
Ho	<i>Lβ</i>	HoPO_4	63,46	LiF	40927	-280	280

Примечание. Фон слева и справа соответствует положению относительно пика, $\text{Sin}\Theta \cdot 10^5$.

Получение и анализ карт распределения Th, U, Pb, Y. Элементное картирование зерна или его участка проводили тремя различными способами.

1. По измерению интенсивности пика и фона. Преимущество: наиболее точное определение содержания элементов. Используется для минералов с низким содержанием элементов (например, для получения распределения свинца в монаците).

2. По измерению только интенсивности пика. Преимущество: экспрессность. Используется для выявления зональности в минералах с высоким содержанием элементов, когда соотношение интенсивностей пика и фона велико (для получения распределения U и Pb в уранините), или в случаях проведения качественного анализа.

3. По измерению интенсивности пика и BSE-изображению, что позволяет выделить некоторые дополнительные характеристики состава зерен минералов. Используется для выявления зональности минералов при высоком соотношении интенсивности пика и фона (например, для получения распределения Th, Si, Pb, U в торите).

Карты интенсивности пересчитывали в карты содержания элементов; при этом обязательно измеряли карты в лучах Y для учёта наложения его линии на линию Pb.

Количественный анализ химического состава минералов-геохронометров включает измерение характеристической интенсивности, выбор положения фона с двух сторон от пика, коррекцию содержания (РАР-коррекция при анализе в точке, X-РНИ-коррекция при пересчёте карты интенсивности в карту содержания), учёт наложения линий (Th $M\gamma$ на U $M\beta$; Y $L\gamma_3$ на Pb $M\alpha$; Pr $L\beta_2$, Nd $L\beta$ и La $L\gamma$ на Eu $L\alpha$; Ce $L\beta$ на Nd $L\alpha$ и др.), выбор времени измерения интенсивности (на пике и фоне) и оценку погрешности определения элемента. Для расчёта статистических характеристик проводили повторные измерения. Строго соблюдали температурный режим помещения, где проводили микрозондовые анализы (20°C).

Достигнутые метрологические характеристики. В исследованных образцах диапазон измеренных содержаний ThO₂, UO₂ и PbO составил 0,5-67, 0,04-88,37 и 0,03-4,58 мас.%, соответственно. Относительное стандартное отклонение определения Th, U и Pb в проанализированных минералах составило от 2,99, 0,58 и 1,05%, соответственно; достигнутые пределы обнаружения – 130, 60 и 53 ppm, соответственно. Представленные метрологические характеристики близки или превосходят соответствующие значения, представленные в литературе последних лет по микрозондovому анализу U-Th-содержащих минералов.

ВТОРОЕ ЗАЩИЩАЕМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

На основе компьютерного моделирования временной эволюции U-Th-Pb системы минерала разработана методика обсчета и анализа микрозондовых данных, позволяющая обоснованно выбирать способы корректного расчета химического возраста.

Компьютерное моделирование временной эволюции U-Th-Pb системы минерала проводили в три этапа.

1 этап. Решение «прямой задачи» эволюции U-Th-Pb системы от момента времени $t=0$ до $t=T_{\text{мод}}$ ($T_{\text{мод}}$ - модельный возраст) в условиях возможного привноса или потери изотопов Pb, Th и U (рис. 2): расчет конечных (при $t=T_{\text{мод}}$) концентраций урана, тория и свинца ($Pb_{\text{к}}$, $U_{\text{к}}$, $Th_{\text{к}}$) на основе их начальных (при $t=0$) содержаний ($U_{\text{н}}$, $Th_{\text{н}}$, $Pb_{\text{н}}$). Неоднородность состава минерала задавали введением дисперсии со-

держаний U_n , Th_n , Pb_n ; результаты точечных микрозондовых анализов имитировали с помощью N статистических реализаций системы (с использованием генератора случайных чисел). Расчет конечных содержаний проводили по формулам: $Pb_k = Pb_n + {}^{232}Th(\exp^{\lambda_{232}t} - 1) + {}^{235}U(\exp^{\lambda_{235}t} - 1) + {}^{238}U(\exp^{\lambda_{238}t} - 1)$, $Th_k = {}^{232}Th_n \exp^{-\lambda_{232}t}$, $U_k = {}^{235}U_n \exp^{-\lambda_{235}t} + {}^{238}U_n \exp^{-\lambda_{238}t}$, где λ - константы распада.

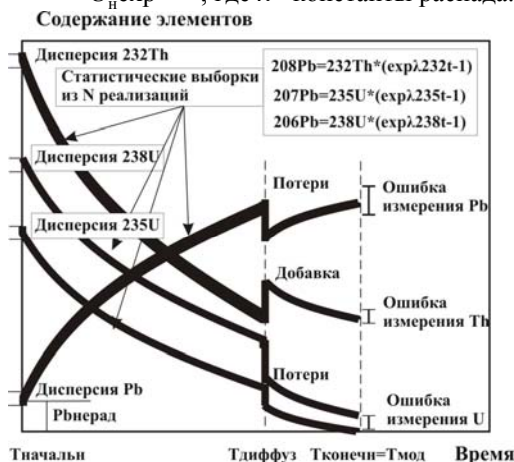


Рис. 2. Схема временной эволюции статистической модельной U-Th-Pb-системы с возрастом $T_{\text{мод}}$.

2 этап. Решение «обратной задачи» эволюции U-Th-Pb системы: восстановление возраста системы по значениям Pb_k , U_k , Th_k с учетом погрешностей их определения $\Delta Th/Th$, $\Delta U/U$, $\Delta Pb/Pb$ (значения погрешностей брали равными их типичным значениям в микрозондовом анализе). Возраст и средне-квадратичные взвешенные отклонения (СКВО) определяли с помощью программы Isoplot 3.66 [Ludwig, 1999] и оригинальной программы [Вотьяков и др., 2010], в основу которой положен алгоритм ортогональной регрессии Йорка [York, 1966] вместо метода наименьших квадратов. Для расчёта возраста $T_p \pm \Delta T_p$ использовали четыре альтернативных подхода.

1. Расчёт неизохронного возраста из единичной статистической реализации системы [Montel et al., 1996]. Анализ получаемых вариаций расчетных значений возраста, их погрешности и гистограмм распределения (рис. 3) позволяют делать заключения о гомогенности/гетерогенности системы. В расчетах реальных минералов такой подход может быть использован с целью последующего независимого изохронного анализа выделенных совокупностей точек. Отметим, что данный метод применим только для систем без нерадиоγενного свинца.

2. Расчёт изохронного Th^*-Pb (или U^*-Pb)-возраста с оценкой содержания нерадиогенного свинца (рис. 4а) [Suzuki, Kato, 2008], где ThO_2^* - некоторое «модифицированное» содержание, равное $(ThO_2 + UO_2^{*кв})$, $UO_2^{*кв}$ - содержание урана, пересчитанное в эквивалентное содержание тория, способное «произвести» то же количество Pb за время жизни системы при равенстве U/Pb и Th/Pb -возрастов (или $UO_2^* = UO_2 + ThO_2^{*кв}$). Отметим, что Me^*-Pb -изохронный метод справедлив при условии фиксированного содержания нерадиогенного Pb в любой точке минерала.

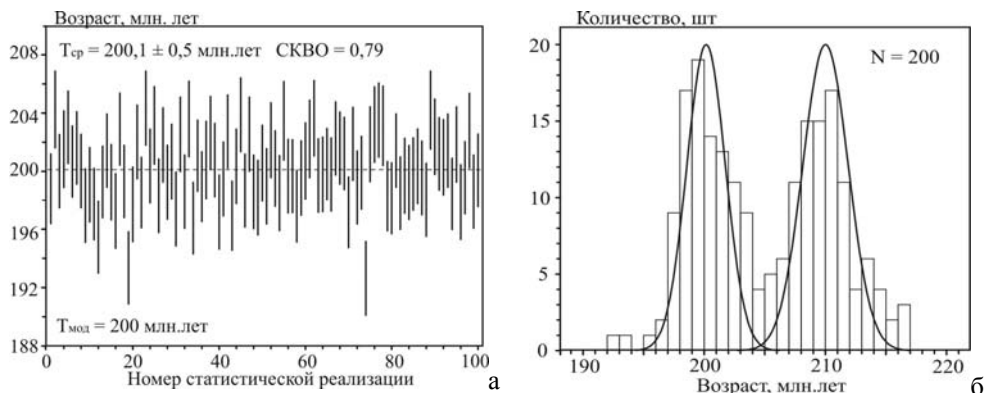


Рис. 3. Вариации расчетных значений возраста и его погрешности для модельной гомогенной системы с $T_{\text{мод}}=200$ млн. лет (а); гистограмма распределения возраста для модельной гетерогенной системы с $T_{\text{мод}}=200+210$ млн. лет (б).

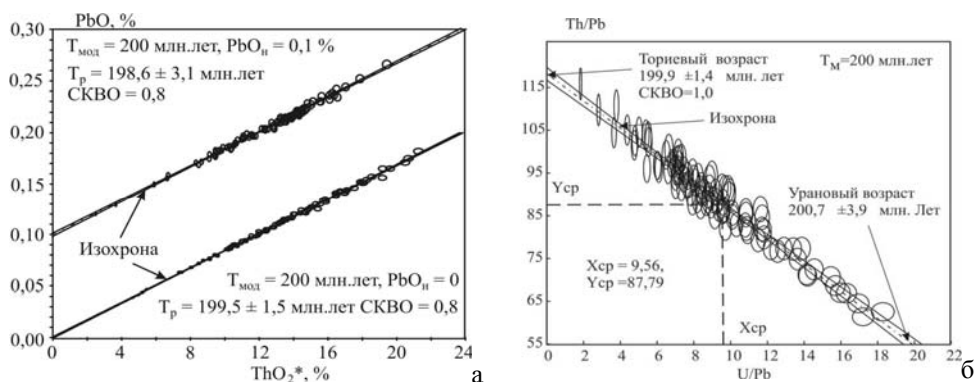


Рис. 4. Th^* - Pb -данные без и при наличии ($\text{PbO}_n=0,1\%$) нерадиогенного свинца (а) и Th/Pb - U/Pb -данные без нерадиогенного свинца (б) для модельной высокоториевой ($\text{ThO}_2^{\text{H}}=10$, $\text{UO}_2^{\text{H}}=1$ мас.%) системы с возрастом $T_{\text{мод}}=200$ млн. лет. Относительная погрешность измерения $\Delta\text{Th}/\text{Th}=\Delta\text{U}/\text{U}=\Delta\text{Pb}/\text{Pb}=1\%$, 100 точек.

3. Расчет возраста Th/Pb - U/Pb -изохронным методом [Cocherie, Albarede, 2001]. Проводили независимые расчеты изохронного Th/Pb -, U/Pb -возраста с представлением данных в двумерном пространстве (рис. 4б), наиболее корректные значения могут быть получены для систем, содержащих либо один минерал с большой дисперсией отношения Th/Pb и U/Pb либо два минерала, один из которых урановый, а другой ториевый (например, уранинит-монацит и др.).

4. Th/Pb -изохронный метод, состоящий в независимом расчете изохронного Th/Pb -, U/Pb -возраста с оценкой содержания нерадиогенного свинца и представлением данных в трехмерном пространстве [Rhede et al., 1996]. Конечные содержания ThO_2^{K} , PbO^{K} , UO_2^{K} аппроксимируются плоскостью (рис. 5). Данный метод используется редко из-за сложности расчета, значительной погрешности датировки и низкой наглядности.

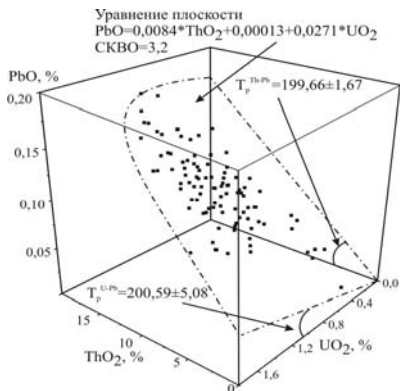


Рис. 5. Трёхмерная диаграмма расчёта возраста высокотермической системы ($T_{\text{мод}}=200$ млн. лет) без нерадиогенного свинца. Содержание $ThO_2^H=10$, $UO_2^H=1$ мас.%, СКО $UO_2^H=ThO_2^H= PbO^H=30\%$; погрешность измерения $\Delta Th/Th=\Delta U/U=\Delta Pb/Pb=1\%$; $N=100$.

3 этап. Сопоставление, анализ и разбраковка возрастов, полученных разными методами.

Исследованы модельные системы при варьировании следующих факторов: содержания U_n , Th_n (10 мас.% ThO_2 и 0, 1, 2, 5, 8, 10 мас.% UO_2 ; 10 мас.% UO_2 и 0, 1, 2, 5, 8 мас.% ThO_2); модельного возраста (200, 300, 500, 1000, 1500 и 2000 млн.лет); погрешностей определения элементов (1, 1 и 1; 1, 1 и 2; 1, 1 и 5; 1, 1 и 10; 1, 3 и 10; 3, 3 и 10 отн.% для тория, урана и свинца, соответственно); дисперсии содержания элементов (5, 10, 15, 20 25 и 30 %); статистики выборки (20 выборок по 100 статистических реализаций); количества статистических реализаций (10, 50, 100 и 250 «точек анализа»); содержания нерадиогенного свинца (0; 0,002; 0,005; 0,008; 0,015; 0,03 мас.% $PbO_{\text{нерад}}$) рис. 6; потерь радиогенного свинца (0; 0,001; 0,005; 0,01; 0,015 и 0,02 мас.%); степени гетерогенности по возрасту (моделировали совокупность выборок, соответствующих модельным возрастам 200+205, 200+210, 200+220 млн.лет). Для указанных случаев рассчитывали восемь значений химического возраста системы: №1, 2 – Th-U-Pb средний и средне-взвешенный возраст по единичным определениям; 3 – Th*- или U*-Pb-изохронный возраст; 4, 5 – Th/Pb- и U/Pb-изохронный возраст из двумерной Th/Pb-U/Pb-изохроны; 6 – Th-U-Pb средне-взвешенный возраст из двумерной Th/Pb-U/Pb-изохроны; 7, 8 – Th-Pb- и U-Pb-изохронный возраст из трёхмерной Th-U-Pb-изохроны.

Вычислительный эксперимент по моделированию эволюции статистической U-Th-Pb-системы позволил выявить роль различных факторов в формировании расчетного значения химического возраста и его погрешности в альтернативных подходах. Для примера на рис.6 показано влияние фактора содержания нерадиогенного свинца; расчеты в рамках изохронного Th*-Pb и 3D Th/Pb подходов (расчеты №3,7), несмотря на присутствие $Pb_{\text{нерад}}$ удовлетворительно воспроизводят модельный возраст системы; все остальные дают существенно завышенные значения. Показана необходимость расчета восьми значений химического возраста минерала с последующим сопоставлением и анализом полученных значений. Определен диапазон применимости разных методов, сформулированы условия (концентрация $Pb_{\text{нерад}}$, дисперсия U, Th, количество точек анализа и др.), при которых могут быть получены корректные возрастные определения; предложены рекомендации по повышению объективности анализа с отбраковкой недостоверных результатов.

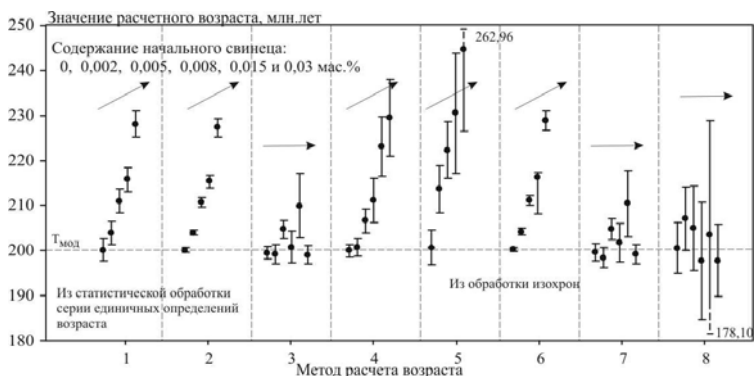


Рис. 6. Вариации расчетного возраста и погрешности его определения для модельной системы с ($T_{\text{мод}} = 200$ млн. лет) при различном содержании нерадиогенного свинца.

ТРЕТЬЕ ЗАЩИЩАЕМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Состав, кристаллохимические особенности и изоморфизм U и Th являются индикаторами полигенности минералов и создают химическую основу для датирования. Сопоставление полученных значений химического возраста с изотопными данными служит этому надежным подтверждением.

Усовершенствованная методика микронзондового анализа, развитые методические подходы к оценке возраста использованы при изучении кристаллохимических особенностей и получении химических датировок ряда Th-U-минералов из различных геологических объектов Урала и прилегающих территорий.

Монациты гранитных пегматитов Ильменских гор. Исследовано зерно монацита (рис. 7) из амазонитового пегматита, секущего гнейсовое обрамление Ильменогорского щелочного массива (Блюмовская копь № 50).

Образец обнаруживает секториальный тип зональности, что видно по распределению Si, P, Ce, Th; такой тип зональности обычно связывается с фракционированием элементов на кристаллографически неэквивалентных поверхностях роста кристаллов вследствие различия их взаимодействия с минералообразующей средой.

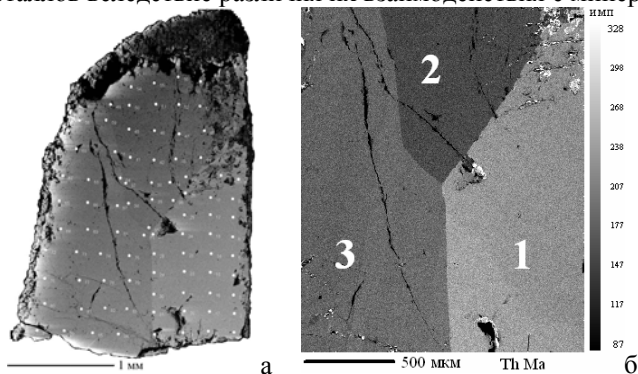


Рис. 7. BSE-изображение с указанием точек анализа (а) и карта распределения Th (б) для монацита из амазонитовых пегматитов Блюмовской копии (1 - сектор с высоким, 2 - низким, 3 - средним содержанием Th).

Анализ состава показывает, что образец представляет собой редко встречающийся высокоторийевый тип монацита с абсолютно преобладающим хаттонитовым

типом изоморфизма ($\text{REE}^{3+} + \text{P}^{5+} \rightarrow \text{Th}^{4+}(\text{U}^{4+}) + \text{Si}^{4+}$) над чералитовым типом ($2\text{REE}^{3+} \rightarrow \text{Th}^{4+}(\text{U}^{4+}) + \text{Ca}^{2+}$) (рис. 8) и может быть описан как твердый раствор в системе монацит-хаттонит с приближенной формулой $(\text{P}^{5+}_{1-x}, \text{Si}^{4+}_x)[\text{REE}^{3+}_{0,99-x}, (\text{Th}^{4+}, \text{U}^{4+}, \text{Pb}^{2+})_x \text{Ca}^{2+}_{0,01}] \text{O}_4$, $x=0,19-0,34$. Установлено, что вид зависимостей концентрации элементов U(Th), Y(Th), HREE(Th) и др. одинаков во всех секторах, что позволяет предполагать близость условий и времени кристаллизации всех зон. Параметр $\beta = (\text{Si} + \text{Ca}) / (\text{Th} + \text{U} + \text{Pb})$, характеризующий условие полной зарядовой компенсации примесей, не превышает 1, на основании чего можно предполагать замкнутость Th-U-Pb-системы минерала. Таким образом, кристаллохимические особенности монацита из амазонитовых пегматитов Блюмовской копи не дают оснований ожидать различий химического возраста зон (за исключением, возможно, малых краевых областей) и позволяют предполагать удовлетворительную степень замкнутости его Th-U-Pb-системы.

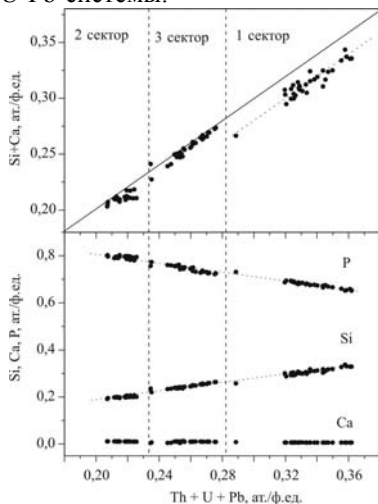
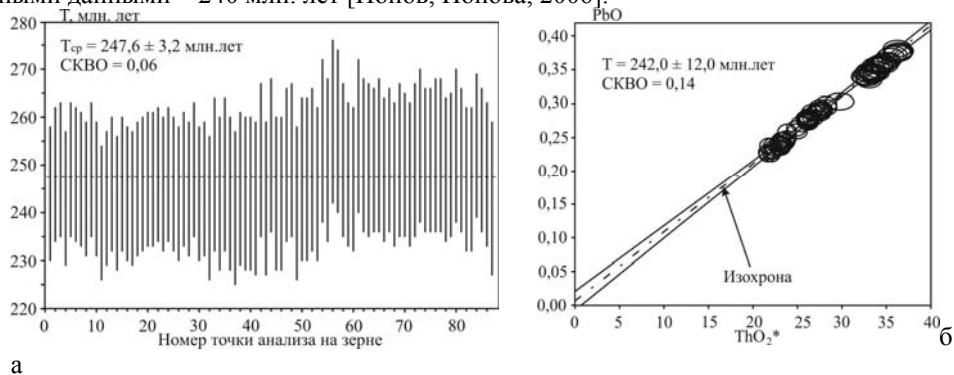


Рис. 8. Особенности изоморфизма Th и U в монаците из амазонитовых пегматитов Блюмовской копи. Сплошная линия соответствует условию $\text{Th} + \text{U} + \text{Pb} = \text{Si} + \text{Ca}$ полной зарядовой компенсации примесей.

Распределение значений неизохронных единичных определений возраста и его погрешности (при нулевом содержании нерадиогенного свинца, расчет №1) согласуется с кристаллохимическими выводами о возрастной гомогенности системы (рис. 9а) и дает средне-взвешенное значение химического возраста $247,8 \pm 3,3$ млн. лет. В рамках Th*-Pb-подхода (расчет №3) линия регрессии аналитических данных соответствует изохроне с возрастом $242,0 \pm 12,0$ млн. лет; рассчитанное содержание нерадиогенного свинца пренебрежимо мало ($\text{PbO}_{\text{нерад}} = 0,007 \pm 0,014$ мас.%). Рассчитанные значения возраста (расчеты №1-4, 6, 7) в пределах погрешности согласуются между собой (табл. 2). Этот результат является следствием корректности применения соответствующих методов для расчетов простой гомогенной системы с высокой дисперсией содержания тория и малым содержанием начального свинца. Методы, основанные на изохронном определении уран-свинцового возраста (№ 5, 8) не могут быть использованы вследствие малого содержания U и небольшой величины дисперсии его содержания. Минимальные погрешности реализуются в неизохронных подходах (№ 1-2) и при анализе Th/Pb-U/Pb-изохроны (№ 6). Полученные значения

химического возраста 242-249 млн. лет сопоставимы с ранее полученными изотопными данными ~ 240 млн. лет [Попов, Попова, 2006].



а
Рис. 9. Распределение значений единичных определений возраста (с погрешностями) и их среднее-взвешенное значение по данным неизохронного точечного подхода (а) и линия регрессии $PbO-ThO_2^*$ в рамках изохронного Th^*-Pb -метода (б).

Таблица 2

Значения возрастов $T_p \pm \Delta T_p$ монацита, рассчитанные разными методами

Возраст, млн. лет	Данные разных методов расчета					
	№1	№2	№3	№4	№6	№7
$T_p \pm \Delta T_p$	247,8±3,3	247,6±3,2	242,0±12,0	248,7±20,5	247,8±3,4	242,2±22,1

Примечание: $N = 87$, $\Delta Th/Th = 3,07$, $\Delta U/U = 1,30$ и $\Delta Pb/Pb = 2,57$ отн.‰.

Монациты гранитных пегматитов Адуйского массива. Исследованы две пробы: из жилы № 1 Костоустовского участка в 4 км к юго-западу от пос. Озерное; отмечается в породе совместно с ксенотимом, апатитом, аннитом и ильменитом; и из жилы гранитного пегматита «Ильменорутиловая» в 1 км к западно-северо-западнее жилы № 1; отмечается совместно с ксенотимом, ильменорутилом и ильменитом.

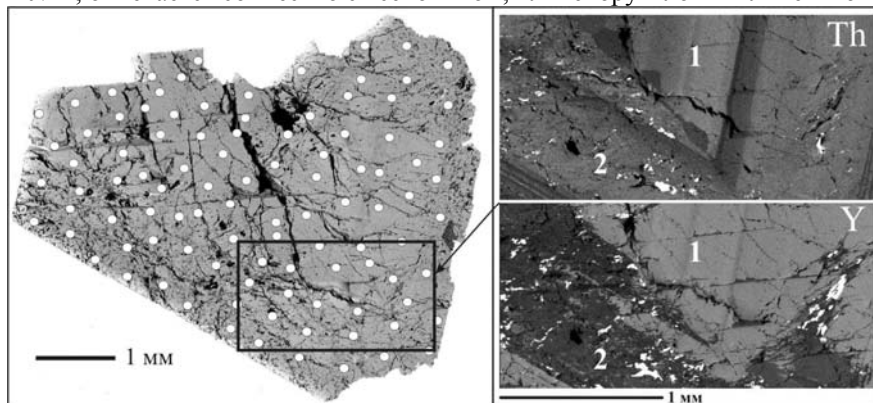


Рис. 10. Изображения монацита из гранитных пегматитов Адуйского массива в отражённых электронах (слева) и в рентгеновских лучах Th и Y его участка (справа). 1 - концентрические зоны в центре кристалла; 2 - зоны сложной формы на краю кристалла.

Обнаружено два типа химической зональности проб (рис. 11): 1 - концентрические зоны в центральной части кристалла, связанные с вариациями содержания Th, U, Pb, Ce; 2 - зоны сложной формы на периферии кристалла, существенно обедненные Y и U и содержащие многочисленные включения ксенотима и брабантита. Предполагается, что первый тип зональности отражает эволюцию состава расплава и композиционного равновесия с минералообразующей средой; второй тип может быть связан с изменением монацита под действием некоторых термохимических процессов (рекристаллизации минерала или его растворения-осаждения).

Характер соотношения концентрации примесей различен в областях 1 и 2; вклады хаттонитового и чералитового типов изоморфизма сопоставимы между собой; при этом в области 1 доминирует чералитовый тип, в области 2 – хаттонитовый тип (рис. 11). Таким образом, имеет место различие характеристик монацита в центре и краях, что позволяет предполагать факт вторичных преобразований части минерала и/или полигенность минерала по возрасту. Параметр β для большинства аналитических точек не отклоняется от 1 более чем на 5%, что указывает на высокую степень замкнутости Th-U-Pb-системы. Ряд аналитических точек, в которых $\beta < 0,95$ и $\beta > 1,05$, должны быть отбракованы для повышения корректности определения возраста.

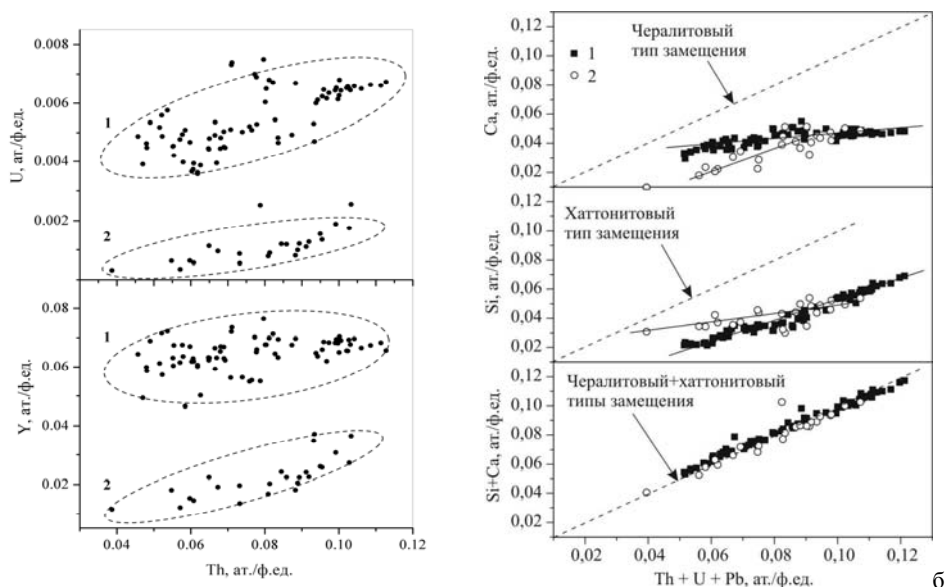


Рис. 11. Особенности химического состава (а) и изоморфизма (б) монацита гранитных пегматитов Адуйского массива (проба Оз-2). 1 - зоны в центре зерна, 2 - зоны на периферии.

Расчет №1 дает различные значения химического возраста для зон 1 и 2; аналогичные результаты получены изохронными методами (табл. 3). Рассчитанное в рамках Th*-Pb-подхода (рис. 12б) содержание $PbO_{\text{нерад}}$ пренебрежимо мало ($0,001 \pm 0,007$ и $0,001 \pm 0,013$ мас.% для областей 1 и 2, соответственно).

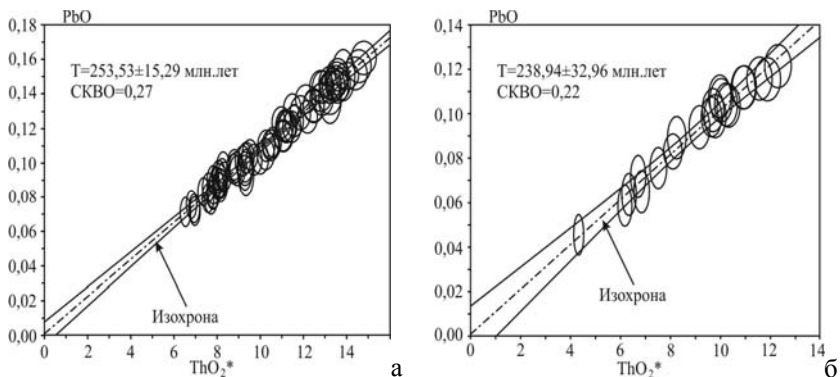


Рис. 12. Вариации значений возрастов и величина средне-взвешенного возраста для центральной (а) и периферической (б) зоны кристалла монацита из гранитных пегматитов Адуйского массива. Th*-Pb-изохроны для центральной (а) и периферийной (б) областей монацита.

Таблица 3

Значения возраста $T_p \pm \Delta T_p$ адуйского монацита, рассчитанные разными методами

Возраст, млн.лет	Данные разных методов расчета					
	№1	№2	№3	№4	№6	№7
Зона 1 $T_p \pm \Delta T_p$	256,0±5,1	256,0±5,1	253,5±15,3	261,5±19,8	257,3±6,2	255,7±23,3
Зона 2 $T_p \pm \Delta T_p$	241,0±11,0	241,0±11,0	238,9±32,7	248,6±20,6	242,0±3,7	251,0±51,8

Примечание: для центральной зоны $N = 74$, $\Delta Th/Th = 3,09$, $\Delta U/U = 1,37$ и $\Delta Pb/Pb = 5,35\%$; для периферической зоны $N = 21$, $\Delta Th/Th = 3,09$, $\Delta U/U = 4,02$ и $\Delta Pb/Pb = 6,75\%$.

Полученные химические датировки проб удовлетворительно соотносятся с изотопными значениями возраста минералов из пегматитов Адуйского массива: время его образования оценивается от 291 ± 8 млн. лет (по аксессуарному циркону гранитоидов [Краснобаев и др., 2006]) до $256 \pm 0,6$ млн. лет (по монациту [Ферштатер и др., 2003]) и 255-241 млн. лет (по слюдам пегматитов [Смирнов и др., 2006]).

Монацит из пегматитов Селянkinской толщи. Исследован монацит из копии № 244 в пегматитах среди гнейсов и амфиболитов предположительно селянkinской толщи в средней части Ильменского госзаповедника, в 3 км западнее оз. Таткуль; отмечается в породе с алмандином, цирконом, ильменитом и ганитом.

Установлена концентрическая зональность образца, связанная с различием содержания Th и Ca в зонах. На основе анализа соотношения различных элементов в зонах показано, что проба представляет собой монацит с преобладающим хаттонитовым типом изоморфизма; центральная часть образца приблизительно соответствует твердому раствору монацит-хаттонит $(P^{5+}_{1-x}, Si^{4+}_x)\{REE^{3+}_{0,96-x}, (Th^{4+}, U^{4+}, Pb^{2+})_x Ca^{2+}_{0,04}\}O_4$, $x = 0,08-0,14$; периферийные области – твердому раствору $(P^{5+}_{1-x}, Si^{4+}_x)\{REE^{3+}_{0,99-x}, (Th, U, Pb)^{4+}_x Ca^{2+}_{0,01}\}O_4$, $x = 0,12-0,22$; малые отклонения от 1 параметра β указывают на удовлетворительную степень замкнутости Th-U-Pb-системы минерала. Несмотря на текстурную схожесть центральной и периферийной

зон, ввиду сильных различий химического состава зон целесообразно проведение независимых оценок возраста каждой из них.

Данные расчетов № 1-3 показывают, что различия химического возраста зон оказываются в пределах его погрешности. Содержание нерадиогенного свинца, определенное в рамках Th*-Pb-подхода, пренебрежимо мало ($0,003 \pm 0,026$ мас.%). Методы Th/Pb-U/Pb-изохрон (расчет № 4,6,7) оказались для данного образца неудовлетворительными из-за малого разброса значений Th/Pb и U/Pb; методы U-Pb-подхода (расчеты № 5,8) не использованы в силу низкого содержания урана в образце.

Таблица 4

Значения возраста $T_p \pm \Delta T_p$ монацита (К-244), рассчитанные разными методами

Возраст, млн. лет		№1	№2	№3
Зона 1	$T \pm \Delta T_p$	272,1 \pm 5,9	271,9 \pm 5,9	272,1 \pm 49,4
Зона 2	$T \pm \Delta T_p$	265,7 \pm 7,1	265,5 \pm 7,0	269,3 \pm 30,6

Полученные значения датировок соотносятся с последовательностью формирования разнотипных пегматитов в Ильменских горах [Попов, Попова, 2006].

Монациты из кислых гнейсов Заангарья Енисейского кряжа. Монацит слагает аксессуарную вкрапленность в кислых гнейсах; образцы отобраны в районе среднее-нижнего течения р. Гаревки, правого притока р. Енисей. Монацит образует короткопризматические индивиды (до 100 мкм) с коронарными структурами, сложенными обогащенным РЗЭ апатитом (рис. 13).

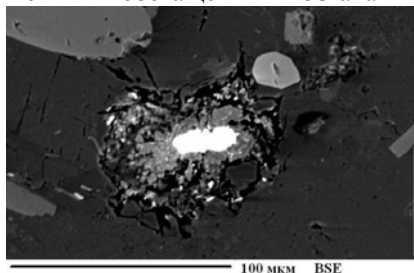


Рис. 13. Изображение монацита кислых гнейсов Заангарья Енисейского кряжа в отраженных электронах.

Химическая зональность образца не выявлена; для всех аналитических точек получен значительный избыток суммарного содержания (Si+Ca) над (Th+U+Pb) (параметр β 1,13-1,63). Можно предполагать, что избыточное содержание кремния обусловлено наличием в образцах фтора (возможная схема изоморфизма $PO_4^{3-} \rightarrow SiO_3^{2-} + F$), связанного частичным замещением монацита апатитом, что согласуется с наличием коронарных структур. С учетом противоречивых литературных данных не представляется возможным высказать определенных выводов о замкнутости или переустановке Th-U-Pb системы данного монацита.

Результаты единичных определений возраста (расчеты № 1,2) свидетельствует о гомогенности образца по возрасту; содержание $Pb_{\text{нерад}}$ пренебрежимо мало ($0,001 \pm 0,024$ мас.%); рассчитанные значения возраста согласуются между собой (табл. 5). Данные химического возраста монацита удовлетворительно согласуются с изотопными датировками, полученными для данного региона; в частности, цирконы из гранитоидов Тейского комплекса указывают на возраст метаморфических собы-

тий в интервале 880-864 млн. лет [Vernikovsky et al., 2007]. Данные Ar-Ar-возраста биотитов из изученных метапелитов указывают на то, что главная стадия метаморфизма пород происходила не ранее 848-851 млн. лет [Лиханов и др., 2007]. Омоложенный возраст монацитов может быть связан с влиянием поздних термальных процессов на заключительной стадии становления гранитоидов Тейского комплекса.

Таблица 5

Расчетные возраста $T_p \pm \Delta T_p$ (млн. лет) для енисейских монацитов

Возраст	№1	№2	№3	№4	№6	№7
$T \pm \Delta T$	785,1±18,0	785,0±17,0	778,1±89,4	791,8±92,1	786,3±13,0	762,0±167,5

Монациты Тараташского массива. Изучался аксессуарный монацит из биотит-амфибол-плагиоклазового пегматита залегающего среди гранитизированных метаморфических пород Тараташского комплекса (зерна размером 200-300 мкм, проба К-13666), а также аксессуарный монацит из очковых гнейсов (зерна до 400-500 мкм, проба К-1417). Изоморфизм Th и U осуществляется по чералитовой и хаттонитовой схемам одновременно с преобладанием в пробе К-1417 хаттонитовой схемы. Для образцов К-13666 условие полной зарядовой компенсации примесей выполняется во всех исследованных точках зерен; параметр β не отклоняется от 1 более чем на 2%, в силу чего можно предполагать удовлетворительную степень замкнутости Th-U-Pb-системы. Для образцов К-1417 параметр β составляет 1,04-1,16, причем примерно для половины аналитических точек его отклонения от 1 превышают 10%, что указывает на возможные потери радиогенного Pb в некоторых областях зёрен пробы К-1417. Содержание $PbO_{\text{нерад}}$ пренебрежимо мало (расчет дает $-0,01 \pm 0,13$ мас.% и $-0,002 \pm 0,02$ мас.% в пробах К-13666 и К-1417, соответственно); все возраста с точностью до погрешности согласуются между собой (табл. 6); значения U/Pb-возраста оценить не удастся.

Таблица 6

Расчетные возраста $T_p \pm \Delta T_p$ (млн. лет) монацитов К-13666 и К-1417

Возраст, млн. лет	1	2	3	4	6	7
$T_p \pm \Delta T_p$ (К-13666)	1947±25	1947±24	1964 ±212	1935±96	1948±15	1951±281
$T_p \pm \Delta T_p$ (К-1417)	1907±24	1906±24	1917±76	1892±41	1909±14	1891±98

Примечание. N = 53, $\Delta Th/Th = 3,1$, $\Delta U/U = 3,0$ и $\Delta Pb/Pb = 1,3$ отн.% (проба К-13666); N = 95, $\Delta Th/Th = 3,16$, $\Delta U/U = 6,78$ и $\Delta Pb/Pb = 2,40$ отн.% (проба К-1417).

Расчитанный химический возраст имеет близкие значения для обоих монацитов. Известно, что большая часть метаморфических пород Тараташского комплекса образовалась при метаморфизме гранулитовой фации около 2,6 млрд. лет [Краснобаев, 1986]. Диафорез амфиболитовой фации и гранитизация пород проявились в интервале 2,1-1,7 млрд. лет [Ленных, 1980]. Таким образом, получено, что химические датировки монацита не противоречат имеющимся изотопным датировкам.

Монациты гранитного Джабыкского массива (Южный Урал). Изучены аксессуарные монациты из двуслюдяного (проба Е-4333) и биотитового (проба К-1061) гранитов Джабыкского плутона; зерна ~ 200-300 мкм характеризуются сложной зо-

нальностью. Все использованные подходы при обработке аналитических данных и дают близкие значения возраста для обеих проб (табл. 7).

Таблица 7

Расчетные возраста $T_p \pm \Delta T_p$ (млн. лет) джабыкских монацитов К-1061 и Е-4333

Возраст	№1	№2	№3	№4	№6	№7
К-1061	284,0±10,6	284,0±10,0	286,7±30,5	283,0±12,4	285,4±4,5	283,9±39,9
Е-4333	266,6±33,3	266,0±24,0	268,1±35,3	275,1±92,1	268,5±12,2	275,1±92,1

Примечание. N = 54, $\Delta Th/Th = 3,13$, $\Delta U/U = 2,68$ и $\Delta Pb/Pb = 8,83$ отн.% (проба К-1061); N = 9, $\Delta Th/Th = 3,17$, $\Delta U/U = 3,74$ и $\Delta Pb/Pb = 11,72$ отн.% (проба Е-4333).

Рассчитанные значения химического возраста монацитов удовлетворительно согласуются с изотопными данными для минералов и пород Джабыкского массива: по данным Rb-Sr возраста пород [Иванов, 1998] доверительный интервал формирования Джабыкского плутона лежит в пределах 263-281 млн. лет.

Уранинит и монацит из гранитоидов Первомайского массива. Сосуществующие монациты и ураниниты слагают акцессорную вкрапленность в лейкогранитах Первомайского массива Среднего Урала, по своей петролого-геохимической характеристике они приближаются к редкометалльным гранитоидам. Оба минерала встречаются по всей матрице гранитоида, совместных сростаний не образуют. В рамках точечного неизохронного подхода (расчеты № 1-2) выполнены датировки минералов: для уранинита получено 274,0±5,5 млн. лет, для монацита 275,0±23,0 млн. лет. Для уранинита и монацита был использован изохронного подход (рис. 14). Результаты удовлетворительно ложатся на изохроны и дают согласованные значения возраста (табл. 8) и хорошие значения для погрешности его определения.

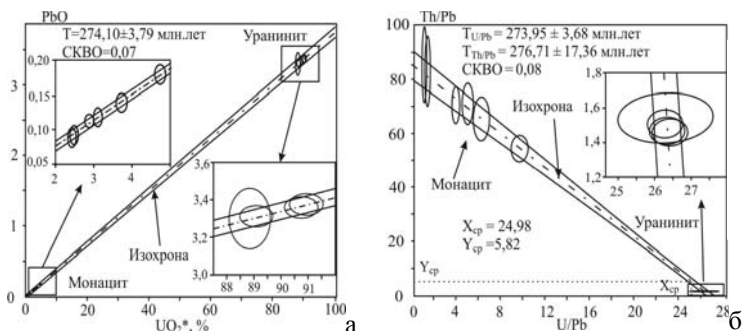


Рис. 14. U*-Pb- (а) и Th/Pb-U/Pb-данные (б) для уранинита и монацита из гранитоидов Первомайского массива.

Таблица 8

Значения возраста $T_p \pm \Delta T_p$ первомайских уранинита и монацита

Возраст	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№8
$T \pm \Delta T$	274,0±13,2	274,1±5,3	274,1±3,8	276,7±17,4	273,9±3,7	274,3±4,1	274,1±4,2

Примечание: N = 10, $\Delta Th/Th = 3,32$, $\Delta U/U = 0,50$ и $\Delta Pb/Pb = 1,93$ отн.%.

Уранинит кварц-сульфидных жил Пышминско-Ключевского месторождения. Уранинит из Пышминско-Ключевского Cu-Co-Au месторождения, залегающего среди девонских вулканогенно-осадочных пород, наблюдается в виде мелкой

вкрапленности (до 5-10 мкм) в кварц-сульфидных жилах и вмещающих метасоматитах. Состав минерала – UO_2 80,37-91,31, ThO_2 0,02-1,13 и PbO 3,90-4,74 мас.%. Значения химического возраста составляют 370,7±9,0 млн. лет (расчеты № 1,2) и 372,2±7,7 (расчет № 3); использование других изохронных подходов невозможно из-за малой дисперсии содержания Th, U и Pb. Отметим, что имеющиеся K-Ag и U-Pb данные абсолютного возраста по Пышминско-Ключевскому месторождению противоречивы; они охватывают интервал от 382 до 223 млн. лет. Полученные значения химического возраста уранинита (в пределах 370 млн. лет) не противоречат интервалу датировок, однако носят предварительный характер и требуют дополнительных исследований.

Минералы гранитоидов доюрского фундамента Западной Сибири.

Уранинит. Уранинит слагает акцессорную вкрапленность в матрице граносиенита (Окуневская площадь, скв. 10486, гл. 1734 м), образуя мелкие изометричные округлые зерна до 20 мкм в матрице слюды; в редких случаях встречается в контакте с крупными индивидами титанита. В крупных зернах уранинита обнаружена химическая зональность: в центральной части минерал имеет повышенное содержание тория (ThO_2 14-15 мас.%), в краевых зонах его количество резко (на 7-9 мас.%) уменьшается; содержания Th и U коррелируют между собой. Состав образца следующий: UO_2 68,44-78,73, ThO_2 7,38-15,32 и PbO 3,01-3,31 мас.%. Датировки, выполненные разными методами в предположении замкнутости U-Th-Pb-системы минерала (табл. 9), удовлетворительно согласуются между собой. Содержание нерадиоактивного свинца пренебрежимо мало. Значения химического возраста согласуются с изотопными U-Pb-датировками цирконов из граносиенитов [Иванов и др., 2010], показавшими значения возраста 301,6±3,6 млн. лет.

Таблица 9

Расчетные возраста $T_p \pm \Delta T_p$ (млн. лет) уранинита из фундамента Западной Сибири

Возраст, млн.лет	№1	№2	№3	№5	№6
$T \pm \Delta T$	302,6±6,0	303,2±5,5	303,4±6,1	302,6±24,3	303,3±28,5

Торит. Торит, как и уранинит, слагает акцессорную вкрапленность в матрице граносиенита (Окуневская площадь, скв. 10486, гл. 1744 м); исследованы мелкие (до 5-10 мкм) зерна торита в кварце. Содержание ThO_2 составляет 72,84-73,54, UO_2 7,90-8,28 и PbO 1,20-1,29 мас.%. Средне-взвешенное значение возраста составляет 294,0±11,0 млн. лет; Th*-Pb-возраст равен 293,9±14,3 млн. лет. Полученные химические возраста торита хорошо согласуются с датировками уранинита и циркона из этой же скважины.

Монацит. Монацит слагает акцессорную вкрапленность до 1 мм в гранитоидах кристаллического фундамента Восточно-Шебурской площади (скв. 28р, гл. 2528 м). Фосфат относится к цериевой разновидности и имеет широкий диапазон содержания $ThO_2 = 8,3-17,8$, UO_2 до 0,5 и $PbO = 0,09-0,2$ мас.%, которые позволяют произвести химическое датирование.

Нами выполнены расчеты возрастов по результатам 11 точечных анализов монацита и получена Th*-Pb-изохрона для монацита с возрастом 274,5±21 млн. лет. Для сопоставления получены U-Pb-изотопные данные (SHRIMP-II) для цирконов Восточно-Шебурской площади. По пяти локальным анализам циркона получен concor-

дантный возраст $277,5 \pm 2$ млн. лет, СКВО = 0,77 [Иванов и др., 2010], очень близкий к таковому, полученному для монацита.

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно предположить, что магматическое внедрение и кристаллизация гранитной интрузии происходила в нижнепермское время. Этот возраст (277,5-274,5 млн. лет) надежно фиксируется в рамках двух методов (изотопного и химического датирования) для двух акцессорных минералов – монацита и циркона.

Торианит карбонатитоподобных пород Карабашского гипербазитового массива. Тело золотоносных карбонатных (карбонатитоподобных) пород наблюдается в юго-западной части Карабашского массива на гребне в 200 м западнее самой высокой точки Золотой горы. Торианит установлен в виде мелких зерен до 10-15 мкм среди карбонатной матрицы. Минерал образует изометричные, реже слабо удлиненные индивиды квадратного или прямоугольного сечения; химическая зональность не фиксируется. Торианит отличается высокими содержаниями UO_2 от 23,67 до 26,58 мас.%, СаО до 7,4 мас.%, PbO до 2,04 мас.%, Se_2O_3 до 1,87 мас.% и Nd_2O_3 до 1,53 мас.%; наблюдается примесь лантана, иттрия и кремния. Химическое датирование торианита по 9 точечным определениям состава минерала дает средне-взвешенное значение возраста $317,1 \pm 8,4$ млн. лет; изохронный Th*-Pb-возраст составляет $315,4 \pm 5,9$ млн. лет.

Рассчитанный химический возраст торианита попадает в узкий интервал 315 ± 6 и 318 ± 10 млн. лет. Возможно, что формирование торианита в карбонатных породах также связано с коллизионной стадией развития Сысертско-Ильменогорского блока, во время которой (360-320 млн. лет.) проходили процессы метаморфизма с основным этапом около 350 млн. лет [Echtler et al., 2007 и др.]. Вполне вероятно, что в это время при метаморфизме произошло разложение первичного минерала (монацита?) с образованием торианита или в момент разогрева породы произошла полная «перестановка» U-Th-Pb-системы минерала под действием внешних воздействий.

Уранинит и коффинит гранитных пегматитов Липовского жильного поля.

Уранинит установлен в виде включений до 20-25 мкм в закономерных сростаниях циркона с ксенотимом в матрице пегматита. Изучались образцы из пегматитовой жилы южного борта карьера № 6 Липовского никелевого месторождения примерно в 200 м восточнее от спуска в выработку. Коффинит слагает мелкие округлые индивиды размером до 5-10 мкм в сростании с цирконом. По данным микронзондового анализа уранинит имеет высокие содержания ThO_2 до 5,6 мас.%, PbO до 3,2 мас.% и Y_2O_3 до 1,1 мас.%. Кроме того, наблюдаются небольшие примеси церия, ниодима, кальция и кремния. Данные по химическому составу коффинита свидетельствуют о высоком содержании примеси ThO_2 до 2,3 мас.%, Y_2O_3 до 10 мас.% и PbO до 2,6 мас.%.

Рассчитанный химический возраст уранинита попадает в достаточно узкий интервал $263-267 \pm 5$ млн. лет, при среднем значении $265,5 \pm 5$ млн. лет. При расчете химического возраста для разных зерен коффинита получен более широкий, чем для уранинита интервал значений от 265 до 271 млн. лет (среднее значение 269 ± 7 млн. лет), но в целом, полученные датировки хорошо согласуются между собой. Изохронный U^*/Pb -возраст получен по данным для обоих минералов; в координатах $UO_2^* - PbO$ все точки ложатся на одну прямую или изохрону, что говорит об их одновременном образовании: изохронный U^*/Pb -возраст составляет $269,2 \pm 5$ млн. лет.

Формирование гранитных пегматитов Липовки, по всей видимости, надо связывать со становлением Мурзинско-Адуйских массивов, т.к. в них тоже отмечаются подобные пегматиты обогащенные Li, Rb и Cs. При этом время образования Адуйского массива оценивается от 291 ± 8 млн. лет (по циркону [Краснобаев и др., 2006]) до $256 \pm 0,6$ млн. лет (по монациту [Ферштатер и др., 2003]) и 255-241 млн. лет (по слюдам [Смирнов и др., 2006]). Это же относится к Мурзинскому массиву, возраст пород которого, составляет от 260 до 248 млн. лет [Попов и др., 2003 и др.].

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах по перечню ВАК

1. Иванов К.С., Ерохин Ю.В., Федоров Ю.Н., Хиллер В.В., Пономарев В.С. Изотопное и химическое U-Pb-датирование гранитоидов Западно-Сибирского мегабассейна // Доклады АН, 2010. Т. 433. № 5. С. 671-674.
2. Вотяков С.Л., Хиллер В.В., Щапова Ю.В., Поротников А.В. Химическое электронно-зондовое датирование минералов-концентраторов радиоактивных элементов: методические аспекты // Литосфера. 2010. № 4. С. 94-115.
3. Репина С.А., Попова В.И., Чурин Е.И., Белогуб Е.В., Хиллер В.В. Флоренсит-(Sm), (Sm,Nd)Al₃(PO₄)₂(OH)₆ – новый минерал группы алунита-ярозита с Приполярного Урала // Записки Российского минералогического общества. 2010. Ч. CXXXIX. № 4. С. 16-26.
4. Попова В.И., Хиллер В.В., Ерохин Ю.В., Попов В.А. Монациты поздних гранитных пегматитов Ильменских гор: химическое датирование возраста зонально-секториальных кристаллов // Новые данные о минералах. М. 2010. Вып. 45. С. 72-78.
5. Вотяков С.Л., Хиллер В.В., Щапова Ю.В., Поротников А.В. Моделирование временной эволюции U-Th-Pb-системы как основа для химического микрозондового датирования минералов-концентраторов урана и тория // Доклады АН, 2010, принята в печать.

В других изданиях

6. Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Пономарёв В.С., Хиллер В.В. Акцессорная уран-ториевая минерализация гранитоидов из фундамента Шаимского района (Западная Сибирь) // Вестник Уральского отделения РМО. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2009. С. 41-47.
7. Хиллер В.В. Количественный химический анализ монацитов на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX100 // Ежегодник-2008. Труды ИГТ УрО РАН. Екатеринбург, 2009. Вып. 156. С. 344-349.
8. Хиллер В.В., Ерохин Ю.В. Разработка методики анализа монацитов на электронно-зондовом микроанализаторе SX 100 (Cameca) // Материалы Всероссийской научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования». Миасс: Имин УрО РАН, 2009. С. 288-290.
9. Ерохин Ю.В., Хиллер В.В., Иванов К.С., Пономарёв В.С. Состав и возраст уранинита из гранитоидов фундамента Шаимского района (Западная Сибирь) // Материалы Всероссийской научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования». Миасс: Имин УрО РАН, 2009. С. 134-136.
10. Хиллер В.В., Ерохин Ю.В. Химическое датирование уранинита из гранитоидов фундамента Шаимского района (Западная Сибирь) // XVI Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии. Тезисы докладов. Черноголовка: ИПТМ РАН, 2009. С. 74.
11. Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Хиллер В.В., Пономарев В.С. Изотопное и химическое U-Pb датирование гранитоидов из фундамента Шаимского района Западно-Сибирского мегабассейна // Изотопные системы и время геологических процессов. Материалы IV Российской конференции по изотопной геохронологии. СПб: ИГГД РАН, 2009. Т. 1. С. 177-180.

12. Ерохин Ю.В., Хиллер В.В. Торианит из золотоносных карбонатных пород Карабашского гипербазитового массива // Уральская минералогическая школа – 2009. Материалы Всероссийской научной конференции. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2009. С. 98-100.
13. Ерохин Ю.В., Прибавкин С.В., Хиллер В.В. Фосфаты из доломитовых пород Шабровского месторождения тальк-магнезитового камня (Средний Урал) // Уральская минералогическая школа – 2009. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2009. С. 100-105.
14. Попов М.П., Ерохин Ю.В., Хиллер В.В. Монацит и паризит в диоритах Мариинского месторождения (Уральские Изумрудные копи) // Уральская минералогическая школа – 2009. Материалы Всероссийской научной конференции. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2009. С. 132-134.
15. Хиллер В.В., Вотяков С.Л., Ерохин Ю.В. Электронно-зондовый анализ монацитов на микроанализаторе Cameca SX 100 как основа их химического U-Th-Pb датирования. // Современные проблемы геохимии: Материалы конференции. Иркутск: ИГ СО РАН, 2009. С. 258-261.
16. Ерохин Ю.В., Хиллер В.В. Монацит из слюдитов Шабровского рудного поля // Онтогенез минералов и её значение для решения геологических прикладных и научных задач. Годичное собрание РМО. СПб: СПГИИ, 2009. С. 213-215.
17. Прибавкин С.В., Ерохин Ю.В., Хиллер В.В., Пушкарев Е.В. Возрастные отношения Шабровского гранитного массива и одноименного месторождения тальк-магнезитового камня: данные U-Pb и K-Ar-датирования // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. Пермь: ПермГУ, 2010. Вып. 13. С. 149-154.
18. Вотяков С.Л., Хиллер В.В., Щапова Ю.В. и др. О достоверности определения возраста и воспроизводимости данных при химическом датировании минералов-концентраторов радиоактивных элементов // Материалы II Всероссийской научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования». Миасс: Имин УрО РАН, 2010. С. 122-125.
19. Вохмякова В.С., Щапова Ю.В., Вотяков С.Л., Хиллер В.В. и др. Состав и структура ряда природных монацитов по данным электронного микронзонда и рамановской микроспектроскопии // Материалы II Всероссийской научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования». Миасс: Имин УрО РАН, 2010. С. 126-127.
20. Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Хиллер В.В. Уранинит из гранитоидов фундамента Узбекской площади Шаимского района Западной Сибири // Фундамент, структуры обрамления Западно-Сибирского осадочного бассейна, их геодинамическая эволюция и проблемы нефтегазоносности. Материалы 2 Всероссийской конференции. Новосибирск: Гео, 2010. С. 50-53.
21. Вотяков С.Л., Хиллер В.В., Поротников А.В., Щапова Ю.В. О погрешности определения возраста и воспроизводимости данных при химическом датировании минералов-концентраторов радиоактивных элементов // Ежегодник-2009. Труды ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 2010. Вып. 157. С. 300-320.
22. Ерохин Ю.В., Смирнов В.Н., Иванов К.С., Захаров А.В., Хиллер В.В. Первые данные о возрасте гранитных пегматитов Липовского поля (Средний Урал) // Магматизм и метаморфизм в истории Земли. Тезисы докладов XI Всероссийского петрографического совещания. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2010. Т. 1. С. 231-232.
23. Вотяков С.Л., Хиллер В.В., Щапова Ю.В. и др. О химическом датировании минералов-концентраторов радиоактивных элементов // Магматизм и метаморфизм в истории Земли. Тезисы докладов XI Всеросс. петрограф. совещания. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2010. Т. 1. С. 231-232.
24. Иванов К.С., Ерохин Ю.В., Хиллер В.В. Возраст гранитоидов фундамента Восточно-Шебурской площади (Западная Сибирь) // Уральская минералогическая школа – 2010. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2010. С. 76-79.
25. Ерохин Ю.В., Хиллер В.В., Захаров А.В. Уранинит и коффинит из гранитных пегматитов Липовского жильного поля (Средний Урал) // Вестник Уральского отделения РМО. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2010. № 7. С. 58-64.