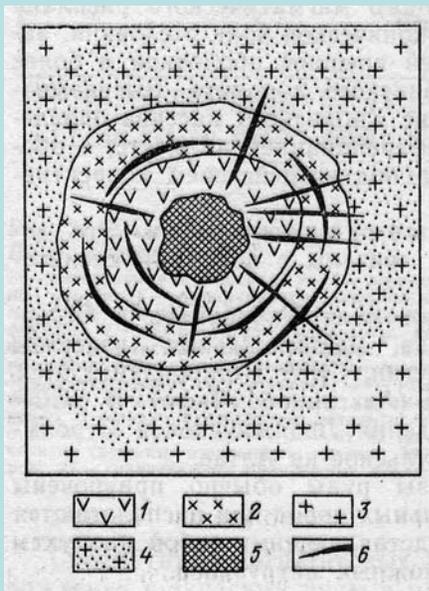
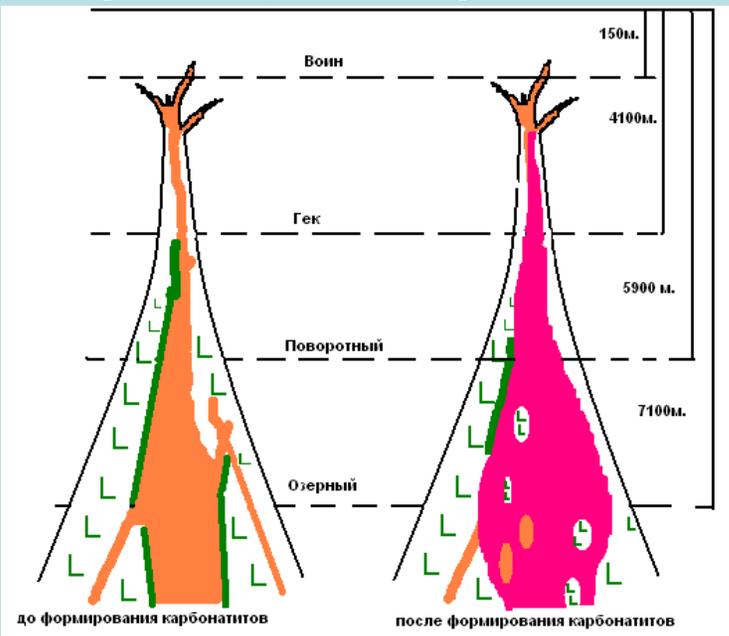
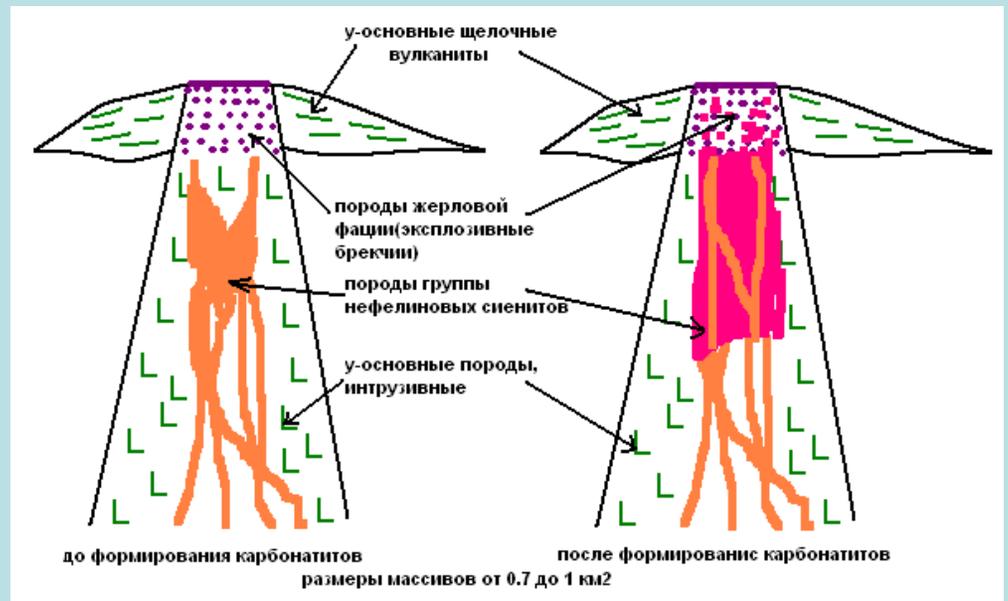




Геохимия урана и тория в карбонатитовом процессе



1- щелочные породы, 2 – ультраосновные породы, 3 - гнейсы, 4 - фениты, 5 – шток карбонатитов, 6 – жилы карбонатитов



- Карбонатиты представляют собой эндогенные существенно карбонатные горные породы, генетически связанные с интрузивными комплексами щелочного – ультраосновного состава.

Стадии образования карбонатитов

1. ранние крупнозернистые кальцитовые карбонатиты с минералами титана и циркония
2. среднезернистые кальцитовые карбонатиты с дополнительными минералами титана, иногда урана и тория
3. мелкозернистый кальцит-доломитовый агрегат с характерной ниобиевой минерализацией
4. мелкозернистые массы доломит-анкеритового состава с редкоземельными карбонатами

В качестве доказательства магматического происхождения карбонатитов приводятся следующие доказательства:

1. существование щелочно-углекислых, кальциево-углекислых лав (вулкан Олдонио Ленгай, Замбия).

Начиная с 1880 года было зарегистрировано 10 извержений (последнее 1960-1961гг).

Лавы последнего извержения представлены бурым карбонатом натрия, флюоритом.

Химический состав; %

- SiO_2 -сл-1,18
- CaO-12,74-19,09
- TiO_2 -0,1-0,8
- MgO-0,41-2,35
- Al_2O_3 -0,08-1,70
- Na_2O -29,00-30,00
- MnO-0,04-0,24
- P_2O_5 -0,83-1,06
- BaO-0,95-1,05
- CO_2 -30,73-32,40
- SrO-0,85-1,24
- H_2O -1,81-8,59
- F-1,84-2,69
- Cl-2,07-3,86
- SO_3 -2,00-2,88
- La-0,04%
- Nb-0,0015%

Олдонио-Ленгаи





Олдонио-Ленгаи расположен в рифте Грегори на севере Танзании. Начиная с 1983 года в кратерной части вулкана формируются небольшие конуса, изливающие натрокарбонатные (содовые) лавы при температурах 520-580 С. 30 марта 2006 года, по сообщению IPP-Media над кратером поднялся высокий столб пепла, что обычно предшествует крупным эксплозивным извержениям Олдонио-Ленгаи. Был объявлен "оранжевый уровень" опасности и из окрестностей вулкана эвакуированы 3000 жителей. Последнее эксплозивное извержение вулкана было в августе 1966 - июле 1967. Пеплы выпадали за 190 км от вулкана, в Найроби.

- Кальциево-углекислые лавы встречены в районе вулкана Налианго, где они представлены пузырчатой светло-серой породой с фенокристаллами биотита. Основная масса спутанно-волокнустая с микролитами пироксена, оливина, биотита, магнетита, ильменита, апатита, кальцита.
- CaO-35-36%
- CO₂-11,3%
- SiO₂-13-13,8%
- Fe_{суммарно}-52%

В формировании комплекса щелочных-ультраосновных пород и карбонатитов выделяется **4 этапа**.

1. Формирование комплекса ультраосновных пород.
 2. Формирование щелочно-у/основных пород (биотит и флогопитсодержащих).
 3. Формирование щелочных пород группы нефелиновых сиенитов (возможно метасоматическая их породы).
- 1-3 этапы сопровождаются формированием фенитов (в экзоконтакте), пироксен-флогопитовых и амфибол-флогопитовых образований (в эндоконтактах).

4. карбонатиты

Температура формирования карбонатитов 630-190°C

Формирование карбонатитов процесс - **многостадийный**.

По разным авторам 3 до 6 стадий.

Кальцит плавится при 1339°C.

Эксперименты свидетельствуют, что система $\text{CaO-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ (Ф. Сыромятников, О. Таттл и др) может существовать при довольно узком интервале: 640-685°C

Данный жидкий расплав содержит газовую и жидкую фазы: 95% H_2O -5% CO_2 .

Отмечают, что по вязкости это больше не расплав, а **жидкость**, и неизвестно как ее называть магмой или гидротермальным раствором (г. Барт).

Метасоматическая природа карбонатитов.

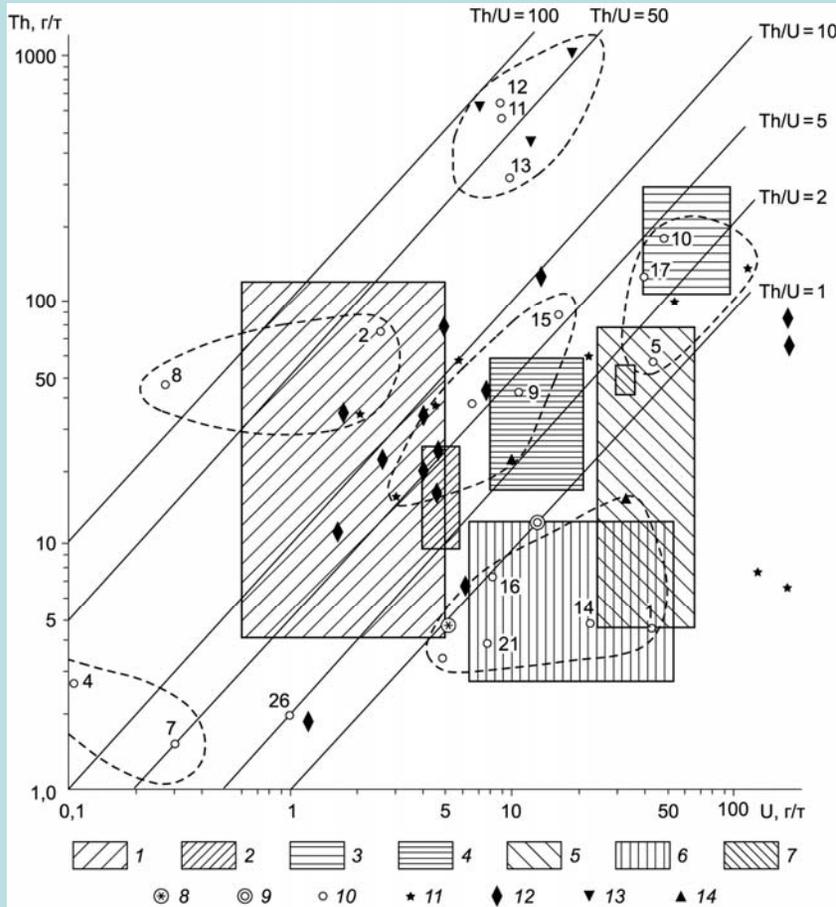
Признаки:

1. Общая тенденция развития минеральных парагенезисов, соответствующая изменению режима кислотности в сторону уменьшения pH.
2. Реликты исходных пород среди карбонатитов.
3. Зависимость текстурно-структурных особенностей карбонатитов от текстур и структур вмещающих пород, от этого зависит и состав темноцветных компонентов.
4. Избирательный характер развития карбонатитового процесса.

У/основные породы замещаются более интенсивно, чем нефелиновые сиениты.

Проблема генезиса карбонатитов связана с проблемами взаимодействия системы **кора-верхняя мантия**, происхождением и эволюцией щелочно-базальтоидного магматизма.

Содержание радиоактивных элементов в карбонатитах



- Для карбонатитов и карбонатитоподобных образований характерна ярко выраженная радиогеохимическая специализация. Все они резко дифференцированы по уровню накопления урана и тория. Торий-урановое отношение в карбонатитах колеблется от 0,1-0,2 до 65-68. По величине торий-уранового отношения среди них, согласно общепринятой радиогеохимической градации, выделяются карбонатиты урановой, смешанной и ториевой природы.

Положение карбонатитов и карбонатитоподобных метасоматитов на диаграмме U-Th.

1-7 – поля карбонатитов: 1- Муннар, шт. Керала, Индия, 2 – Северная Швеция, 3 – Палабора, ЮАР, 4 – в ассоциации с нефелиновыми сиенитами, Судан, 5 – Меймеч – Котуйская провинция, 6 – Олдоньо-Ленгаи, Танзания, 7 – Кераш, Африка; 8 – гора Патын, Кузнецкий Алатау; 9 – р.Кускунур, Гонный Алтай; 10 – другие районы (номера соответствуют таблице); 11 - Восточный Саян; 12 – Заангарский массив; 13 – Верхнепетропавловский участок, Мартайга; 14 – Коксинский участок, Хакасия.

Содержание урана и тория в некоторых карбонатитах и вмещающих их породах из различных районов мира

Номер района	Карбонатитовый район, регион	порода	Содержание элементов, г/т		Th/U	Источник
			U	Th		
1	Начендазвия (1)*	Карбонатит	42,0	4,7	0,11	Еськова и др., 1964
2	Гаудини (2)	»	2,5	75,0	30	
3	Валовой (1)	»	6,5	39,0	6,0	Карбонатиты, 1969
4	Мудтанк (1)	»	0,1	2,8	28	
5	Мт. Уэльд	»	43,2	58,0	1,34	
6	Казейштруль	»	4,9	3,3	0,67	
7	Магнет Ков (1)	»	0,3	1,4	4,6	
8	Муннар, Индия (4)	»	2,7	43,5	16,1	
9	Блэкбурн (4)	»	10,7	41,5	3,9	
10	Чупадера (39)	»	50,0	191,0	3,8	
11	Аллан-Лейк (9)	»	9,0	586,0	65	
12	Аллан-Лейк (4)	Апатитовый карбонатит	9,0	614	68	
13	Мере-Тренделаг	Карбонатит	10,0	206,0	20,6	
14	Какарссук (23)	»	22,6	5,0	0,22	
15	Какарссук (18)	Бефорсит	16,5	91,0	5,5	
16	Олдоньо-Ленгаи (3)	Карбонатит	8,0	7,6	0,95	
17	Палабора, ЮАР	»	40,0	120,0	3,0	
18	Вишневые горы	»	7,8	4,0	0,51	

- В эффузивных карбонатитах Олдоньо-Ленгаи разброс значений также достаточно велик, хотя современные углекислые вулканические лавы не так сильно дифференцированы по содержанию урана и тория (6,7-7,3 и 2,8-29 г/т соответственно), как более ранние карбонатиты. При этом торий-урановое отношение в этих образованиях в среднем равно 0,2 (Dawson, Gall, 1970).
- Более детально изучена радиогеохимия карбонатитов и карбонатитоподобных образований Алтае-Саянской складчатой области. Для них характерны значительные вариации содержания урана и тория. Так, например, содержание урана колеблется от 1,6 г/т в мономинеральных кальцитовых карбонатитах первой стадии Заангарского массива Енисейского кряжа до 190-320 г/т в карбонатитах с гатчеттолитовой минерализацией в Саянском карбонатитовом комплексе. Аналогичная картина наблюдается и для тория, средние содержания которого по отдельным типам карбонатитов варьируются от 1,9 г/т в кальцитовых с амфиболом карбонатитах Заангарья до 1011 г/т в карбонатитах первого типа Верхнепетропавловского участка Кузнецкого Алатау. Диапазон величины торий-уранового отношения при этом - от 0,02 до 88.

- Значительная дифференциация радиогеохимических показателей установлена в пределах отдельных карбонатитовых тел. Содержание радиоактивных элементов изменяется от минеральной ассоциации одной стадии к другой. Так, Л.А. Березина (1972) указывает на максимальную обогащенность ураном и торием карбонатитов второй стадии. Все без исключения исследователи отмечают существенную обогащенность ураном, в значительно меньшей степени торием, карбонатитов с гатчеттолитовой и пирохлоровой минерализацией (Пожарицкая, 1960; Березина, 1965; Жмодик, 1984; и др.).
- В общей схеме метасоматической последовательности минералообразования карбонатитов это свидетельствует о том, что привнос и концентрация радиоактивных и редких элементов происходят в позднюю кальцитовую стадию карбонатитового процесса (Журавлева и др., 1978). В процессе формирования наиболее поздних кальцит-доломитовых, доломит-анкеритовых и анкеритовых стадий происходят интенсивное перераспределение и вынос урана, тантала, ниобия (Капустин, 1987; и др.).
- Эти радиогеохимические особенности карбонатитов уже на первых этапах их изучения послужили хорошим поисковым признаком для их обнаружения и оконтуривания.

Формы нахождения радиоактивных элементов в карбонатитах

- Исследования форм нахождения урана и тория в классических карбонатитах Восточного Саяна (Березина, 1972, Березина и др., 1976, Журавлева и др., 1978, Жмодик, 1984 и др.) показывают, что в **ранних карбонатитах** до 60-70 % урана и тория концентрируется в апатите, сфене и перовските. В **карбонатитах II стадии** радиоактивные элементы концентрируются в гатчеттолите, циркелите, пирохлоре, торианите, **III стадии** – в апатите, пирохлоре, линдоките.
- В доломит-анкеритовых и анкеритовых карбонатитах минералами-концентраторами урана являются пирохлор, колумбит, гатчеттолит, бастнезит, ортит и другие акцессорные минералы. Для метасоматитов этого типа отмечается обилие мелких микровключений урансодержащих минералов. Уран в породах распределяется крайне неоднородно.



Радиогеохимия пегматитов



Принято выделять две генетические разновидности пегматитов:
магматогенные и метаморфогенные.

Магматогенные пегматиты принадлежат к группе позднемагматических образований, сформировавшихся на самых завершающих стадиях кристаллизации интрузивных массивов и располагающихся близ их кровли. Они связаны с родоначальными интрузивами тождественностью состава, но отличаются от них меньшими размерами, жило- и гнездообразной формой, зональным внутренним строением, неравномерностью в размерах зерен, крупными кристаллами части слагающих их минералов и наличием продуктов метасоматической переработки первичных минеральных ассоциаций магматического происхождения.

Подавляющее количество пегматитов связано с гранитными породами. Во всех случаях родственные пегматитам гранитоиды отличаются повышенной кислотностью или щелочностью, полной дифференциацией и многофазностью внедрения. По мере перехода от малоглубинных условий образования к большим глубинам в этих гранитах возрастает содержание глинозема, усиливается плюмазитовый характер гранитов и уменьшается значение коэффициента агпаитности (от $0,8 \div 1$ до $0,6 \div 0,65$).

- В зависимости от состава и строения пегматиты делят на **простые и сложные** (Смирнов, 1982).
- **Простые гранитные пегматиты** состоят в основном из калиевого полевого шпата и кварца.
- **Сложные гранитные пегматиты** имеют более разнообразный минеральный состав и, как правило, зональное строение. В структуре зональных гранитных пегматитов выделяются оболочка, внутренняя часть и неправильные метасоматические скопления. Все они составляют пять главных элементов зональной структуры. Первой, самой внешней зоной, является тонкозернистая оторочка мусковит-кварц-полевошпатового состава, по ширине редко превышающая несколько сантиметров. Вторая зона сложена кварц-полевошпатовой массой письменной и гранитной структуры. Третья зона состоит из моно-минеральной массы или блоков микроклина. Четвертую зону образует кварцевое ядро. Пятая зона не всегда проявлена и менее отчетлива. Она представлена неправильными скоплениями кварца, альбита, мусковита, сподумена и минералов редких металлов, тяготеющих преимущественно к границе кварцевого ядра и микроклиновой зоны, но распространяющихся и в стороны от нее, особенно в область микроклиновой зоны.

- Гранитные пегматиты, по А.Е. Ферсману, можно разделить на **пегматиты чистой линии** и **пегматиты линии скрещения** (гибридные пегматиты).

Пегматиты чистой линии, не испытавшие усложнения состава в процессе формирования, залегают в гранитах или тождественных им по минеральному и химическому составу породах.

Пегматиты линии скрещения образуются среди иных формаций, что отражается на их составе. В этих условиях возникают гибридные пегматиты, ассимилировавшие вещество боковых пород, и десилицированные пегматиты, отдавшие часть своего кремнезема вмещающим породам, недосыщенным этим соединением.

- **Гранитные пегматиты чистой линии** сложены **калиевым полевым шпатом** (ортоклаз, микроклин), **кварцем, плагиоклазом** (альбит, олигоклаз) и **биотитом**; кроме главных пегматитообразующих минералов в них концентрируются в разной степени сподумен, мусковит, турмалин, гранат, топаз, берилл, лепидолит, флюорит, апатит, минералы редких и радиоактивных элементов, а также редких земель.
- **Гибридные пегматиты**, образованные при ассимиляции глиноземистых пород (например, глинистых сланцев или основных пород), обогащаются такими минералами, как **андалузит, кианит, силлиманит**. Подобного рода пегматиты, ассимилировавшие карбонаты кальция, магния и железа, содержат **роговую обманку, пироксены, титанит, скаполит** и другие минералы. Десилицированные пегматиты в ультраосновных и карбонатных породах представлены обычно **плагиоклазитами** состава от альбититов до анортититов. При пересыщении глиноземом возникают **корундовые плагиоклазиты**.
- С другими формациями глубинных изверженных пород пегматиты встречаются реже. Они известны, но не типичны для перидотитовой, габбровой и плагиогранит-сиенитовой формаций ранней стадии развития складчатых областей (Смирнов, 1989). На активизированных платформах известны пегматиты основной, и особенно щелочной формаций. В приповерхностных и вулканических формациях пегматиты не образуются.
- **Щелочные пегматиты** состоят из микроклина или ортоклаза, нефелина или содалита, эгирина, гакманита, натролита, арфведсонита с примесью апатита, анальцима, а также минералов циркония, титана, ниобия и редких земель.
- Пегматиты, связанные с магматическими телами **ультраосновного** или **основного состава** (габбро-пегматиты, бронзититы и др.), сложены основным плагиоклазом (анортит-битовнит), средним плагиоклазом (лабрадор-андезин), ромбическим пироксеном (бронзит), в меньшей степени оливином, амфиболом, биотитом с примесью апатита, граната, сфена, циркона, титаномагнетита, магнетита, иногда сульфидов (пирротин, пентландит, халькопирит).

Содержание радиоактивных элементов в пегматитах

Геохимия радиоактивных элементов в пегматитах изучена недостаточно. Установлено, что на фоне постепенно понижающейся температуры и увеличивающейся роли летучих компонентов, уран и торий накапливаются **в начале пегматитового процесса** (Ермолаев, Тарасов, 1963).

Содержание урана в пегматитах варьирует весьма значительно. В гранитных пегматитах простого кварц-полевошпатового состава уровни накопления урана и тория, как правило, ниже, чем их концентрации во вмещающих породах. В то же время в редкометалльных пегматитах могут накапливаться значительные количества радиоактивных элементов.

Содержание урана в основной массе урансодержащих пегматитов мира измеряется сотыми и тысячными долями процента, достигая 0,05-0,1%, а на отдельных участках – 2% (Основные черты геохимии урана, 1963).

Средняя оценка содержания урана в пегматитах, выполненная в 60-е годы 20 века, указывает на обогащение пегматитов радиоактивными элементами на фоне вмещающих гранитов.

Средние содержания радиоактивных элементов в кислых
изверженных породах и гранитных пегматитах (по Ермолаев,
Тарасов, 1963)

Элемент	Содержание элементов, г/т		Степень накопления в пегматитах по сравнению с кислыми изверженными породами
	В кислых изверженных породах (по Виноградову, 1956)	В гранитных пегматитах (по Ферсману, 1937)	
U	3,5	15	4,3
Th	18	45	2,5
Th/ U	5,1	3,0	

Некоторое представление о содержании урана и тория в пегматитах дает таблица Эти данные согласуются с данными А.Е.Ферсмана, свидетельствующими об обогащении пегматитов ураном и торием на фоне вмещающих их пород. Они также указывают на более высокую активность урана в пегматитовом процессе по сравнению с торием. Торий – урановое отношение в пегматитах в основном ниже значений, типичных для изверженных горных пород (2-5), не подвергнутых метасоматическим преобразованиям.

Район, массив, участок, порода	Содержание, г/т		Th/ U	Источник
	U	Th		
1	2	3	4	5
Щелочной пегматит, Заангарский щелочной массив	68,9	31,9	0,5	Жмодик, 1984
Плагиоклазовые и мусковит-плагиоклазовые пегматитовые жилы Северной Карелии	85	-		Основные черты геохимии урана, 1963
Микроклин-плагиоклазовые пегматитовые жилы Северной Карелии	170	-		
Пегматоиды щелочных гранитов Кузнецкого Алатау	25,2 15,6 10,2	40,8 18,4 16,6	1,4 1,2 1,6	Домаренко, Рихванов, 1989
Щелочные пегматиты девонского возраста	14,7	76,0	5,1	Рихванов, 2002

Формы нахождения радиоактивных элементов в пегматитах

Исследование форм нахождения радиоактивных элементов в различных типах пегматитов показало, что основная масса урана и тория сконцентрирована в акцессорных минералах.

Так, например, по данным Л.В.Комлева для микроклин-плагиоклазовых жил пегматитов Северной Карелии на породообразующие минералы, слагающие около 99,74% массы пегматита, приходится лишь 1,15% от общего количества урана, в то время как на акцессорные минералы (0,25% от массы пегматита) соответственно 98,85%.

Другие немногочисленные определения и подсчеты также показывают, что основная масса урана и тория заключена в акцессорных минералах, в то время как в изверженных породах уран в этих формах составляет всего лишь 30-50% от его общего количества.

В акцессорных минералах, которые одновременно являются и концентраторами и носителями урана, он ассоциирует с элементами, близкими ему по свойствам: Th, Zr, Hf, Y, лантаноиды. Особенно часто наблюдаются парагенезисы урана с торием и редкими землями. При этом уран входит в кристаллическую решетку, главным образом, иттриевых минералов, а торий – в решетку цериевых.

С.М. Жмодик изучил формы нахождения урана и тория в пегматитах и вмещающих их щелочных породах Заангарского щелочного массива (Жмодик, 1984). Основное количество урана во вмещающих ийолитах связано с акцессорными минералами – ловенитом, сфеном, апатитом, гранатом (андрадитом); в фойяитах – с ловенитом, бастнезитом, торитом, велеритом. В пегматитах 95% урана сосредоточено в акцессорных минералах, микровключениях и трещинках.

Распределение урана в минералах пегматитов Заангарского щелочного массива по данным (n, f)-
радиографии

Минерал	Содержание минерала в породе, вес. %	Содержание в минерале, г/т	Доля на минерал, г/т	% на минерал
Нефелин	20,0	1,0	0,2	0,3
Микропертит	45,0	1,15	0,52	0,8
Альбит	22,5	1,16	0,26	0,4
Эгирин	8,5	20,0	1,70	2,5
Лепидомелан	2,0	3,84	0,08	0,1
Сфен		400		
Трещинка		7000		
Торит Бастнезит		920-11000		
Эшинит-эвксенит		1900-7200		
Монацит		200		
Пирохлор		65000		

- По данным нейтронно-осколочной радиографии установлена отчетливая тенденция к увеличению количества урана, связанного с акцессориями, от пород собственно магматического этапа к пегматитам и особенно к альбитизированным разновидностям нефелиновых сиенитов. Долю урана, сосредоточенного в трещинах минералов вдоль контактов кристаллов, учесть очень сложно, однако автор констатирует, что данная форма нахождения урана наиболее характерна для пегматитов, альбитизированных пород и в меньшей мере для микроклинизированных разновидностей.

Интересно, что количество выщелоченного урана увеличивается в ряду ийолит — фойяит — микроклинизированный фойяит — щелочной пегматит — гидротермально измененный фойяит. Процент выщелачивания урана также возрастает от пород магматического этапа к породам постмагматического, т. е. к породам, в которых по данным (n, f) – радиографии устанавливается широкое распространение «свободной» формы урана. Выявленные методами селективного выщелачивания закономерности для урана, в общем, характерны и для тория с той разницей, что максимальное количество тория извлекается из альбитизированных фойяитов и пегматитов. Для всех пород Заангарского массива (исключение гидротермалиты) процент выщелачивания тория выше, чем для урана. Отношение тория к урану в солянокислых растворах после выщелачивания отражает торий-урановое отношение самих пород. Это может объясняться тем, что формы нахождения урана в тория близки между собой и что в «свободной» форме находится не только уран, но и торий.

Условия миграции и концентрирования урана и тория при формировании пегматитов. Месторождения U и Th в пегматитах

- Вопросы миграции и концентрирования уран в пегматитах рассматриваются разными исследователями по-разному в зависимости от принятой точки зрения на генезис пегматитов.
- Большинство наблюдений свидетельствует о невысоком первоначальном содержании уран в выкристаллизовавшейся из расплава-раствора пегматитовой породе. *Развитие урановой и ториевой минерализации связано главным образом с постмагматическими процессами и подчиняется геологическим условиям залегания пегматита.* Нарушение пегматитовых тел трещинами способствует проявлению постмагматических процессов и появлению урановой минерализации в виде зон метасоматического замещения и полостей крустификационного выполнения.
- Независимо от принятой точки зрения на генезис пегматитов, установлено, что *накопление урана* при пегматитообразовании *происходит в акцессорной части пегматитов в начальной части процесса*, как путем кристаллизации собственных урановых минералов, так и главным образом большого количества урансодержащих минералов. Породообразующие минералы содержат чрезвычайно мало урана. Их роль в балансе урана в пегматитах невелика.
- Установлено, что в процессе пегматитообразования на фоне понижающейся температуры и увеличивающейся роли летучих компонентов, радиоактивные элементы накапливаются на ранних стадиях пегматитового процесса. К концу процесса их роль отчетливо понижается (Основные черты геохимии урана, 1963). *В процессе кристаллизации пегматитового расплава-раствора происходит столь полное извлечение урана и тория кристаллическими решетками урановых и урансодержащих минералов, что иногда остаточное содержание этих элементов в кварц-полевошпатовой массе ниже, чем их содержание в материнских изверженных породах.*

	Содержание элементов, г/т		Th/ U
	U	Th	
Среднее содержание во вмещающих гранитах	2,1	5,1	2,4
Среднее содержание в гранит-аплитах и мигматитах пегматитового поля	1,7	3,0	1,8
Среднее остаточное содержание в кварц-полевошпатовой массе пегматита	0,4	2,0	5,0

Под термином «ураноносные пегматиты» чаще всего описываются пегматитовые тела, проработанные высокотемпературными растворами и обогащенные ураном в постмагматические стадии (Ермолаев, Тарасов, 1963).

Литература

1. Жмодик С.М. Геохимия радиоактивных элементов в процессе выветривания карбонатитов, кислых и щелочных пород. – Новосибирск, Наука, 1984. – 165 с.
2. Митропольский А.С. Уран и торий в процессах развития земной коры юга Алтае-Саянской складчатой области. // Геология и радиогеохимия Средней Сибири. – Новосибирск. – Новосибирск: Наука, 1985. – С. 64-89.
3. Основные черты геохимии урана. М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 352 с.
4. Поведение радиоактивных элементов в геологических процессах. М: Недра, 1978. – 144 с.
5. Проблемы радиогеологии. / Под ред. Н.П. Лаверова, Г.Б. Наумова – М., 1983. – .
6. Радиоактивные элементы в горных породах. Материалы первого всесоюзного радиогеохимического совещания. 15-19 мая, 1972 г., Новосибирск. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1975. – 296 с.
7. Рихванов Л.П. Радиогеохимическая типизация рудно-магматических образований (На примере Алтае-Саянской складчатой области). – Новосибирск: Изд-во СО РАН филиал «ГЕО», 2002. – 550 с.
8. Смыслов А.А. Уран и торий в земной коре. – Л.: Недра, 1974. – 231 с.
9. Титаева Н.А. Ядерная Геохимия: Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 336 с.