Геохимия урана и тория в магматическом процессе

Среднее содержание уран и тория в основных типах магматических горных пород (по Н.А. Григорьеву, 2002)

Горные породы	Содержание элементов, г/т		Th/U
	U	Th	
Интрузивные:	**3,2**	**14,0**	**4,4**
ультрабазиты	0,001	0,004	4,0
Базиты	0,8	3,2	4,0
Гранодиориты	2,7	9,9	3,7
Сиениты	3,0	13,0	4,3
Граниты	3,9	18,0	4,6
Эффузивные:	**1,4**	**4,4**	**3,1**
Основные вулканиты	0,86	2,7	3,1
Средние вулканиты	1,1	4,1	3,7
Кислые вулканиты	4,5	13,0	2,9

Анализ этих данных свидетельствует о том, что интрузивные магматические горные породы в целом существенно более радиоактивны, чем вулканогенные. К тому же для них характерно более высокое торий-урановое отношение. Достаточно выдержанное различие в торий-урановом отношении интрузивных и эффузивных разностей магматических пород требует специального анализа. Эти различия выявились только в последнее время в результате новых оценок содержаний элементов на основе современных аналитических данных. В более ранних сводках таких различий установлено не было.

Серия	породы	Содержание элементов, г/т		Th/U
		U	Th	
Интрузивные породы				
известково-щелочная	Ультраосновные: дунит,пироксенит и др.	0,03	0,08	2,7
	Основные: габбро, диабаз и др.	0,6	1,8	3,0
	Средние: диорит, кварцевый диорит	1,8	6,0	3,3
	Кислые:			
	гранодиорит	2,1	8,3	4,0
	плагиогранит	2,7	9,6	4,0
	биотитовый гранит	4,0	15,0	3,7
	лейкократовый аляскитовый гранит	7,0	40,0	5,6
щелочная	Мельтейгит, меймечит, йолит	2,6	9,8	3,8
	Кимберлит (неалмазоносный)	2,6	8,8	3,4
	Кимберлит (алмазоносный)	3,2	16,3	5,1
	Сиенит	-	-	-
	Миаскитовый нефелиновый сиенит	4,1	7,2	1,8
	Агпаитовый нефелиновый сиенит	10,3	28,3	2,8
Эффузивные породы				
известково-щелочная	Базальт, диабаз	0,7	2,3	3,2
	Андезит, андезитовый порфирит	1,2	4,0	3,3
	Дацит, дацитовый порфирит	2,5	10,0	4,0
	Липарит, кварцевыц порфир	4,7	19,0	4,0
щелочная	Трахибазальт	2,4	8,0	3,3
	Трахиандезит	3,5	15,0	4,2
	Трахит, трахилипарит	3-8	30-50	4-5

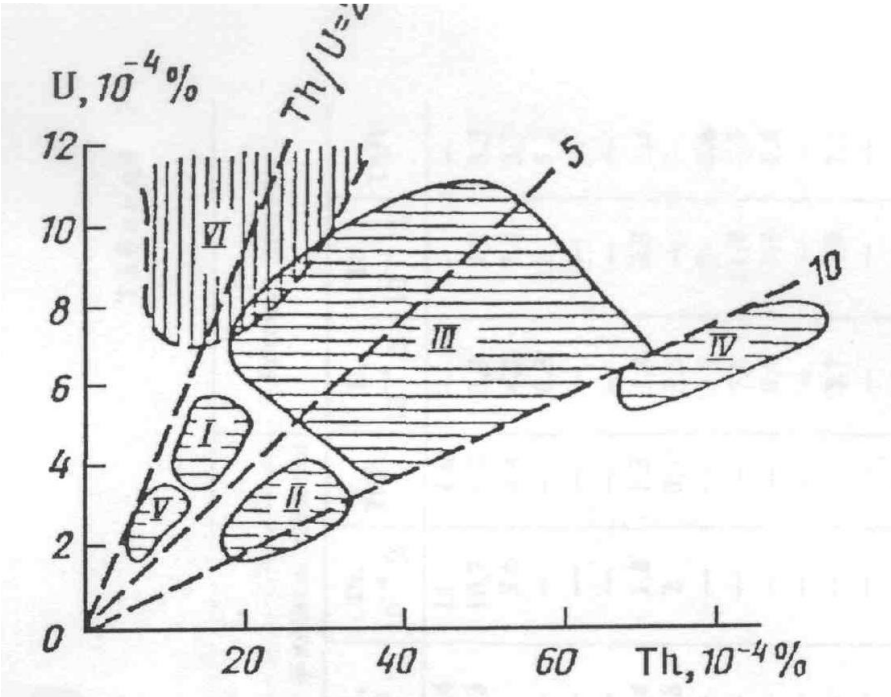


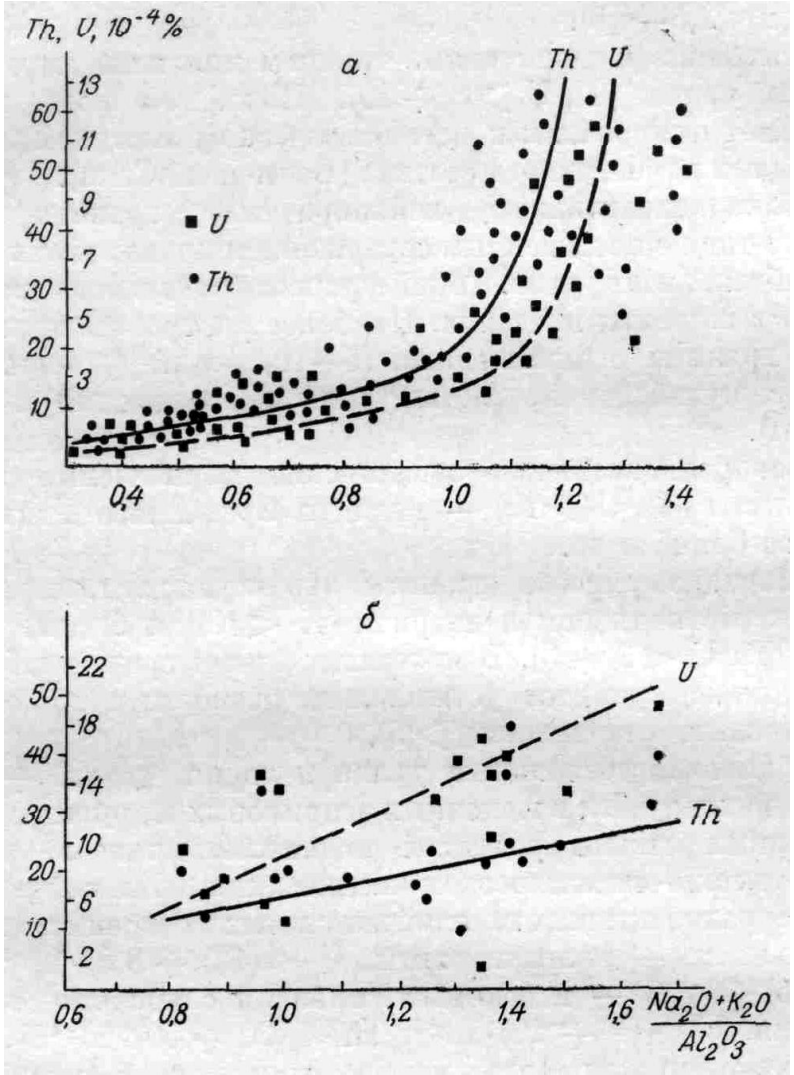
Рис. 1. Главнейшие радиогеохимические типы гранитов.

I — нормальнорадиоактивные граниты, Th/U = 2,5—4,5; *II* — повышеннорадиоактивные граниты, Th/U = 6—10; *III* — высокорадиоактивные редкометалльные граниты, Th/U > 5—10; *IV* — высокорадиоактивные ториеносные граниты, Th/U > 10; *V* — слаборадиоактивные плагиограниты, Th/U < 2—5; *VI* — высокорадиоактивные существенно ураноносные граниты эвгеосинклинальных (?) зон, Th/U = 1—2.

Наиболее сложным является распределение урана и тория в гранитоидных породах, среди которых Л. В. Комлевым еще в 50-х годах 20 века было выделено несколько радиогеохимических типов:

1. нормальнорадиоактивные граниты с близким к кларку содержанием урана и тория и средним торий-урановым отношением (2,5—4,5);
2. повышеннорадиоактивные граниты при пониженном содержании урана (Th/U > 6–10). Подобного рода граниты часто приурочены к метаморфическим выступам, сложенным породами карбонатного состава;
3. высокорадиоактивные лейкократовые граниты редкометалльного типа с повышенным содержанием урана, тория, бериллия, молибдена, вольфрама. Торий-урановое отношение в них изменяется в широких пределах. Наиболее распространены лейкократовые граниты с повышенным торий-урановым отношением (5-10);
4. высокорадиоактивные существенно ториеносные аляскитовые граниты (Th/U > 10);
5. слаборадиоактивные граниты (гранодиориты, плагиограниты), богатые кальцием и натрием и бедные ураном и торием (Th/U < 2–3). В настоящее время среди слаборадиоактивных плагиогранитов установлены разности с повышенным торий-урановым отношением (>5) – гранодиориты и плагиограниты;
6. высокорадиоактивные лейкократовые граниты эвгеосинклинальных (?) зон с пониженным торий-урановым отношением (1–2).

- Наиболее резкая разница в радиоактивности отмечается между гранитами, богатыми кальцием – плагиогранитами (от $(1,5–3,1)\times10^{-4}\%$ до $(5–15)\times10^{-4}\%$), и гранитами, бедными кальцием с высоким содержанием калия (от $(4–10)\times 10^{-4}\%$ до $(20–50)\times 10^{-4}\%$).
- Установлено, что в процессе дифференциации магматических очагов гранитоидного состава уран накапливается в поздних дифференциатах. Этот факт согласуется с общей направленностью процесса накопления урана и тория от более основных разностей гранитов к более кислым и щелочным.



Зависимость содержания урана и тория в щелочных породах от коэффициента агпаитности (по А.А. Смыслову, 1974).

Породы: а – докембрийские, б - фанерозойские

Магматические образования (интрузивные и эффузивные) с повышенной щелочностью характеризуются более высокой радиоактивностью по сравнению с близкими по кислотности породами известково-щелочной серии, что отмечается как в ультраосновных щелочных породах (меймечитах, мельтейгитах и др.), так и в кислых (трахитах, трахилипаритах и др.). В щелочных породах нет прямой корреляционной зависимости между содержанием урана и тория, с одной стороны, и калия — с другой. Из петрогенных компонентов наиболее отчетливо проявляется связь радиоактивности с коэффициентом агпаитности

$(K_2O + Na_2O) / Al_2O_3)$

- Породы жерловой и субвулканической фаций более обогащены ураном и торием, чем образования покровных фаций. При прочих равных условиях в породах, обогащенных порфировыми выделениями, содержание урана и тория выше.
- Среди магматических комплексов намечается несколько типов с содержанием урана выше критического уровня (>(4,5—5) $\times 10^{-4}$%), для которого сохраняется прямая пропорциональная зависимость содержания элемента от содержания петрогенных компонентов (SiO_2, K_2O и т. д.). Для таких пород характерно, как правило, высокое содержание легкоизвлекаемого урана, наличие свободных форм элементов, не включенных в кристаллические структуры породообразующих и акцессорных минералов.

Детальный анализ радиогеохимических особенностей магматических пород показал, что содержание урана и тория в различных интрузивных комплексах и вулканических сериях изменяется не только в связи с изменением кремнекислотности и щелочности, но и от одной тектонической структуры к другой.

Так, среднее содержание урана *в породах базитового ряда* в пределах Макаракского грабена составляет 4,0 г/т при величине торий-уранового отношения 1,6, Кия-Шалтырском 2,5 и 1,8 соответственно, в Талановском – 3,4 и 2,1, в Тайдонском – 1,3 и 3,5, Агульском прогибе – 0,8-1,4 и 3,0-3,6, в Дербинско-Бирюсинской зоне – 1,5 и 4,8, в Кемчугской вулкано-тектонической структуре – 4,3 и 1,0, в Сыдо-Ербинской 2,8 и 1,7 и Центрально-Тувинской впадинах – 2,9 и 2,4. Еще более контрастно изменения видны в щелочно-сиалических породах, в которых содержание урана изменяется от 2,5г/т (Митропольский, 1981) до 22,5 (Рихванов и др., 1987) и даже до 39-98г/т.

- Распространенные среди гранитоидов, кислых вулканитов или щелочных пород высокорадиоактивные разности могут иметь различную природу. Чаще всего аномальная радиоактивность обусловлена наложенными на магматические тела гидротермально-метасоматическими изменениями и имеет вторичное происхождение.

Но распространены и высокорадиоактивные магматические породы с сингенетичными концентрациями урана и тория. В последние десятилетия появилось значительное количество работ, в которых делаются попытки объяснить существование близких по составу магматических пород, отличающихся по параметрам накопления урана и тория. При этом все чаще обращается внимание на **неоднородность состава мантии**. Обогащённость отдельных участков мантии несовместимыми (некогерентными) элементами, в том числе ураном и торием, объясняется проявлением метасоматических процессов в мантии.

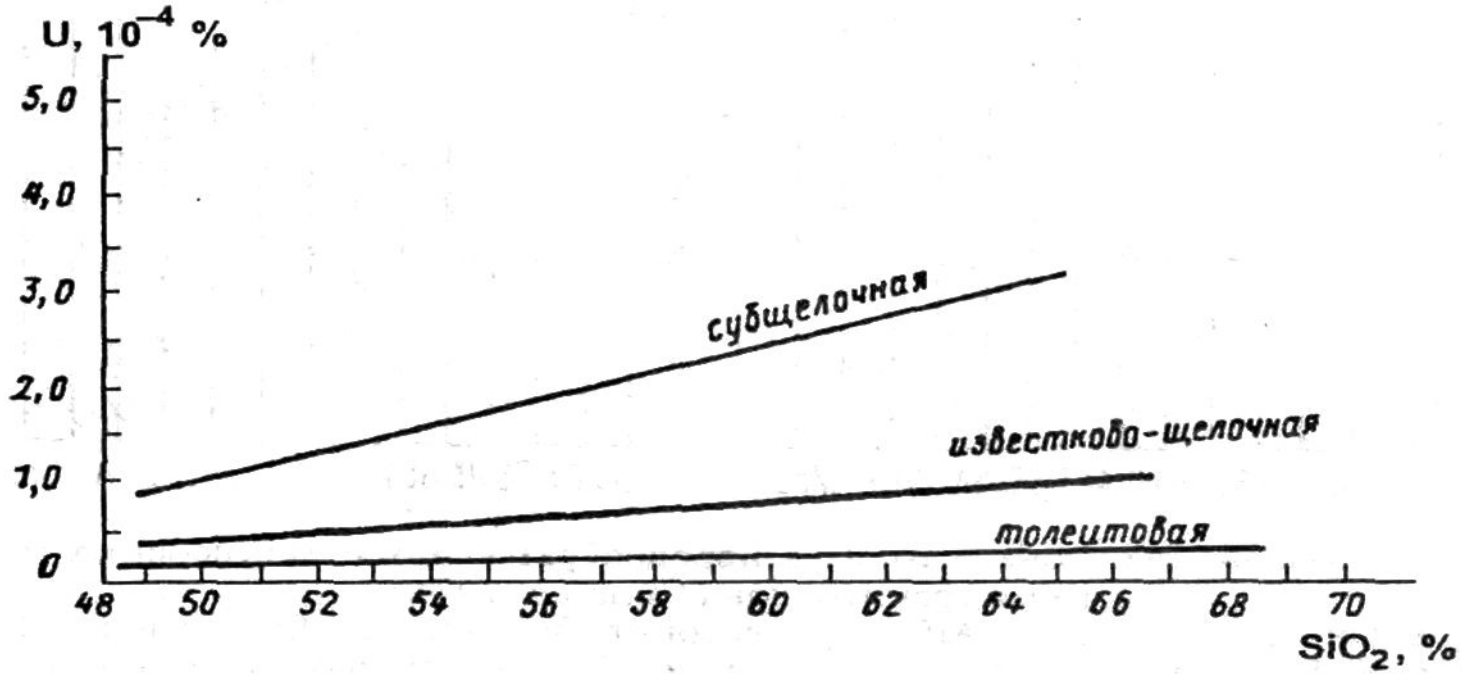
- Согласно Н.А. Титаевой (2000) концентрацию урана и тория в магматических породах определяет три важнейших фактора:

1) формационная принадлежность к тому или иному глобальному резервуару;
2) принадлежность к той или иной серии щелочности;
3) принадлежность к определенному петрохимическому типу пород в зависимости от содержания SiO_2.

1. Одинаковые по составу магматические породы (например, базальты) могут более чем на порядок различаться по содержанию U и Th в зависимости от того, к какому резервуару – обогащенному или обедненному — принадлежит их источник магматизма.

Среднее содержание уран и тория в базальтах океана (по Н.А. Титаевой, 2000)

Тип пород	Содержание элементов, г/т		Th/U
	U	Th	
Срединно-океанические хребты			
обедненные	0,01	0,02	2,0
обогащенные	0,18	0,53	3,1
Океанические острова			
толеиты	0,20	0,72	3,6
щелочные	0,68	2,76	4,0
щелочные	1,1	3,4	3,1
Островные дуги			
толеиты	0,1	0,25	2,5
Известково-щелочные	0,36	1,1	3,2



2. Внутри одной и той же магматической формации концентрации радиоактивных элементов будут определяться вхождением конкретной породы в ту или иную серию по щелочности, последовательно возрастая от толеитовой через известково-щелочную к щелочной серии. Этот вывод основан на том, что установлена положительная корреляция между U, Th и K во многих эндогенных процессах. Возрастание щелочности, возможно обусловленное влиянием щелочных флюидов, ведет и к возрастанию концентраций радиоактивных элементов. При этом связь между Th и K более жесткая, чем между U и K, поэтому возрастание концентраций сопровождается и возрастанием отношения Th/U.

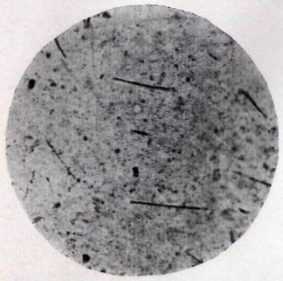
3. Внутри каждой серии пород (толеитовой, известково-щелочной, щелочной) в процессе фракционной кристаллизации наблюдается закономерное возрастание содержаний U и Th пропорционально увеличению содержания SiO_2.

Формы нахождения радиоактивных элементов в магматических породах

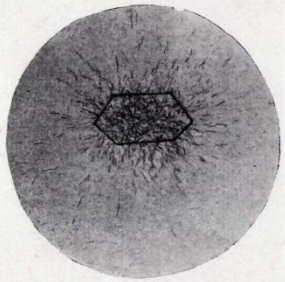
Все формы нахождения урана и тория в магматических породах можно объединить в три группы:

1) собственные минералы;
2) изоморфное вхождение в акцессорные минералы;
3) рассеянные формы.

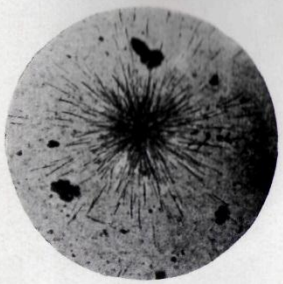
- Соотношения между отдельными формами зависят от состава пород и условий их кристаллизации. В ультраосновных, основных и средних породах известково-щелочной и толеитовой серий преобладает рассеянная форма урана и тория.
- В основных и средних интрузивных породах радиоактивные элементы рассеяны в решетках породообразующих минералов. При быстром охлаждении расплава в процессе образования вулканических пород уран и торий, находившиеся в остаточном расплаве, сосредоточиваются в стекле в форме твердого раствора. Вкрапленники содержат в 100–1000 раз меньше урана и тория.



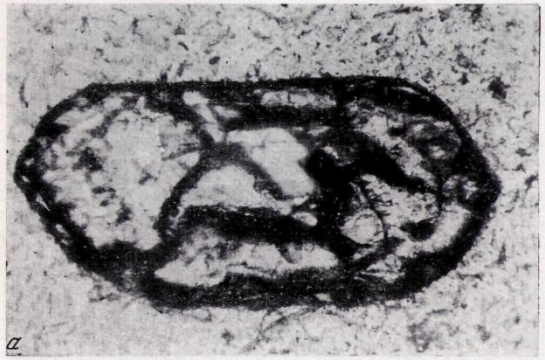
Фиг. 7

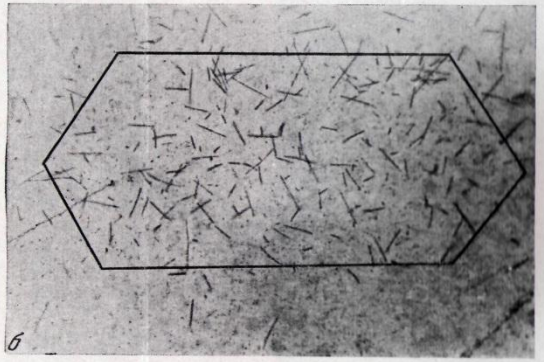


Фиг. 9



Фиг. 10





Фиг. 8

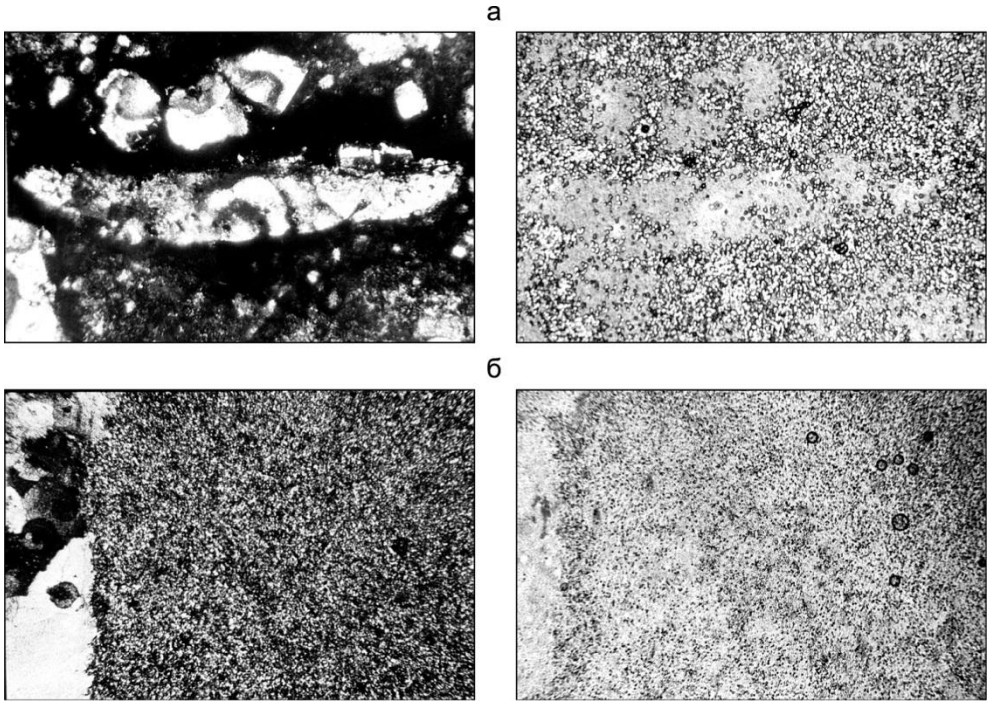
Фиг. 7. Микрорадиография кварц-полевошпатового участка шлифа гранитоида. Темное — треки от выделения радиоактивных элементов, ×320

Фиг. 8. Зерно циркона, × 320

а — микрофотография зерна. Проходящий свет; *б* — микрорадиография того же зерна. Темное — треки от выделений радиоактивного элемента

Фиг. 9. Микрорадиография акцессорного зерна (ограничено) гранотoрита, ×320

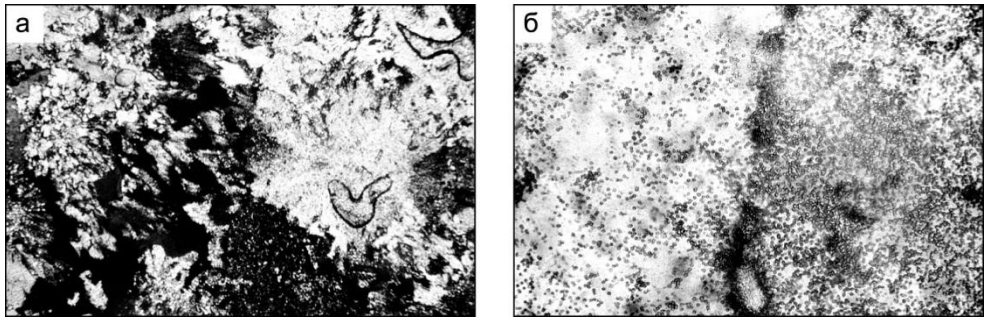
Фиг. 10. Микрорадиография точечного выделения радиоактивного минерала, ×320



Распределение урана в кварцевом порфире (а) и фельзит-порфире (б)

Уран накапливается в основной стекловатой массе. Наблюдается некоторое обогащение вблизи порфировых выделений (б – справа). Слева – шлиф; справа – детектор-лавсан. Николи ×. увел.60.

Перекристаллизация вулканических пород в ходе их дальнейшей истории может привести к перераспределению радиоактивных элементов. Большая часть рассеянного урана и в меньшей степени тория переходит при этом в сорбционные формы на гранях минеральных зерен и в микротрещинах. Эти формы легко извлекаются карбонатными растворами и получили название подвижных



Распределение урана при перекристаллизации стекловатой основной массы микрофельзитовой структуры с образованием гранобластовой структуры.

а – шлиф; б – детектор-лавсан. Николи ×. увел.60.

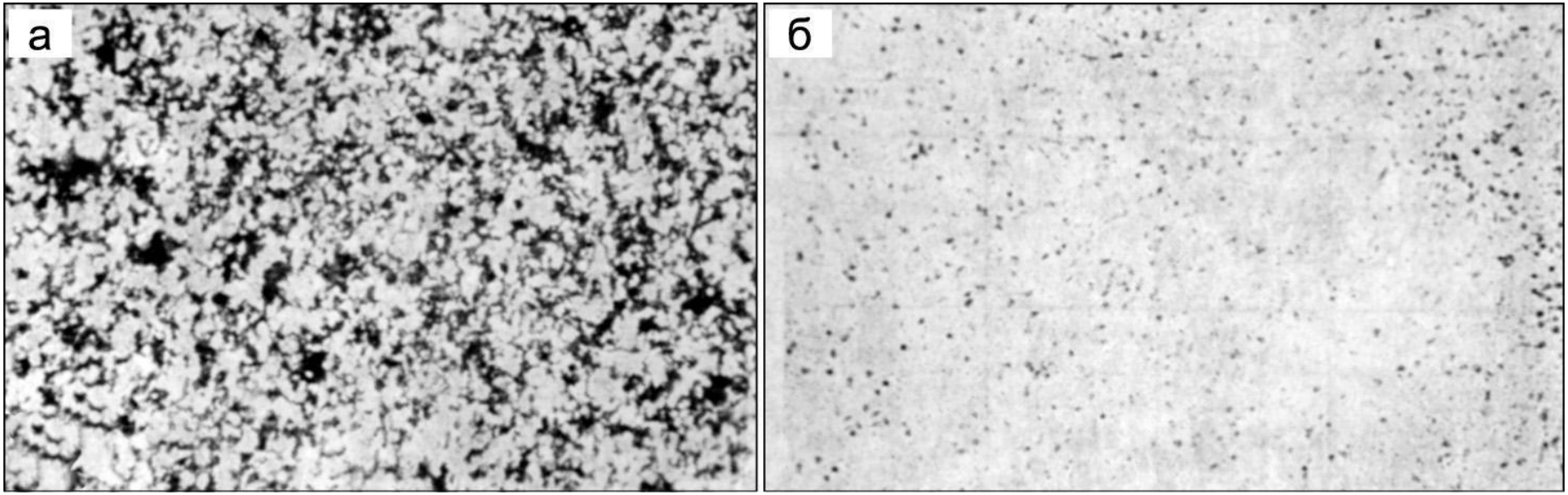
Поминеральный баланс урана в позднепалеозойских гранитоидах Кузнецкого Алатау (по В.А. Домаренко, 1979)

Минерал	Содержание минерала в породе, %	Содержание урана в минерале, г/т	Доля урана в данном минерале, %
Биотитовыи сиенит, Кундустуюльскии массив (урана 21,6 г/т)			
Биотит I	**4,1**	**1,05**	**3,1**
Биотит II	**2,0**	**5,5**	**0,6**
Плагиоклаз	**31,4**	**0,58**	**0,8**
Серицитизированный плагиоклаз	**10**	**1,08**	**0,5**
Альбитизированный плагиоклаз	**22,0**	**0,22**	**0,2**
Альбитизированный микроклин	**24,0**	**0,18**	**0,2**
Кварц	**2,6**	**0,83**	**0,1**
Акцессорные минералы	**0,5**	**9,34**	**0,3**
Субмикровключения, межзерновые швы	**3,4**	**—**	**93**
Биотитовыи сиенит, Богородский массив (урана 11,6 г/т			
Биотит слабохлоритизированный	**3,0**	**6,56**	**1,7**
Альбит-олигоклаз	**10**	**2,4**	**0,6**
Серицитизированный альбит-олигоклаз	**2,5**	**2,41**	**0,5**
Микроклин альбитизированный	**65**	**1,56**	**8,7**
Кварц	**23,9**	**0,97**	**2,0**
Акцессорные минералы	**0,6**	**17,8**	**0,9**
Субмикровключения, межзерновые швы	**5**	**—**	**85,6**

Условия миграции и концентрирования уран и тория при формировании интрузивно-магматических комплексов и вулканогенных серий

- Поведение элемента в процессе магматической кристаллизации зависит от его концентрации в магме, структуры кристаллов, в которые он может войти, и его собственных кристаллохимических свойств. Концентрация урана и тория в магматических расплавах, за исключением некоторых гранитных, достаточно низкая (10^{-4}%), что не позволяет им образовывать собственные минералы. Следовательно, в процессе магматической кристаллизации уран и торий должны входить в той или иной степени в минералы других химических элементов. В восстановительных условиях магматических камер уран находится в степени окисления 4+ и является химическим аналогом Th^{4+}. Высокий заряд U^{4+} и Th^{4+} и сравнительно большой ионный радиус не соответствуют ни одному из петрогенных элементов и не позволяют им изоморфно входить в решетки породообразующих минералов. Медленный процесс кристаллизации приводит к дистилляции ранних минеральных фаз от примесей и оттеснению урана и тория в остаточный расплав.

- В свежих вулканических породах, где происходит быстрая закалка расплава, можно наблюдать, что практически все радиоактивные элементы сосредоточены в стекле



Распределение урана в высокорадиоактивных кислых вулканитах Улитинского хребта (Восточный Саян), по данным f-радиографии

а - шлиф, б – детектор-лавсан. Поток нейтронов 10^{15} n·см^2/с. Увел. 65. Николи //.

- В интрузивном процессе происходит интенсивная дифференциация как урана, так и тория. Остаточные части расплава способны обогащаться радиоактивными элементами в сотни и тысячи раз.
- В природных расплавах с кларковой концентрацией U и Th основная их часть захватывается акцессорными минералами. В полнокристаллических интрузивных породах с ними обычно связано не менее 50% урана и еще большая часть тория. Возможно, этим механизмом, приводящим к выносу некоторого количества более подвижного урана с гидротермальными флюидами за пределы интрузии и объясняется более высокое торий-урановое отношение, характерное для интрузивных пород по сравнению с вулканогенными
- О том, что на позднемагматической стадии становления интрузий уран приобретает способность покинуть магматическую камеру, свидетельствуют многие данные. В этот период возрастает парциальное давление кислорода, что способствует окислению урана и увеличению его подвижности. Вследствие выноса урана будет возрастать отношение Th/U. Однако если для конкретного расплава характерна повышенная концентрация близких к U (IV) по кристаллохимическим свойствам элементов (лантаноиды, Y, Th, Zr), достаточная для образования их собственных минералов, то уран прочно связывается в них в виде изоморфной примеси. Лишь в том случае, когда концентрация указанных элементов невелика, основная часть урана будет находиться в рассеянном состоянии и сравнительно легко извлекаться выделяющимися флюидами

- Магматических месторождений урана и тория не существует. Гранитные интрузии даже со сравнительно высокими содержаниями радиоактивных элементов экономической ценности в настоящее время не представляют. В последнее время на территории Монголии установлены уникальные гранитоидные интрузии со специфической редкометалльной минерализацией. Предполагается, что редкометалльные граниты с армстронгитом и эльпидитом, отличающиеся высокими концентрациями урана и тория имеют первично магматическую природу (Коваленко, 1985, 1995 и др.).