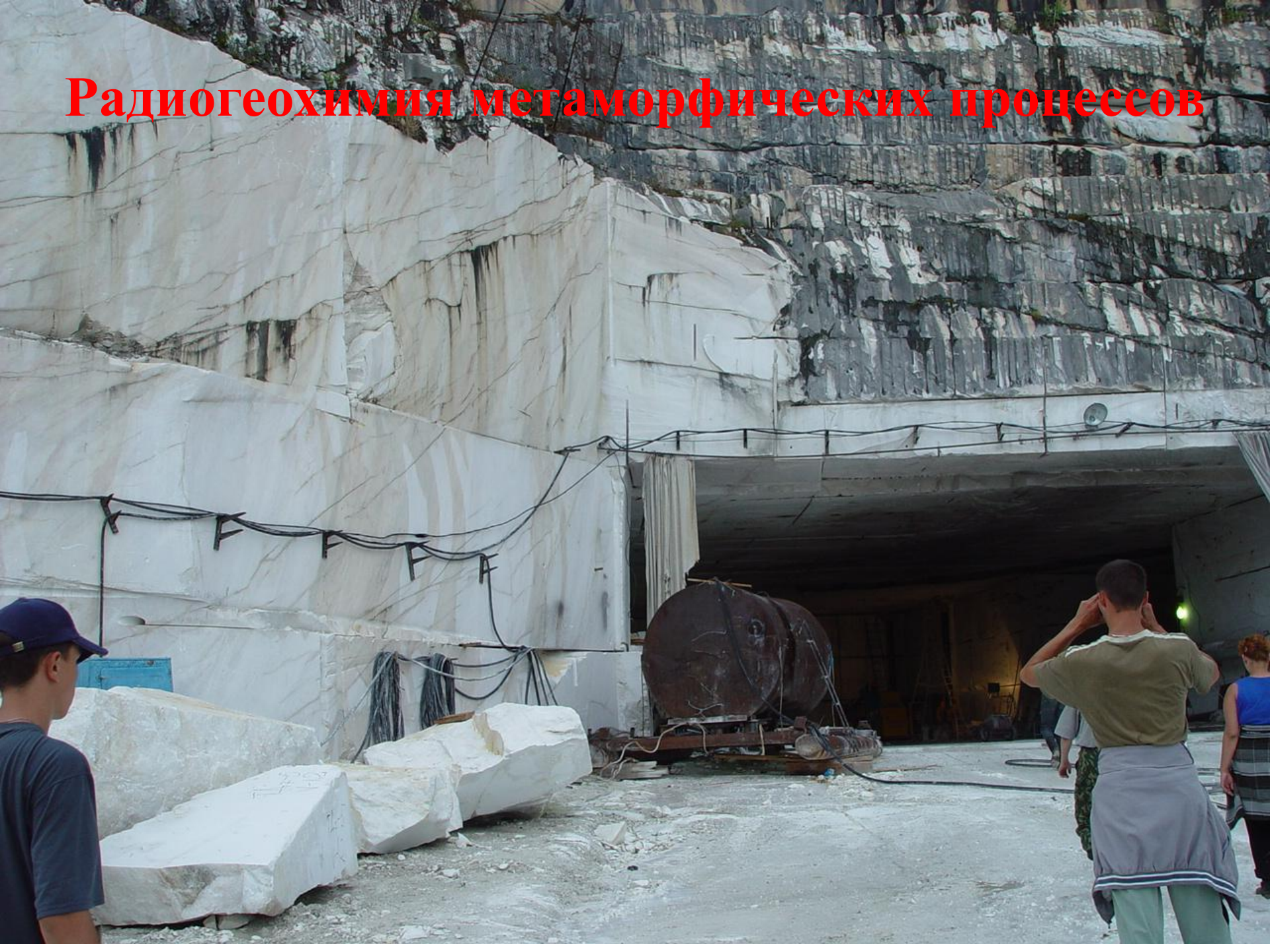


# Радиогеохимия метаморфических процессов



**Термином «метаморфизм» обозначают разнообразные эндогенные процессы, с которыми связаны те или иные изменения в структуре, минеральном и химическом составе горных пород в условиях, отличающихся от их первоначального образования (Геологический словарь, 1978).**

Главными факторами метаморфизма является температура, давление, состав и химическая активность растворов или флюидов. **Метаморфические преобразования заключаются в распаде первоначальных минералов, в молекулярной перегруппировке и образовании новых, более устойчивых ассоциаций минеральных видов, т.е. сводятся к частичной или полной перекристаллизации пород с образованием новых структур и, в большинстве случаев, новых минералов.**

Метаморфические процессы весьма многообразны по форме проявления и характеру преобразования пород. Они классифицируются с учетом отдельных факторов: термодинамических, физико-химических и геологических условий. Главными типами метаморфизма являются:

**региональный метаморфизм, в том числе ультраметаморфизм, контактовый метаморфизм, динамометаморфизм.**

# Региональный метаморфизм

**Региональный метаморфизм** представляет собой совокупность метаморфических изменений горных пород, вызываемых односторонним и гидростатическим давлением и температурой. Они проявляются на больших пространствах в связи с формированием подвижных поясов земной коры и находятся вне зависимости от магм. На больших глубинах действие одностороннего давления постепенно затухает, а гидростатического – все возрастает. Растет и температура вплоть до проявления ультраметаморфизма и палингенеза. При региональном метаморфизме образуются метаморфические и кристаллические сланцы и гнейсы. Выделяют различные фации регионального метаморфизма: зеленосланцевую, эпидот-амфиболитовую, амфиболитовую, гранулитовую, глаукофановых сланцев и эклогитовую.

***Ультраметаморфизм*** выделяется как крайний случай регионального метаморфизма. С ультраметаморфизмом связаны такие явления как гранитизация, мигматизация, анатексиз, палингенез и реоморфизм.

# Контактовый метаморфизм

Контактовый метаморфизм – различные изменения вмещающих пород, обусловленные тепловым и химическим воздействием интрузивных магматических масс.

Представляет собой почти изохимическое преобразование пород под влиянием высоких температур вблизи интрузивных тел, происходящее обычно в статических условиях. Интенсивность контактового метаморфизма, характер вызванного им преобразования горных пород зависят от первоначального состава пород, удаленности их от контакта, глубинности процесса, размеров, формы и характера контактов интрузивного тела, состава слагающих его пород, участия в метаморфизме летучих веществ и растворов.

Степень преобразования пород убывает в направлении удаления от контакта с интрузией. Типичными продуктами контактового метаморфизма являются различные роговики. Выделяют фации контактового метаморфизма: альбит-эпидот-роговиковую, роговообманково-роговиковую, пироксен-роговиковую и санидинитовую.

# Контактовый метаморфизм



# Динамометаморфизм

**Динамометаморфизм** – структурное и, в меньшей степени, минеральное преобразование горных пород под воздействием тектонических сил без участия магмы. Основными факторами динамометаморфизма являются гидростатическое давление и одностороннее давление (стресс). В зависимости от величины и соотношения гидростатического и одностороннего давлений динамометаморфизм либо проявляется в частичной или полной перекристаллизации горных пород без нарушения их сплошности, либо приводит к разрушению, раздроблению пород. Продуктами такого метаморфизма являются *катаклазиты, милониты и различные сланцы*.

Особым типом динамометаморфизма является **ударный метаморфизм** – изменения в горных породах и минералах, обусловленные прохождением мощной ударной волны. Единственным известным природным процессом, при котором проявляется ударный метаморфизм, является падение крупных метеоритов. Его особенности: мгновенность проявления, высокие пиковые давления (от 10-100 кбар до Мбар), высокие остаточные температуры (свыше 1500°C) и кинетические реакции преобразования вещества. При ударном метаморфизме возникают высокобарические фазы ряда соединений (коэсит, стишовит, алмаз, рингвудит), происходит дробление минералов, разрушение их кристаллических решеток (появление диаплектовых минералов и стекол).

# Радиогеохимия метаморфитов

Несмотря на довольно большой объем аналитических данных, оценка содержания урана и тория в метаморфических породах представляет довольно сложную задачу, так как их радиоактивность зависит не только от состава и геохимических особенностей первично-осадочных и магматических пород, но также от степени их метаморфизма и метасоматической проработки.

В общем случае содержание радиоактивных элементов в метаморфических породах зависит от двух основных факторов:

1. от их концентрации в исходных породах;
2. от степени преобразования этих пород в условиях метаморфизма.

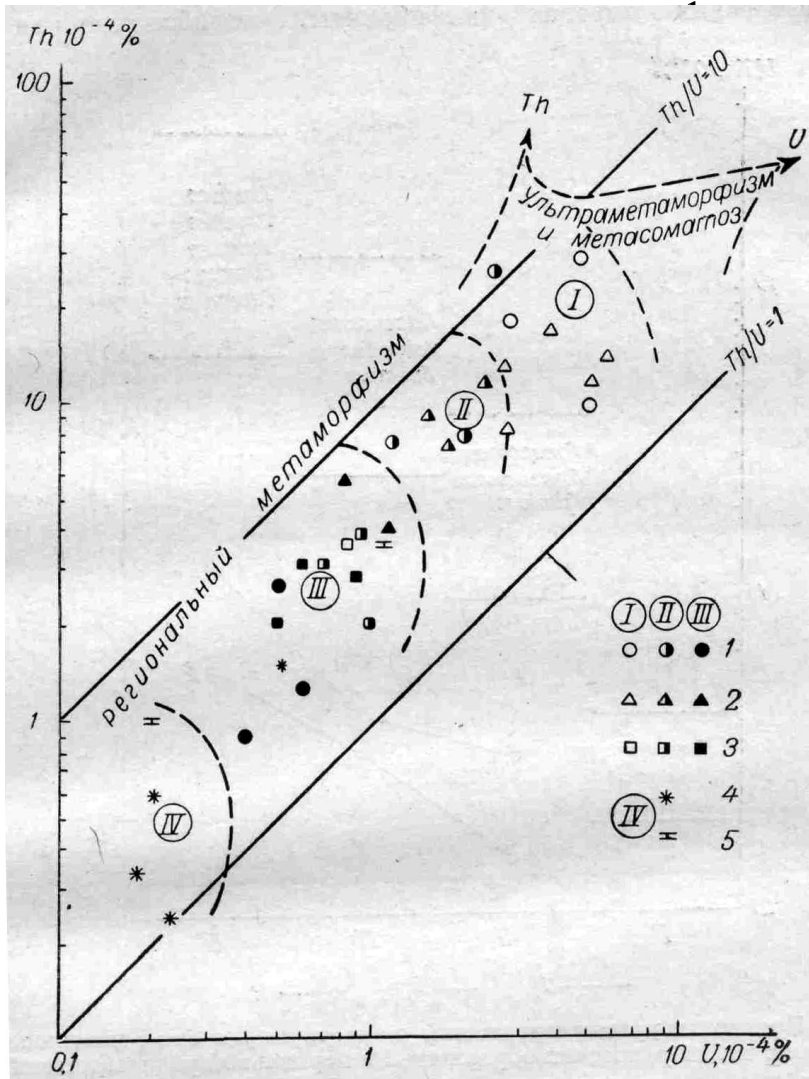
Наиболее обогащены радиоактивными элементами породы развивающиеся по углеродистым, углеродисто-глинистым и другим породам, обогащенным органическим веществом и фосфором, по кислым и щелочным магматическим породам, а обеднены – развитые по карбонатным породам, базитам и ультрабазитам.

Средние оценки содержания урана и тория в метаморфических породах показывают, что они обеднены ураном по сравнению с исходными породами и сопоставимы с ними по содержанию тория

Горные породы, слои	Содержание элементов, г/т		Th/U
	U	Th	
Метапесчаники/пески, песчаники	1,7/2,3	7,7/7,8	4,5/3,4
Парагнейсы, сланцы/глины, глинистые сланцы	2,3/4,5	9,2/10,0	4,0/2,2
Карбонатные породы/ карбонатные породы	0,7/2,1	1,7/2,4	2,4/1,1
Параметаморфиты/осадочные породы	2,2/3,4	8,7/7,7	4,0/2,3
Гранито-гнейсы/граниты	2,4/3,9	10,0/18,0	4,2/4,6
Метариолиты/кислые вулканиты	-/4,5	9,5/13,0	-/2,9
Метаандезиты/средние вулканиты	-/1,1	16/4,1	-/3,7
Матабазиты/базиты	0,9/0,8	3,9/3,2	4,3/4,0
Ортометаморфиты/магматические породы	2,1/3,2	9,5/14	4,5/4,4



Отчетливо проявлено снижение содержания урана и тория от исходных пород к метаморфизованным. Эта закономерность хорошо просматривается и на обобщенном графике содержания урана и тория в породах различных фаций



Содержание урана и тория в метаморфических породах (по А.А. Смыслову, 1974).

Фации метаморфизма (цифры в кружках): I – зеленосланцевая и эпидот-амфиболитовая, II – амфиболитовая, III – гранулитовая, IV – эклогитовая.

Породы: 1 – гнейсы, 2 – кристаллические сланцы, 3 – амфиболиты, 4 – эклогиты, 5 – метаморфизованные карбонаты.

Анализ литературных данных по содержанию U и Th в различных геологических блоках материковой коры свидетельствует **о снижении радиоактивности парапород на глубоких уровнях земной коры** (Ермолаев, 1996). На Русской платформе среднее содержание урана в осадочном чехле составляет 2,6 г/т при содержании в метаморфическом фундаменте 1,9 г/т. Для Северо-Американской платформы аналогичные характеристики соответственно 3,6 и 2,2 г/т.

Данные по снижению радиоактивности осадочно-метаморфических пород с нарастанием интенсивности регионального метаморфизма хорошо согласуются с изотопными наблюдениями многих специалистов, выявивших систематические неувязки при определении изотопного геологического возраста пород уран – свинцовым методом. Древние формации еще более удревлены по возрастам, рассчитываемым из отношений  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  и  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ . В то же время геохронологическая интерпретация хорошо увязывается по отношениям  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ . Такой парадокс объясняется направленной миграцией урана (и тория) при инертности радиогенных свинцов (Ермолаев, 1996).

Радиоактивные элементы перераспределяются из нижних оболочек земной коры в верхние, то есть из условий с более напряженными P-T параметрами в менее напряженные условия. **Иначе говоря, в геологической эволюции земной коры возникает и функционирует направленный поток радионуклидов в верхние оболочки планеты.**

## Формы нахождения радиоактивных элементов в метаморфических породах

- Формы нахождения радиоактивных элементов в метаморфических породах принципиально не отличаются от форм их нахождения в магматических и осадочных породах. По сравнению с отдельными типами осадочных и магматических пород в них **уменьшается доля рассеянного урана и возрастает роль минеральных форм нахождения**. Обусловлено это мобилизацией и выносом «подвижного» урана, составляющего основную часть рассеянного элемента, в условиях высоких градиентов давления и температур.

# Уран и торий при региональном метаморфизме

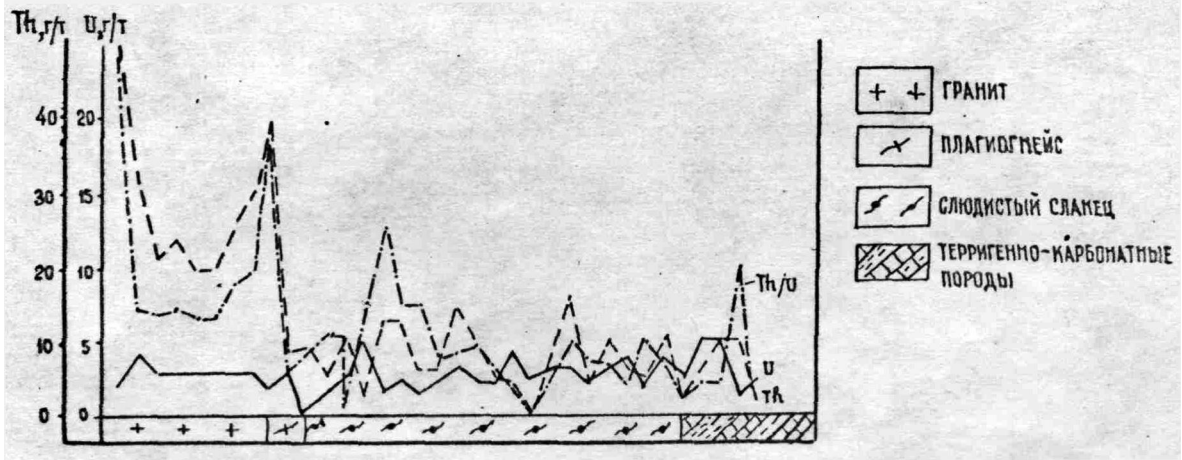
Процессы прогрессивного метаморфизма горных пород обуславливают направленную **миграцию урана и тория из термодинамических зон с высокими температурами и давлением в условия с менее напряженными физико-химическими параметрами.**

В процессе регионального метаморфизма пород установлено отчетливое **снижение концентрации как урана, так и тория.** При этом содержание урана изменяется более контрастно, что приводит к **возрастанию торий-уранового отношения.** Согласно данным Я.Н. Белевцева и др., происходит последовательная потеря содержания урана в процессе регионального метаморфизма хемогенных и терригенных отложений от зеленосланцевой до гранулитовой фаций (табл.).

Осадки	Фации метаморфизма		
	зеленосланцевая	амфиболитовая	гранулитовая
Хемогенные	0,8	0,6	0,4
Терригенные	2,4	1,7	0,7

# Уран и торий в метаморфических породах докембрия Северной Норвегии (По Heier, Adams, 1965)

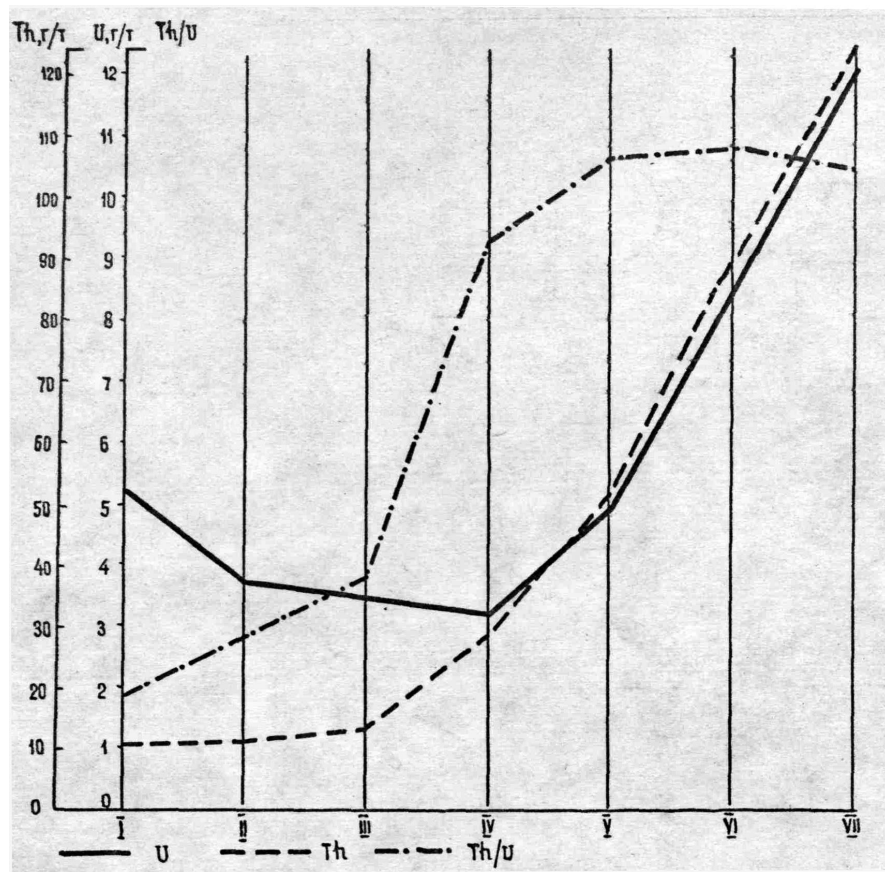
Фации регионального метаморфизма	Содержание элементов, г/т		Th/U
	U	Th	
Эпидот-амфиболитовая	3,45	26,48	7,5
Амфиболитовая	1,22	9,39	7,0
Гранулитовая, слабометаморфизованные породы	0,88	4,09	4,8
Гранулитовая, сильнометаморфизованные породы	0,39	0,93	2,2



Радиогеохимический профиль по долине р. Туманшетки через Переберинско-Подпорогский гранито-гнейсовый купол в Протеросаяне

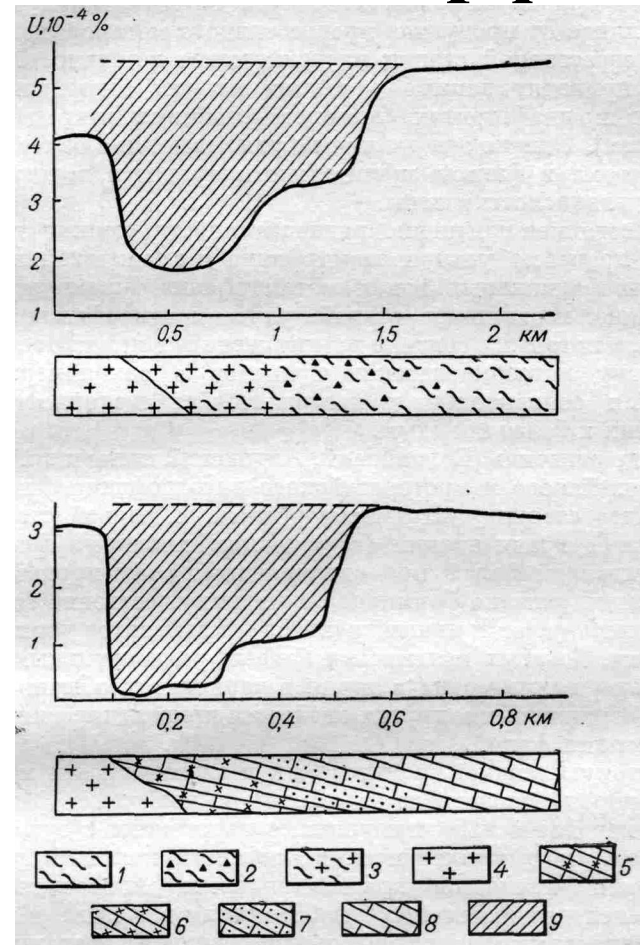
Распределение урана и тория по зонам в пределах Переберинско-Подпорогского гранито-гнейсового купола в Протеросаяне.

I – глинистые сланцы, II – двуслюдяные сланцы с гранатом, III – плагиогнейсы биотитовые, IV – гнейсо-граниты биотитовые, V – гнейсо-граниты биотитовые флюоритизированные, VI – палингенно-анатектические жильные порфировидные граниты, VII – флюоритизированные палингенно-анатектические граниты.



# Уран и торий при контактовом метаморфизме

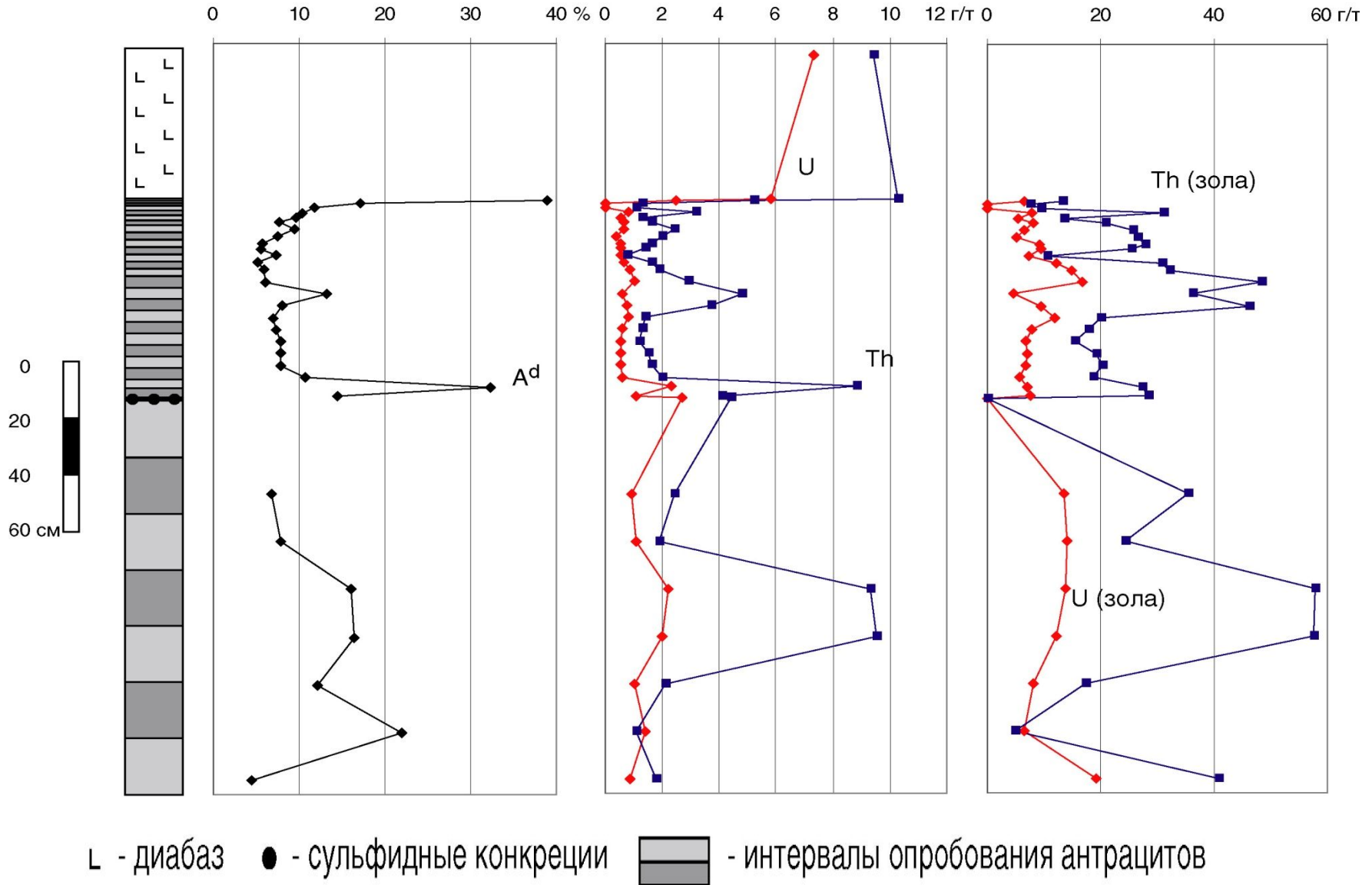
В условиях прогрессивного контактового метаморфизма около гранитов, прорывающих хемогенные и терригенные отложения, также наблюдается миграция урана. Особенно велика потеря урана породами на фоне отторжения углекислоты и воды и выгорания органического вещества при контактовом метаморфизме первично обогащенных рудными элементами битуминозных и углеродистых осадков



Распределение урана в ороговикованных породах из зон контактового изменения гранитоидных интрузий Средней Азии (взято у А.А. Смыслова, 1974).

Сланцы: 1 – углеродисто-кремнистые, 2 – слабо ороговикованные (биотит-хлоритовые роговики); 3 – интенсивно ороговикованные породы, 4 – гранодиориты; мраморы: 5 – интенсивно перекристаллизованные, 6 – доломитизированные; известняки: 7 – окварцованные и частично скарнированные, 8 – неизмененные битуминозные; 9 – области выноса урана при контактовом метаморфизме.

# Change of U and Th concentrations at the contact metamorphism (bed XXXI, Mezhdurechenskoe deposit)





- Согласно расчетам, выполненным Н.П. Ермолаевым (1971) для углеродисто-кремнистых сланцев, имеет место четко выраженное **снижение средних концентраций урана на 35-40% от зоны к зоне в направлении к интрузии**. Столь большая разница в концентрациях урана между выделенными зонами заведомо покрывает возможные поправки, появляющиеся при учете изменения объемного веса породы.
- **Главное значение, определяющее поведение урана, имеет степень метаморфизма, который породы испытали до внедрения гранитов.** Воздействие последних на песчано-сланцевые породы, ранее измененные в условиях фации зеленых сланцев, вызывает их перекристаллизацию и приводит к исчезновению хлорита и эпидота – основных минералов-носителей урана. При этом породы теряют около 60% урана. Аналогичное воздействие гранитов на гранит-порфиры, ранее подвергшихся регрессивному метаморфизму, приводит к потере до 45% урана. В породах, измененных предшествующим метаморфизмом эпидот-амфиболитовой фации, наблюдается увеличение содержания урана, проявляющееся лишь в непосредственном контакте с гранитами. Уран здесь фиксируется преимущественно в агрегатах рутила и цирконе. При контактовом метаморфизме известковистых алевролитов, испытавших только диагенез, залегающих в кровле куполов гранитного массива, поведение урана подчинялось особенностям развития гидротермально-метасоматических процессов и привело к общему повышению его содержания, достигшему своего максимума в альбит-цоизитовых роговиках

# Уран и торий при динамометаморфизме

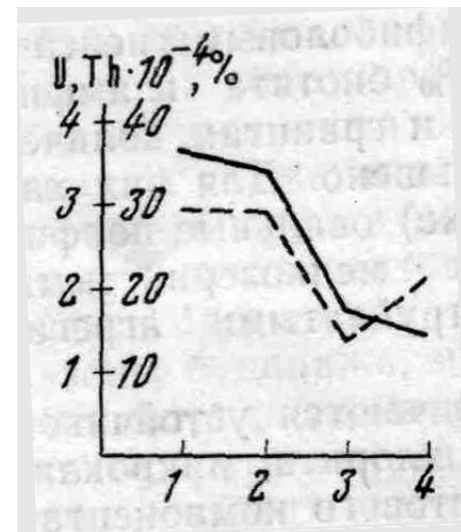
Согласно ограниченному числу данных по Украинскому щиту, в зонах динамометаморфизма отмечается привнос U, Be и Ga (Белевцев, 1975).

Более поздние данные В.К. Титова и др. (1978) показывают, что в пределах зон разломов происходит значительное перераспределение, привнос и вынос урана и тория, обусловленное динамотермальным метаморфизмом прогрессивной и регрессивной стадий.

На прогрессивной стадии образования бластомилонитов, милонитов и катаклазитов происходит, как и при региональном метаморфизме, вынос урана и тория, достигающий для производных амфиболитовой фации 30-60% от исходного количества этих элементов во вмещающих породах. В очково-сланцеватых гранитоидах вынос урана и тория минимален и отмечен лишь на участках максимальной деформации. Отмечено постепенное уменьшение усредненных содержаний урана и тория от неизмененных микроклиновых гранитов раннего протерозоя к их очково-сланцеватым разностям и далее к милонитам и бластомилонитам.

Изменение усредненных содержаний урана и тория при дислокационном метаморфизме микроклиновых гранитов раннего протерозоя (по В.К. Титову и др., 1978).

По оси абсцисс: 1 – гранит; 2 – очково-сланцевый гранит; 3 – эпидот – хлоритовый милонит; 4 – биотит-амфиболовый бластомилонит.



Таким образом, процессы метаморфизма **приводят к значительной перегруппировке вещества породы**, в том числе рассеянного в ней урана и тория. Кроме того, из пород, вовлеченных в прогрессивный метаморфизм, высвобождаются значительные количества воды и углекислоты, определяющие среду транспортировки радиоактивных элементов. По Н.П. Ермолаеву (1983), реакции перекристаллизации и замещения протекают на границе двух фаз: породообразующий минерал – окружающий пленочный раствор. Из анализа распределения урана методом осколочной радиографии в объеме минеральных зерен следует, что отторжение радиоактивной примеси от горной породы может происходить как при поверхностных явлениях (процессах десорбции в образующуюся при метаморфизме водно-углекислую фазу), так и при перекристаллизации минерала-носителя. В процессе перекристаллизации происходит **самоочистка кристаллизующегося вещества от микропримесей**, в том числе от урана и тория.

**При ультраметаморфизме имеет место возрастание радиоактивности от ранних этапов процесса к завершающим.** В наиболее поздних продуктах – щелочных палингенно-анатектических гранитах и пегматитах ультраметаморфических комплексов – может наблюдаться значительная концентрация урана и тория при обеднении радиоактивной примесью вмещающих пород. Формы миграции радионуклидов в расплавах не ясны. Рудные месторождения урана и тория чисто метаморфического генезиса не известны. Процессы метаморфизма как бы «вскрывают» горные породы, переводя рассеянные в них уран и торий в формы, способные к дальнейшей геохимической миграции.

# 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.