



**Геохимия урана и тория в осадочном процессе**



# Основные факторы и условия образования осадочных пород

Среди множества факторов, определяющих закономерности формирования осадочных пород и условия их образования **ведущее значение имеет тектоника**, в частности, режим колебательных движений земной коры.

Большое влияние на общий ход осадочного процесса оказывают **климат и рельеф**, но их роль в определенной мере регулируется тектоникой. Кроме того, на формирование осадочных толщ оказывает влияние **жизнедеятельность организмов, солевой состав и соленость вод, Eh, pH и др.**, но все они имеют подчиненное значение и оно во многом ограничивается общим ходом тектонического развития планеты, климатом и рельефом.

# Роль тектоники в процессе литогенеза.

- Колебательные движения вызывают трансгрессии и регрессии морских водоемов и, как следствие, перемещение береговых линий. Вместе с положением берега изменяется и состав осадков.
- Тектонические движения в пределах суши приводят к изменению положения области сноса осадочного материала, изменению базиса эрозии, что, в свою очередь, отражается на составе накапливающегося осадочного материала.
- Тектоника оказывает огромное влияние на скорость накопления осадков и их мощность.

# Влияние климата на литогенез.

Климат планеты определяется множеством факторов. Это интенсивность солнечной радиации, прозрачность и состав атмосферы, гипсометрическое положение суши и дна Мирового океана, соотношение площадей суши и моря, излучение внутреннего тепла планеты, направление ветров, направление и температура морских течений и т.д. Будучи последствием взаимодействия разных факторов, климат оказывает существенное влияние на седиментогенез в целом и на облик будущей породы.

Выделяют три типа климата: **нивальный, гумидный и аридный**. В соответствии с этим, Н.М. Страхов выделил три климатических типа литогенеза: **ледовый (нивальный), гумидный, аридный** и четвертый – **анклиматический, вулканогенно-осадочный**.

# Ледовый (нивальный) тип литогенеза

характеризуется нахождением воды преимущественно в твердой фазе (лед) и именно в такой фазе она проявляет свою активность. Низкая температура вызывает существенное замедление химических процессов и подавляет жизнедеятельность организмов. В связи с этим роль осадочного материала химического и органического происхождения при ледниковом литогенезе весьма незначительна или не проявляется вообще. Основная часть осадочного материала поставляется механическим выветриванием. Перенос осадочного материала осуществляется преимущественно ледниками и в меньшей степени водой подледниковых ручьев. Вследствие этого осадочная дифференциация проявлена слабо. В итоге накапливается совершенно несортированный осадочный материал, из которого образуются породы моренного типа – глины валунные, супеси, несортированные валунники.

# Гумидный тип литогенеза

- осуществляется в обстановках тропического, субтропического, влажного умеренного и холодного климатов. В каждом из этих климатических режимов осадкообразование имеет свои специфические черты при общности основных типовых признаков. Генезис осадочного материала при таком типе литогенеза наиболее многообразен. Здесь активно проявляют себя факторы механического разрушения, химического разложения, а также биологические процессы. В связи с этим в осадок возможно поступление обломочной, хемогенной и органогенной частей. Поскольку в разном климате температура, количество осадков, жизнедеятельность организмов неодинаковы, то образование осадков в каждом конкретном случае будет нести свои специфические черты.
- Многообразие обстановок в зонах гумидного климата предопределяет и разнообразие литологического состава пород. Здесь возникают **глинистые, обломочные (песчаники, алевроиты), хемогенные (карбонаты, бокситы и т.д.), органогенные (известняки, диатомиты, угли и др.) и смешанные осадочные образования**. Гумидный тип литогенеза в геологическом прошлом резко преобладал над остальными. В современную эпоху этот тип литогенеза также преобладает над всеми остальными, охватывая примерно 57% суши или 70% поверхности всей планеты

# Аридный тип литогенеза

- Породообразование в условиях повышенных температур, но при остром дефиците воды. Аридный литогенез характерен для континентов (пустыни, полупустыни, сухие степи), но имеет развитие и в морских условиях (Красное, Каспийское моря и др.). В обстановке аридного климата на континентах осадочный материал в виде обломочной и растворенных частей очень часто поступает из располагающихся по соседству гумидных зон – с гор вместе с мощными временными водотоками, ручьями и реками. В пределах областей аридного литогенеза перенос обломочного материала осуществляется главным образом ветром. Этому способствует отсутствие или слабое развитие почвенного покрова и растительности. Благодаря эоловому переносу терригенного материала из аридных зон выносятся алевритовый и глинистый материал, накапливается песчаный. В озерах, лагунах и морях осадконакопление осуществляется за счет аутигенного минералообразования, приносимого ветром песчаного, алевритового и глинистого материала, а также продуктов жизнедеятельности растительных и животных организмов. Если происходит засоление водоемов, осадкообразование за счет жизнедеятельности организмов постепенно сокращается и может совсем прекратиться. Доминирующее значение тогда получает химическая седиментация, проявляющаяся в последовательном накоплении сульфатов кальция, хлоридов натрия, калия и др. При опреснении водоемов седиментация эволюционирует в обратном порядке с постепенным возрастанием роли терригенных и органогенных пород.
- Таким образом, для аридного климата характернее следующий набор пород: эоловые пески и песчаники, глинисто-алевритовые отложения (нередко засоленные), известняки, доломиты, гипсы, ангидриты, каменная соль.

# Вулканоогенно-осадочный тип литогенеза

Азональный или аклиматический. Под ним Н.М. Страхов понимал породообразование на площадях вулканических извержений и в их окрестностях, находящимся под исключительным или определяющим влиянием эффузивного процесса. Отличительная черта этого типа литогенеза – осадочный материал в значительной степени поставляется вулканами, однако по мере удаления от очагов вулканизма в осадках все более возрастает роль обломочного и хемогенного материала, образующегося за счет продуктов выветривания.



## Содержание урана и тория в осадочных породах

Среднее содержание урана и тория в осадочных горных породах составляет 3,4 и 7,7 г/т соответственно. В отличие от кларка для верхней части континентальной земной коры, они обогащены ураном, но обеднены торием. По данным А.П. Виноградова в осадочных породах содержится 3,2 г/т U и 11 г/т Th при кларках для земной коры 2,5 и 13 г/т соответственно. Причину этого дисбаланса следует искать в разной подвижности элементов в зоне гипергенеза. По-видимому, основным резервуаром недостающего тория должны быть коры выветривания, из которых выщелочен уран, но для которых характерен избыточный торий.

### Среднее содержание урана и тория в осадочных породах верхней части континентальной коры (по Н.А. Григорьеву, 2003)

Горные породы	Содержание элементов, г/т		Th/U
	U	Th	
Пески и песчаники	2,3	7,8	3,4
Глины и глинистые сланцы	4,5	10,0	2,2
Карбонатные породы	2,1	2,4	1,1
Кремнистые породы	5,0	3,4	0,7
Эвапориты	0,68	0,7	1,0
Осадочные породы в целом	3,4	7,7	2,3
Кларк	2,5	9,3	3,7

Содержание урана и тория в главнейших типах осадочных отложений (с нормальной радиоактивностью) континентальной части земной коры(по А.А. Смыслову, 1974)

Группа и типы пород	Содержание элементов, г/т		Th/U
	U	Th	
<b>Терригенные (песчано-глинистые)</b>			
Конгломераты, гравелиты	2,4	9,0	3,7
Песчаники, алевролиты	2,9	10,4	3,6
Аргиллиты, глинистые сланцы, глины	4,0	11,5	2,4
Кварцевые конгломераты	6,3	31	5-10
Углеродисто-глинистые сланцы	>10-20	15	<1
<b>Кремнистые</b>			
Кремнистые сланцы, кварциты	1,7	2,2	1,2
Глинисто-кремнистые сланцы	2,8	6,2	2,2
<b>Карбонатные</b>			
Известняки	1,6	1,8	1,1
Мергели	2,8	2,5	0,9
Доломиты	3,7	2,8	0,8
<b>Соленосные</b>			
Ангидриты	1,0	1,0	1,0
Каменная соль	0,9	1,0	1,1
<b>Каустобиолиты</b>			
Каменный уголь	3,4	4,8	1,4

Формирование первично обогащенных ураном осадочных отложений (углеродисто-кремнистые сланцы, битуминозные известняки, каустобиолиты и др.) тесно связано с накоплением и распределением в зоне литогенеза органического вещества Сорг.

Среди пород с нормальным содержанием органического вещества Сорг (<0,3, 0,5%) по радиоактивным свойствам выделяются пять групп: терригенные, кремнистые, карбонатные, соленосные отложения и каустобиолиты.



# Терригенные (обломочные, глинистые) осадочные породы

В терригенных осадках, формирующихся в разных геотектонических обстановках, обнаруживается зависимость содержания урана (и в меньшей степени тория) от гранулометрического состава пород, выражающаяся в постепенном увеличении содержания урана в ряду: **конгломераты - песчаники - алевролиты - аргиллиты**. Эта тенденция выражена при разных уровнях накопления радиоактивных элементов в осадках.

**Средние содержания и распределение урана и тория в породах нижнего и верхнего силура Ануйско-Чуйского синклинория(по А.С. Митропольскому, 1979)**

<b>Порода</b>	<b>Содержание элементов, г/т</b>		<b>Th/U</b>
	<b>уран</b>	<b>торий</b>	
<b>Песчаники</b>	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>2,0</b>
<b>Алевролиты</b>	<b>0,8</b>	<b>6,2</b>	<b>7,7</b>
<b>Сланцы глинистые</b>	<b>1,2</b>	<b>13,0</b>	<b>10,8</b>
<b>Сланцы глинисто-известковистые</b>	<b>1,8</b>	<b>3,1</b>	<b>1,7</b>
<b>Известняки</b>	<b>0,5</b>	<b>0,8</b>	<b>1,6</b>

Прямая связь содержаний урана и тория с количеством глинистых частиц обусловлена, вероятно, их ролью переносчиков тория и сорбентов урана. Соотношение и содержание урана и тория в аргиллитах зависят от их минерального состава. В частности, установлено, что максимальное содержание тория свойственно гидрослюдистым, а урана – каолинитовым аргиллитам. По-видимому, большая часть тория переносится в бассейн седиментации адсорбированной на частицах глины или гидроокислах железа

<b>Толща, пачка</b>	<b>порода</b>	<b>U, г/т</b>	<b>Th, г/т</b>	<b>Th/U</b>
Красноцветная	Конгломераты и гравелиты	<b>2,1</b>	<b>11,7</b>	<b>5,6</b>
	Песчаники	<b>2,1</b>	<b>11,3</b>	<b>5,4</b>
	алевролиты	<b>3,1</b>	<b>12,8</b>	<b>4,1</b>
Зеленоцветная	Конгломераты и гравелиты	<b>3,2</b>	<b>7,3</b>	<b>2,3</b>
	Песчаники	<b>3,2</b>	<b>13,0</b>	<b>4,1</b>
	алевролиты	<b>4,9</b>	<b>17,6</b>	<b>3,6</b>



- Среди осадочных терригенных отложений, первично обогащенных радиоактивными элементами, выделяется два резко различных радиогеохимических типа пород:
  1. Существенно ториеносные и урано-ториеносные грубообломочные породы (конгломераты, гравелиты, песчаники) аллювиальных, прибрежно-морских и иных фаций.
  2. Существенно ураноносные обогащенные фосфором или органикой породы разнообразного состава (сланцы, песчаники), формирующиеся в разных фациальных обстановках морских или иных бассейнов.

О генезисе радиоактивных кварцевых песчаников и конгломератов докембрия имеются разные точки зрения. Одни авторы объясняют слабо повышенные содержания урана и тория в конгломератах **процессами механического выветривания и накоплением в прибрежно-морских зонах устойчивых тяжелых минералов**, другие – **восстановлением органикой шестивалентных соединений урана до четырехвалентного состояния**. Максимум содержания урана обусловлен, по мнению последних, обогащением органическим веществом осадков преимущественно прибрежной зоны.

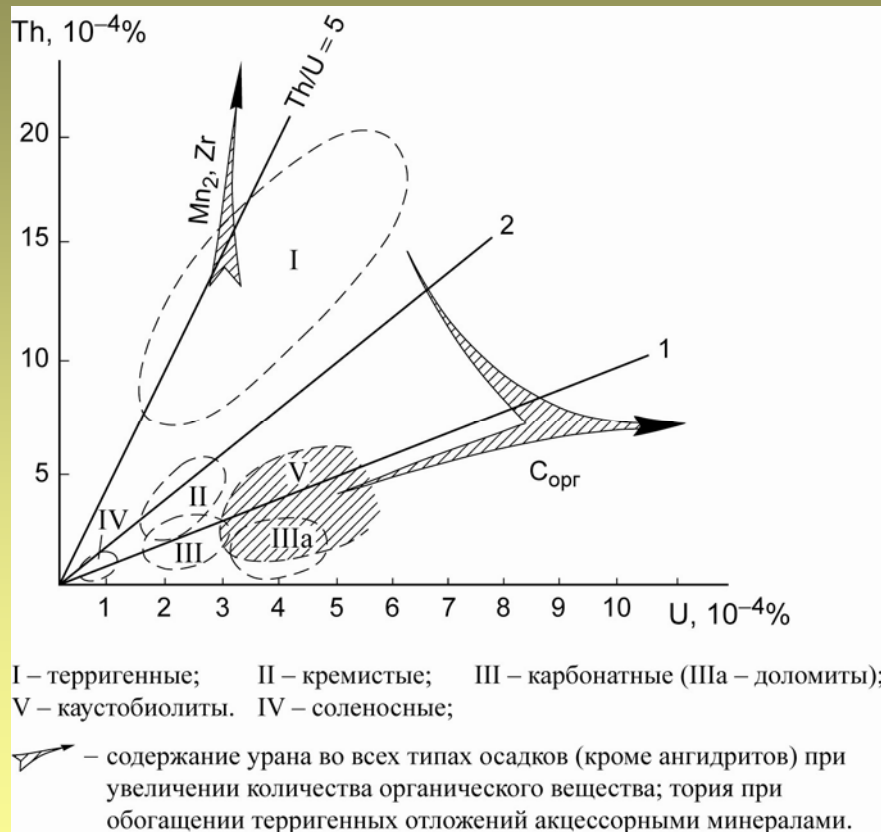
Наиболее вероятным представляется **совместное влияние процессов механического обогащения ураном и торием грубозернистых осадков (за счет акцессориев) и осаждения урана в результате восстановления и сорбции органическим веществом**.

На возможное участие процессов механического обогащения указывают радиогеохимические особенности некоторых современных аллювиальных и прибрежно-морских россыпей. В прибрежно-морских россыпях повышенная радиоактивность связана главным образом с присутствием редких акцессорных минералов, для которых характерно наиболее высокое содержание урана и тория (монацит, пирохлор, циркон). Подобного рода россыпи, обогащенные монацитом, цирконом, ильменитом, рутилом и другими минералами, развиты вдоль морских побережий Северной и Южной Америки, Индии и в других местах. Содержание урана и тория в этих породах (при общем количестве тяжелых минералов 2,5-7%) колеблется от 0,001 до 0,01%.

# Хемотрогенные и биогенные отложения

## Кремнистые и глинисто-кремнистые отложения

(кремнистые сланцы, яшмы, кварциты) содержат значительно меньше урана и тория, чем терригенные осадки и отличаются пониженным торий-урановым отношением.





Среди этой группы пород широко распространены в разных частях земного шара первично-ураноносные углеродисто-кремнистые и углеродисто-глинистые сланцы, получившие название **черные сланцы**. Этот термин признан и широко используется в геологической литературе.

Уран – наиболее изученный элемент в черных сланцах. Средневзвешенное содержание урана в черных сланцах по оценкам Я.Э. Юдовича (1994) составляет  $13 \pm 2$  г/т.

Возрастной диапазон таких пород весьма широк: от архея до палеогена. Строго говоря, черные сланцы следует рассматривать как метаморфические породы низкой стадии метаморфизма. Однако установлено, что **природа их аномальной радиоактивности первично осадочная**. Процессы метаморфизма обусловили лишь некоторое перераспределением металлов и, возможно, изменение формы их нахождения.

Хотя черные сланцы и приобрели известность главным образом благодаря аномальным содержаниям в них урана, золота и некоторым другим элементам-примесям, среди них широко распространены разности с околосларковыми концентрациями этих металлов.

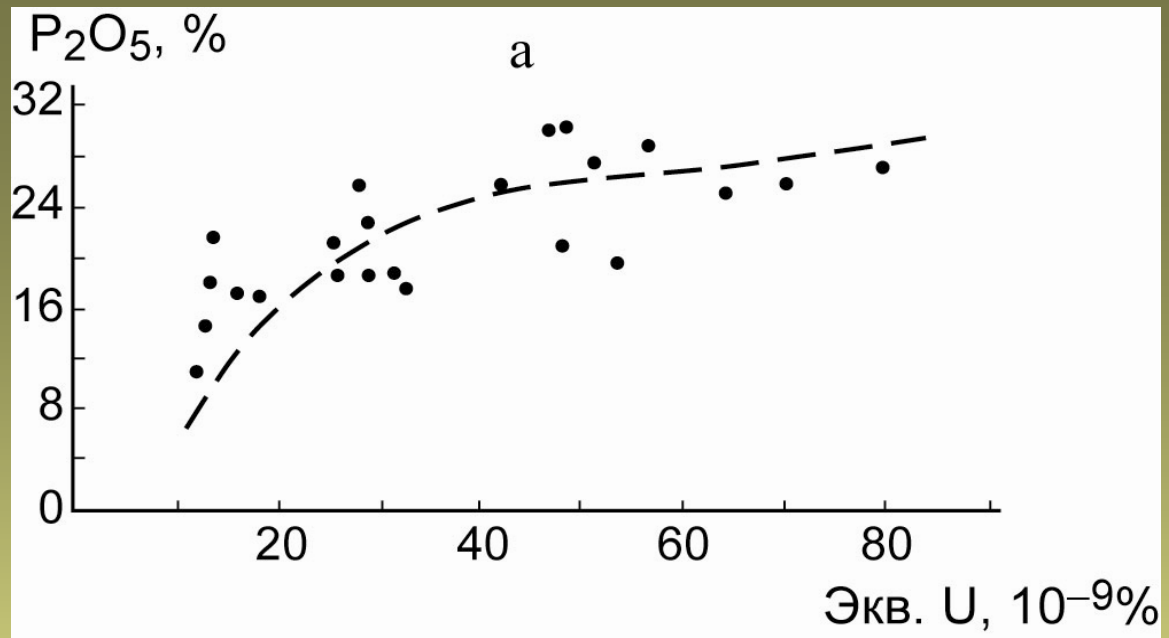
Некоторое представление о вариациях содержаний радиоактивных элементов в черных сланцах дает исследование этих пород новосибирскими учеными в Восточном Саяне (Жмодик и др., 1989).

# Содержания U, Th, Сорг и Th/U в черных сланцах юго-Восточной части Восточного Саяна (Жмодик и др., 1989)

Свита (возраст)	Типы углеродистых сланцев	Количество проб	U	Th	Th/U	C <sub>орг</sub>
<b>Ильчирский синклиорий</b>						
Берунгольская	К-Г	16	2,2	5,6	2,6	0,8
Ильчирская (аллохтон)	Г, К-Г, Г-Кб	100	2,3	7,4	3,2	0,6
Ильчирская (автохтон)	Г, К-Г	52	3,7	7,5	2,0	1,4
Оспинская	К-Г	19	2,4	4,4	1,8	1,4
<b>Гаргано-Бутугольский антиклинорий</b>						
Монгошинская	Г, К-Г	286	3,2	10,2	3,2	1,3
Дабанжалгинская	Г, Г-Кб	85	10,2	11,6	1,1	4,2
Ильчирская	Кб-Г, К-Г	67	2,4	6,4	2,7	0,7
<b>Окинский синклиорий (восточная часть)</b>						
Дабанжалгинская	К	75	30	3,2	0,1	1,4
	Г-К	113	24,2	8,6	0,4	3,6
	К, Г-К	213	18,6	9,0	0,5	2,2
	Кр	60	10,1	4,5	0,5	
<b>Окинский синклиорий (западная часть)</b>						
Дабанжалгинская	Г-К	27	26	3,8	0,1	2,7
	К	31	2,9	0,4	0,1	0,4
Окинская (ильчирская)	Г-К	19	2,4	5,0	2,1	3,6
<b>Боксон-Сархойский синклиорий</b>						
Дибинская	Г, К-Г	57	2,4	5,4	2,3	1,4
Монгошинская	К-Г	7	1,5	2,7	1,8	

# Фосфориты

На платформах и в складчатых областях широко распространены существенно ураноносные фосфатные и углеродистые образования. Повышенные содержания урана в пластовых фосфоритах установлены как среди платформенных отложений в осадках эпиконтинентальных бассейнов (фосфориты Флориды, Марокко), так и среди отложений складчатых областей. Среди фосфоритоносных формаций наиболее обогащены фосфором, органическим веществом, ураном и многими другими редкими и рассеянными элементами фосфориты и фосфорсодержащие темные аргиллиты формации Фосфория в Северной Америке.



Содержание урана в фосфоритах и фосфорсодержащих породах колеблется в широких пределах (от 0,002 до 0,03%, иногда выше). Обычно **содержание урана возрастает с увеличением количества фосфора.**

Вероятно, в таких породах лишь часть урана тесно ассоциирует с фосфатом, остальной же приурочен к органическому веществу.

Содержание тория в фосфоритах, как правило, не превышает  $(5-10) \times 10^{-4}\%$ . Низкое содержание тория является характерной особенностью осадочных фосфоритов и резко отличает их от апатитсодержащих гидротермальных тел, которым иногда необоснованно приписывается осадочный генезис.



# Карбонатные породы.

Низкие содержания урана и, в особенности, тория характерны также для известняков и мергелей. Среднее содержание урана в карбонатных породах верхней континентальной земной коры составляет 2,1 г/т, тория – 2,4 г/т (Григорьев, 2003). По другим данным (Адамс, 1959) карбонатные породы содержат в среднем  $2,2 \pm 0,1$  урана и  $1,7 \pm 0,7$  тория.

В различных районах содержание урана и тория близко к этим цифрам.

Исключение составляют лишь битуминозные известняки платформенных (Сибирская платформа), складчатых (Забайкалье) и др. областей, где уран, до  $(5-10) \times 10^{-4}\%$  иногда выше, ассоциирует с битумами. В этих породах между ураном и органическим веществом устанавливается прямая корреляционная связь.

# Бокситы.

Бокситы характеризуются высокими содержаниями урана и тория. Согласно оценкам Адамса и Ричардсона, в бокситах содержится 8 г/т урана и 42 г/т тория. По более поздним оценкам В.А. Тенякова бокситы содержат в среднем 8,4 г/т U и 44 г/т Th.

Установлено, что накоплению урана в бокситах зависит от характера исходных пород и форм нахождения в них урана.

Тория в бокситах в 2-4 раза больше, чем урана. Содержания тория в бокситах зависит от содержания  $Al_2O_3$ , урана и радия – от FeO. По данным М.Н. Альтгаузена (1975) на одном из бокситовых месторождений, отличающихся повышенным содержанием уран, установлен настуран в виде корочек на поверхности бокситовых бобовин.

# Эвапориты.

Наименьшей радиоактивностью среди осадочных отложений выделяются ангидриты и каменная соль, в которых содержание урана и тория практически не превышает  $1 \times 10^{-4}\%$ . Незначительное повышение их содержания в соленосных отложениях (соляные глины, галопелиты) связано с присутствием глинистого материала.

По оценкам Н.А. Григорьева (2003) среднее содержание уран в эвапоритах составляет 0,68 г/т, тория – 0,7 г/т. Торий-урановое отношение близко к 1.

Согласно старым данным Мура (Moore, 1959), галиты содержат  $0,013 \pm 0,005$  урана и  $< 0,2$  г/т тория, а ангидритовые породы  $0,37 \pm 0,10$  г/т U и  $< 0,2$  г/т Th. А.А.

Смыслов оценивал содержание урана в каменной соли значением 0,9 г/т, тория – 1,0 г/т при торий-урановом отношении 1,1, а в ангидритах 1,3 г/т U, 0,7 г/т Th и  $Th/U = 0,5$ .

Теоретически можно рассчитать, какое содержание урана и тория будет в эвапоритах, если бы радиоактивные элементы отложились исключительно за счет испарения морской воды. Среднее содержание урана в морской воде при солености 35‰ составляет 3,3 мкг/л, тория – 0,0004 мкг/л. Простые расчеты говорят, что из морской воды можно получить минеральный осадок с содержанием 0,1 г/т U и 11 мкг/т Th и торий-урановым отношением много меньше 1. Из этих расчетов можно сделать один важный вывод, который свидетельствует о том, что в эвапоритах основная часть урана и тория накапливается за счет поступления терригенного материала. Это может быть взвешенный в толще воды материал и минеральные частицы, приносимые ветром.

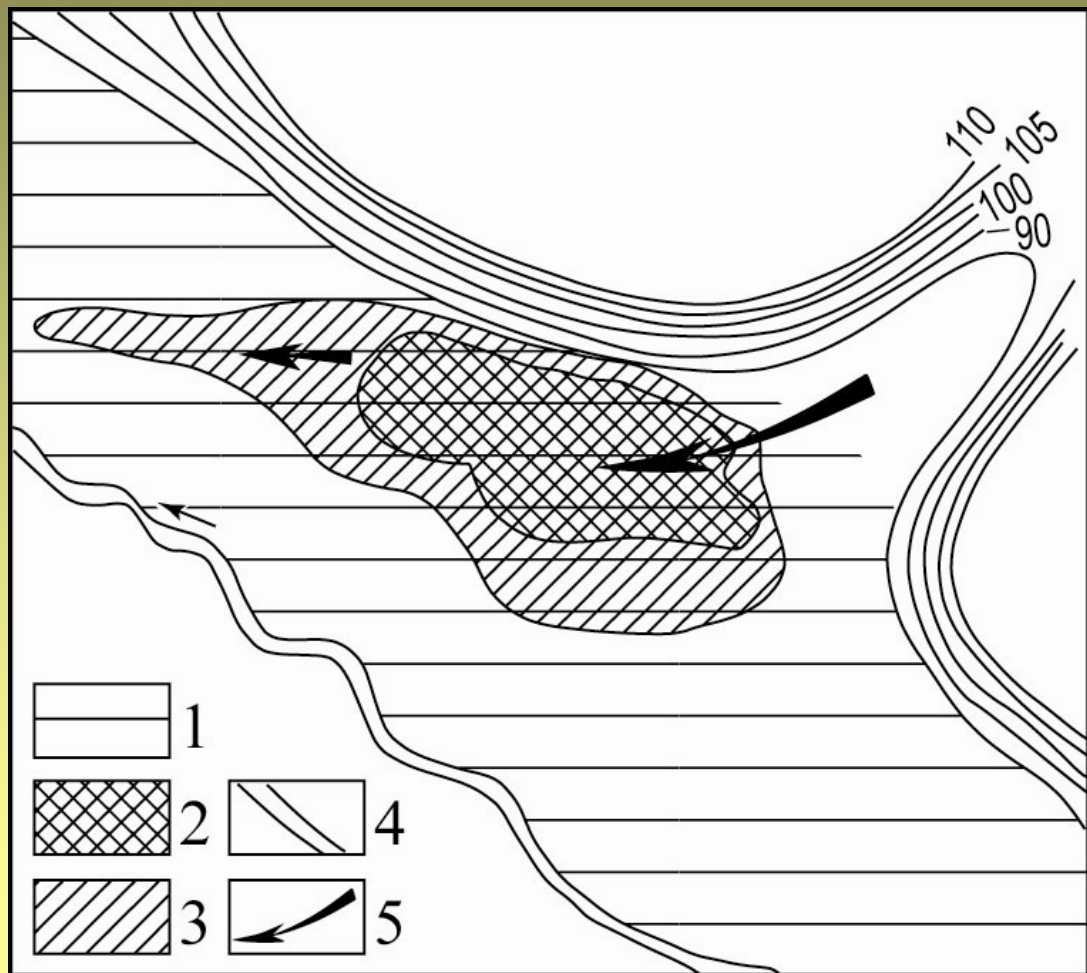
# Каустобиолиты

Среднее содержание урана и тория в торфах и золах торфов юго-восточной части Западно-Сибирской плиты, г/т

Элементы	Низинный торф		Верховой торф		Среднее для региона	
	Сухое вещество	Зола торфа*	Сухое вещество	Зола торфа*	Сухое вещество	Зола торфа*
Th	0,87	6,5	0,45	14,0	0,61±0,1	8,5
U	0,46	3,4	0,31	9,7	0,31±0,08	4,2
Th/U	1,9	1,9	1,5	1,5	1,7	1,7
A <sup>d</sup> , %	13,4	100	3,2	100	7,3±0,9	100

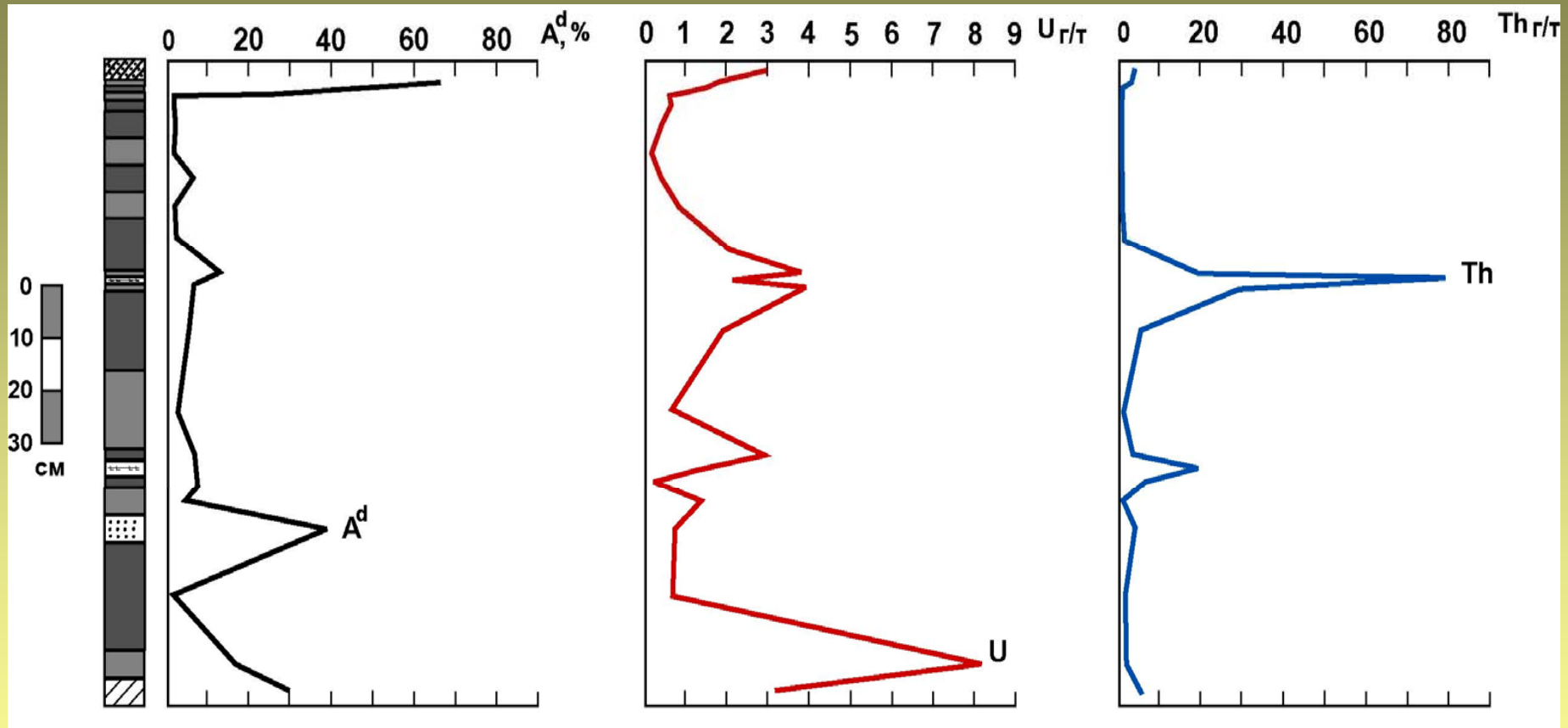
# Схема размещения уранового оруденения в торфяном массиве (по А.В. Коченову).

- 1 – торф;
- 2 – богатое оруденение;
- 3 – ореол рассеяния;
- 4 – изогипсы рельефа;
- 5 – направления основных потоков внутризалежных грунтовых вод.





# Пласт Двухаршинный, Черногорское месторождение, уголь



Условные обозначения:



тонштейн



песчаник



алевролит



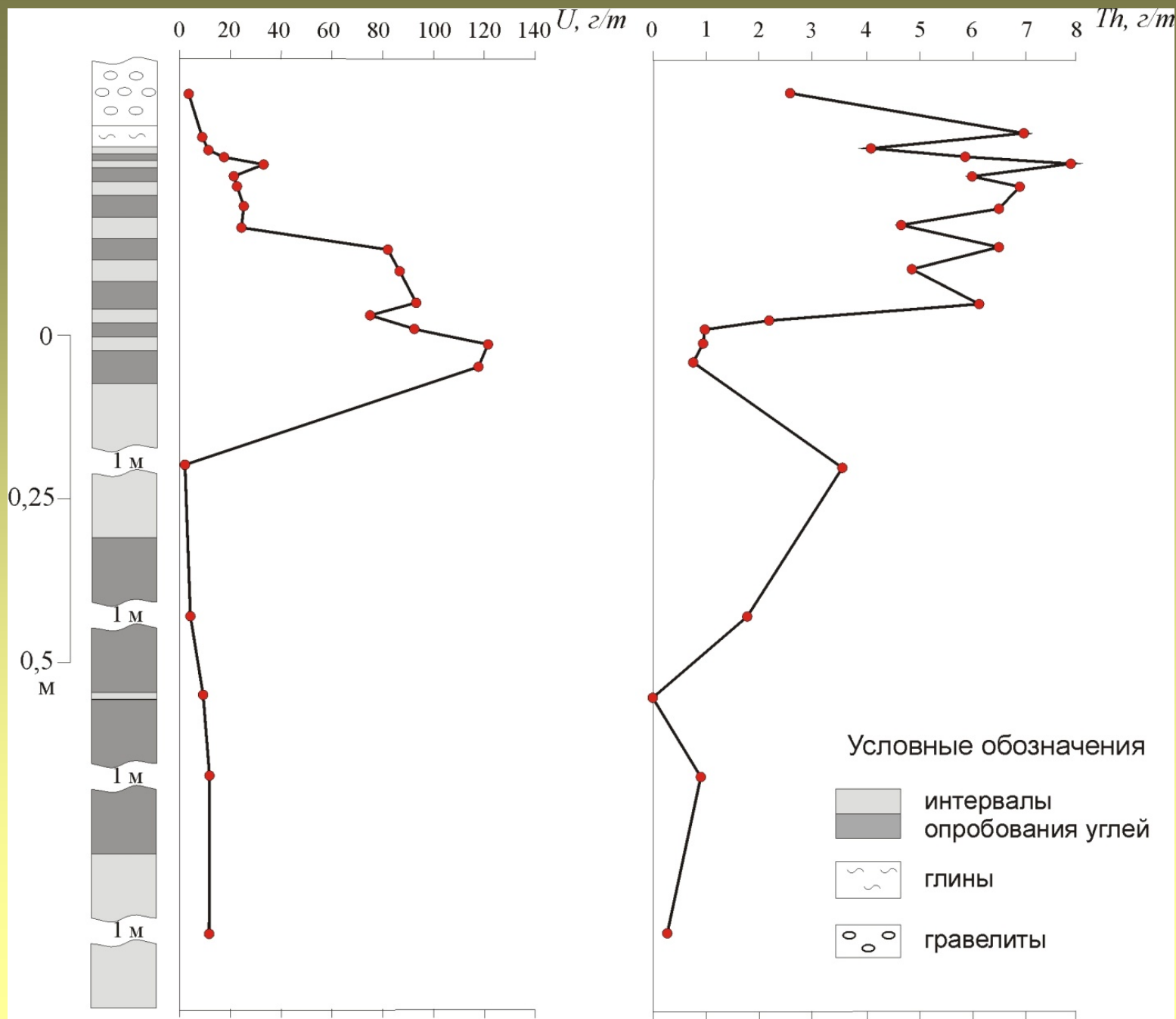
аргиллит

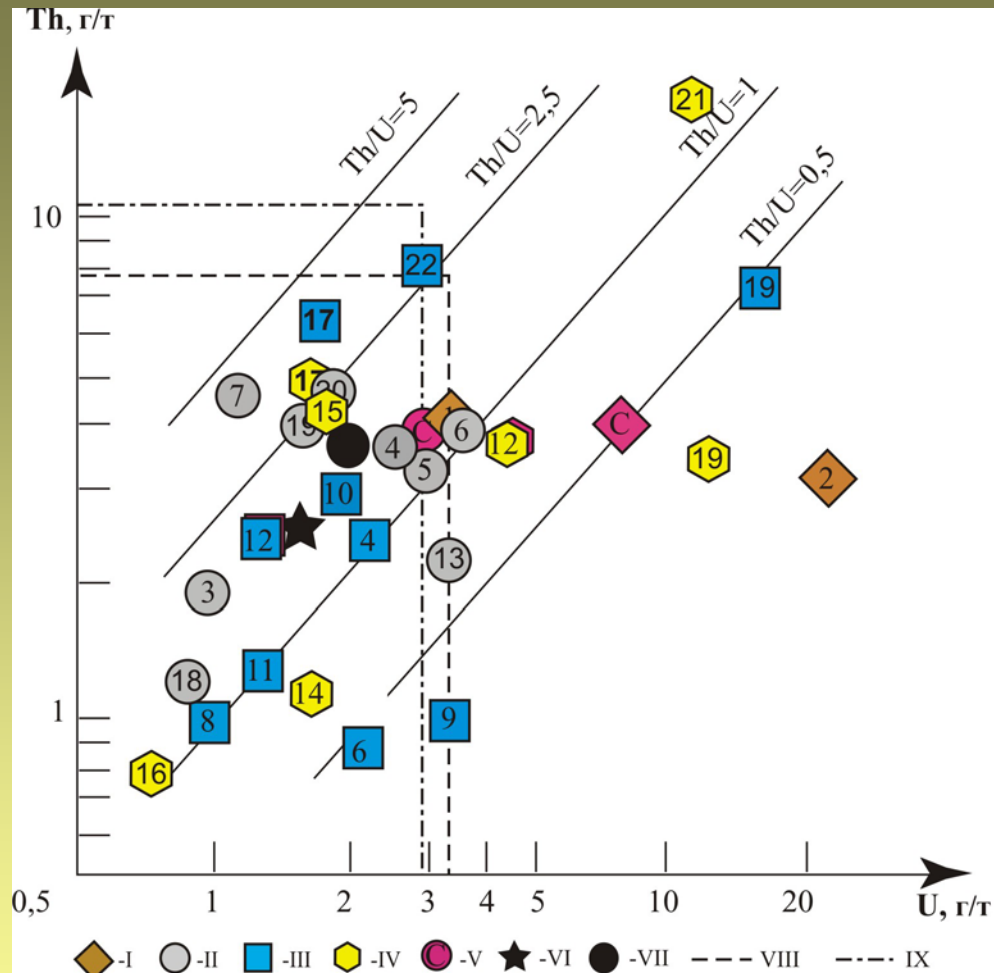


уголь



# Распределение урана и тория в углях пласта Итатский





I-девонская эпоха угленакопления; II-карбон-пермская эпоха угленакопления; III-мезозойская эпоха угленакопления; IV-кайнозойская эпоха торфо-угленакопления; V-среднее для эпохи; VI-среднее для Сибири; VII-угольный кларк; VIII-среднее для осадочных пород (по Н.А. Григорьеву, 2003); IX-среднее для континентальной земной коры (Тейлор, Мак-Леннан, 1988).

Угольные бассейны и месторождения: 1-Барзасское, 2-Убруское, 3-Горловский, 4-Кузнецкий, 5-Минусинский, 6-Тунгусский, 7-Курайское, 8-Пыжинское, 9-Канско-Ачинский, 10-Иркутский, 11-Улугхемский, 12-Западно-Сибирский, 13-Таймырский, 14 - Талду-Дюргунское, 15-Возновское, 16 - торф современный, 17-Дальний Восток, 18-Казахстан, 19-Монголия, 20-Нурс-Хотгор, 21-Павловское, 22-Ургальское.

# Нефть

Нефть крайне бедна ураном и торием. По средней оценке М.Я. Шпирта (2007) в ее золе содержится 20 г/т урана и 1,1 г/т тория. С учетом зольности нефти, не превышающей 0,1%, эти содержания в пересчете на сырую нефть составят 0,02 г/т U и 0,0011 г/т Th. Очевидно, что ее радиоактивность имеет исключительно урановую природу.



# Содержание урана и тория в современных осадках

## Радиоактивные элементы в отложениях морей и океанов

В морские осадки радиоактивные элементы поступают различными путями. Главными их источниками является речной сток и морская абразия. Определенный вклад вносит аэрогенное пыле-аэрозольное поступление материала, извержения вулканов и излияния гидротермальных растворов в рифтовых зонах. Еще меньше доля космогенного вещества.

Основная доля радионуклидов, поступающих как в растворенном виде, так и в составе обломочного вещества, отлагается в пределах шельфа

Тип осадков	U, г/т	Скорость накопления осадка, $10^{-3}$ г/(см <sup>2</sup> ×год)
Шельфовые	3,0±1,0	20
Гемипелагические синие глины	2,5±1,0	1,6
Пелагические:		
глобигериновые илы	1,0±0,5	—
красные глины	1,8±0,5	0,6
радиоляриевые илы	1,0±1,0	0,8

В морских и океанических осадках уран распределяется неравномерно. Пределы его концентраций в поверхностном слое составляют 0,1-60 г/т. В морях относительно повышенные концентрации урана тяготеют к впадинам, в океанах – к шельфовой зоне и континентальному склону

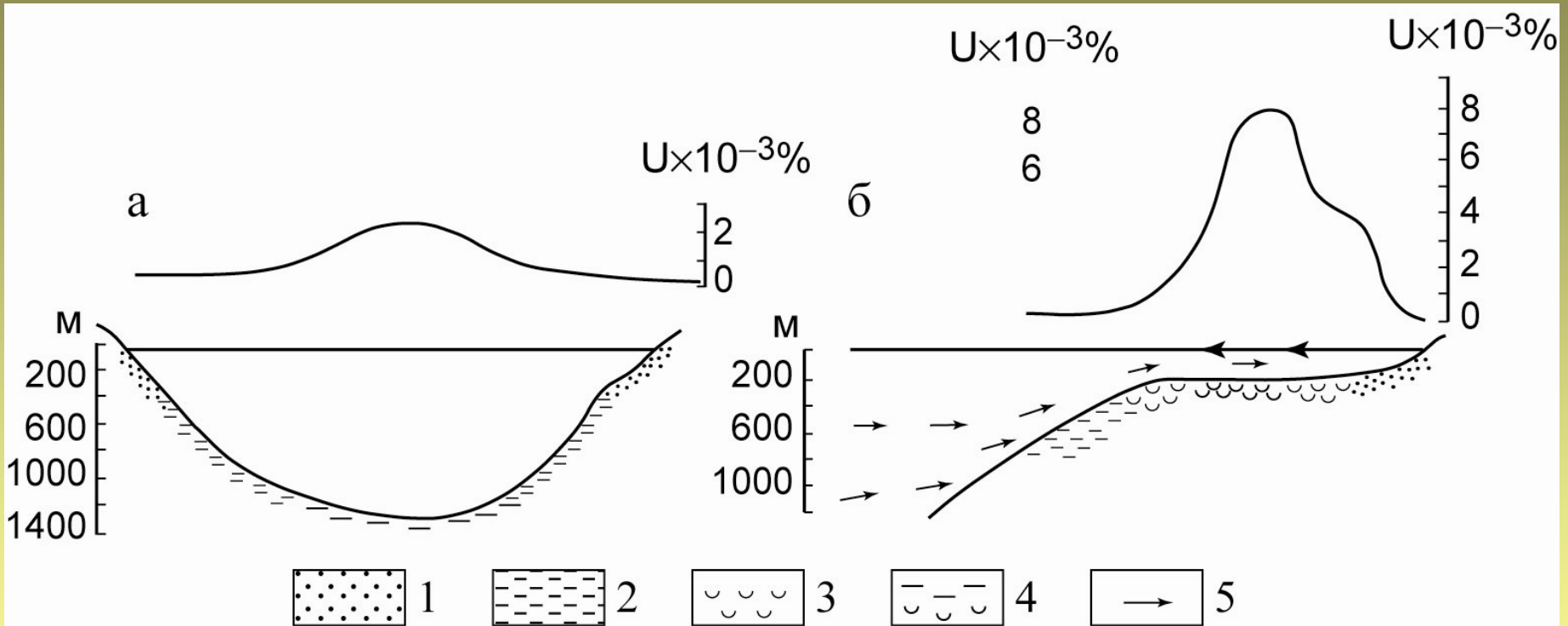


Схема распределения урана в современных морских осадках: а – внутренний бассейн; б – открытый шельф, зона восходящих вод. (по В.А. Коченову и С.Д. Расуловой, 1978).

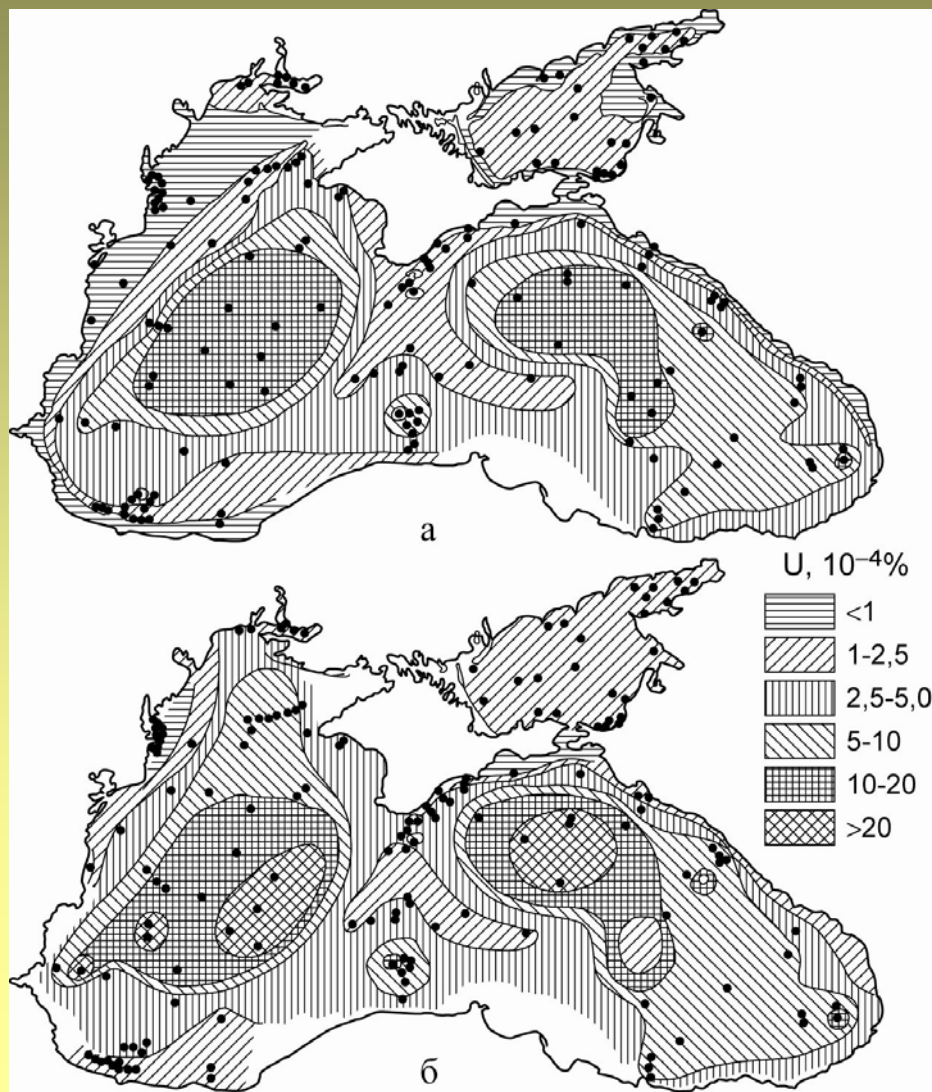
1 – прибрежные осадки; 2 – глинистые илы; 3 – органогенные илы; 4 – осадки, обогащенные органическим веществом; 5 – направление течений.

Наряду с породами, имеющими нормальное содержание радиоактивных элементов, установлены донные отложения с повышенной радиоактивностью.

Концентрирование урана и тория в прибрежных осадках происходит механическим путем с образованием прибрежно-морских россыпей (монацитовых, циркон-ильменитовых и др). Других фактов существенного концентрирования тория в морских осадках не установлено.

Уран, поступающий в океан в растворенном состоянии частично фиксируется в шельфовой зоне, сорбируясь органическим веществом, гидроксидами железа и марганца, фосфатами и др. Другая часть урана поступает в океан, компенсируя потери, связанные с выведением его в осадки и поддерживая постоянство концентрации урана в океанической воде.

Высокое содержание урана, до 10-20 г/т, зафиксировано, в частности в верхних горизонтах осадков из зараженных сероводородом зон Черного и Балтийского морей



Распределение урана в осадках Черного и Азовского морей (а) (б – то же в пересчете на бескарбонатное вещество) (по Г.Н. Батурину, 1975).

В вертикальном профиле современных океанических осадков распределение радиоактивных элементов (U и Th) достаточно выдержано

Th в донных осадках океанов распределен относительно равномерно. Во всяком случае, исследование Индийского океана показало, что заметного уменьшения его содержания в донных осадках по мере удаления от континентов не установлено. Предполагают, что в данном случае  $^{232}\text{Th}$  приурочен к наиболее тонкодисперсной части терригенного материала и поэтому разносится относительно равномерно по всей акватории.



# **Радиоактивные элементы в донных отложениях континентальных водоемов и водотоков**

Избирательное накопление урана донными осадками происходит лишь в застойном гидродинамическом режиме в присутствии органического вещества, главным образом в озерах и низинных торфяниках, где происходит восстановление U, сорбированного осадком из воды.

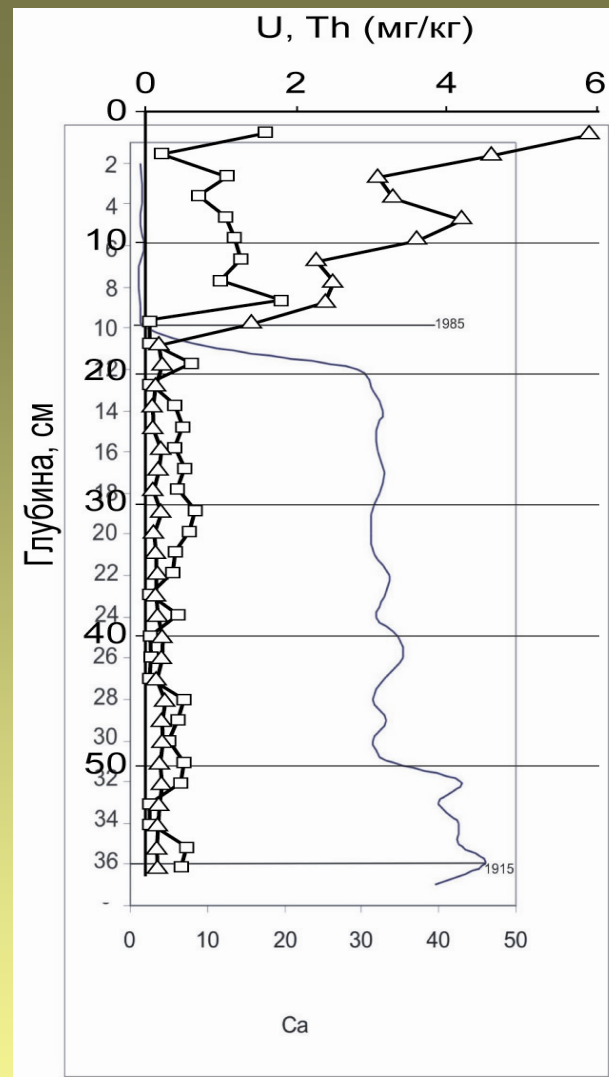
Следует также отметить, что разные типы донных отложений в разной степени концентрируют радиоактивные элементы. Карбонатные сапропелевые илы бедны как ураном, так и торием. Согласно данным В.Д. Страховенко и др (2007), наиболее обогащены ураном органические илы, наименее – карбонатные отложения. Терригенные илы занимают промежуточное положение. Торием более обогащены терригенные илы. К органическим и карбонатным отложениям содержание тория падает.

Из этих данных следует, что минерализация вод не оказывает существенного влияния на накопление урана и тория в донных отложениях.

Элементы	U(Ra), г/т	Th, г/т	Th/U	K, %
Минеральный состав донных отложений				
Терригенные	2,7	5,8	2,1	1,6
Карбонатные	2,1	3,4	1,6	1,0
Органические	4,5	4,0	0,9	0,5
Минерализация воды				
Пресные	2,2	4,7	2,1	1,1
Соленые	2,2	4,9	2,2	1,2

Изменение условий накопления осадка приводит к изменению содержания U и Th. Это хорошо видно на примере оз. Черного, разрез которого изучен в окрестностях г. Томска (Иванов, 2008). Здесь произошла смена карбонатных сапропелевых отложений илистыми терригенными, что привело к росту содержания U и Th.

Торфяные донные отложения способны накапливать уран, но, как правило, бедны торием.



Распределение урана, тория и кальция в вертикальном профиле оз. Черное (по Иванову и др., 2008).

# Радиоактивные элементы в почвах

Концентрация урана и тория в почвах **зависит от их содержания в подстилающих породах**. Это явление хорошо известно. На нем основаны геохимические методы поисков по ореолам рассеяния месторождений. Унаследование почвами радиоактивности почвообразующих пород прослеживаются в самых разных природно-климатических зонах с различными типами выветривания и почвообразования.

Кларк урана в почвах по А.П. Виноградову – 1 г/т. По более поздним данным он оценивается величиной 2,0 г/т (Иванов, 1997).

Наиболее полно изучены верхние горизонты почв США. Для них не установлено существенных различий содержаний урана в разных типах почв. Пределы колебаний от 0,3 до 10,7 г/т. Отмечались и очень высокие концентрации урана – до 100 г/т, как предполагают, техногенного происхождения.

Имеются также сведения о среднем содержании урана в почвах Великобритании (2,6 г/т), Канады (1,2 г/т), Польши (0,79 г/т), Индии (11,0 г/т). Среднее содержание урана в почвах СССР – 1,5 г/т

По данным В.В. Ковальского (1968) содержание урана в почвах урановых провинций выше, чем на неураноносных территориях. Например, в Иссык-Кульской грабен-депрессии оно составило  $5,8 \div 10,7$  г/т, тогда как в Курской синеклизе – только  $0,5 \div 0,8$  г/т.

Кларк тория в почвах по А.П. Виноградову – 9 г/т. В то же время **средняя оценка для стран мира составляет  $7,8 \pm 2,8$  г/т** (Иванов, 1997). Среднее содержание тория в почвах бывшего СССР 6,5 г/т, торий урановое отношение – 4,4. Для разных регионов содержание тория в почвах изменяется слабо и составляет по Л.И. Болтневой (1980):

- Европейская часть – подзолы региона Верхней Волги – 9,5 г/т;
- Западно-Сибирская низменность – 6,5 г/т (Th/U = 4,4);
- Восточная Сибирь и Дальний Восток – 6,4 г/т (Th/U = 4,6);
- Средняя Азия и Центральный Казахстан – 6,7 г/т (2,9)

при изменении торий-уранового отношения за счет накопления урана в аридных областях.

По данным на Титаевой основное количество тория в почвах находится в виде минеральной фракции при возможном обогащении иллювиального горизонта за счет привноса илистой, обогащенной Th фракции.

# Радиоактивные элементы в живом веществе

Для наземной растительности Х. Боуэн приводит интервал оценок содержания урана от 0,005 до 0,069 г/т сухого вещества, в среднем 0,038 г/т. По данным С. Госвани и др. (1977) в ксерофитовой и мезофитовой растительности количество урана колеблется от 0,5 до 4,4 г/т золы. По А.Л. Ковалевскому для древесной растительности Сибири фоновое содержание урана составляет (г/т золы): береза бородавчатая – 1, сосна обыкновенная – 1, осина дрожащая – 0,3, лиственницы даурская и сибирская – 10. Наибольшее содержание U отмечено в золе коры деревьев – 200 г/т. В золе деревьев, произрастающих в районе с урановой минерализацией, установили содержание 2,2 г/т.

## Гидробионты

Способность водных организмов накапливать уран и торий значительно выше, чем у наземных хотя изучена она пока недостаточно. Наиболее полно этот вопрос освещен в работе С.Г. Неручева «Уран и жизнь в истории Земли» (1982). Микроорганизмы, водные растения и животные характеризуются разной способностью к накоплению радиоактивных элементов.

Микроорганизмы могут активно накапливать уран и другие радиоактивные элементы. В почвах основными концентраторами урана и других радиоактивных элементов являются грибы и дрожжи, а также лишайники. Актиномицеты и бактерии накапливают уран в меньших количествах при коэффициентах накопления от 2 до 60 и более.



**Планктон.** В планктоне океана концентрация урана колеблется в разных пробах от  $(0,01-0,08) \times 10^{-4}$  до  $(1,8-4,8) \times 10^{-4}\%$ . Содержание тория обычно  $(0,1-0,2) \times 10^{-4}\%$  сухого вещества. Среднее для тотального планктона 0,1 г/т, Th/U = 0,16, для взвеси – 0,3 (Th/U = 2,8) Учитывая крайне низкое содержание тория в морской воде, торий-урановое отношение указывает на более активное накопление тория планктоном, чем урана.

При средней концентрации в воде  $3 \times 10^{-7}\%$  коэффициенты накопления урана планктоном по приведенным данным изменяются от 3-26 до 600-1600, большей частью – около 200-500. Коэффициенты накопления зависят от преобладающего вида планктонных организмов. В пробе преимущественно диатомового планктона определена концентрация урана  $1 \times 10^{-4}\%$ , что отвечает коэффициенту биологического накопления около 300. В пробах гипонейстона, состоящего преимущественно из калянусов и изопод, концентрация урана колеблется в пределах  $(0,83-6,03) \times 10^{-6}\%$  (на сырую массу), а на сухую массу составляет, видимо, не менее  $(0,4-3,5) \times 10^{-5}\%$ . Коэффициенты накопления при этом (на сухую массу) должны быть, вероятно, не ниже 13-100.

**Донные водоросли.** По данным Г.Н. Батурина, концентрация урана в тропических бентосных водорослях составляет от  $0,07 \times 10^{-4}$  до  $1,64 \times 10^{-4}\%$ , в среднем  $0,65 \times 10^{-4}\%$ . Максимальна она в зеленых водорослях – от  $0,13 \times 10^{-4}$  до  $1,64 \times 10^{-4}\%$ , в красных не превышает  $(0,61-1,27) \times 10^{-4}\%$ , а в бурых –  $(0,07-0,86) \times 10^{-4}\%$ .

Коэффициенты биологического накопления урана изменяются в соответствии с этими данными для донных водорослей в целом от 35 до 530, для зеленых от 43 до 530, для красных от 200 до 420 и для бурых от 35 до 280. Как видим, эти значения от свойственных планктону отличаются незначительно и большей частью составляют около 150-300.

Имеются некоторые данные о накоплении урана донными водорослями в водоемах с повышенной концентрацией урана. В озере Иссык-Куль концентрация урана в харовых водорослях составляет от  $0,3 \times 10^{-3}$  до  $4,3 \times 10^{-3}\%$ , в среднем  $2,35 \times 10^{-3}\%$ . Коэффициент накопления колеблется от 100 до 1430, составляя в среднем 780. Низшие водоросли *Cladofora glomerata* и *Entheromorpha salina* содержат от  $0,07 \times 10^{-3}$  до  $1,5 \times 10^{-3}\%$  урана, т. е. коэффициент накопления для них составляет от 23 до 500, в среднем около 150. В целом для донных водорослей Иссык-Куля концентрация урана составляет в среднем  $1,55 \times 10^{-3}\%$ , в их органическом веществе –  $2,31 \times 10^{-3}\%$ .

**Моллюски** накапливают уран как в мягких тканях, так и в раковинах. Поскольку органического вещества в них на стадии диагенеза почти не остается, то наибольший интерес представляет накопление урана в раковинах, которое зависит от концентрации в них органического вещества. К.Ф. Оглоблин отмечает, что в раковинах современных моллюсков наблюдается линейная зависимость между концентрацией урана и  $C_{\text{ОРГ}}$ : при росте концентрации  $C_{\text{ОРГ}}$  от 0,2 до 0,4% содержание урана в раковинах возрастает от  $3,5 \times 10^{-5}$  до  $7 \times 10^{-5}\%$ .

Концентрация урана в раковинах современных моллюсков океана, по данным Г. Н. Батурина, колеблется от  $0,01 \times 10^{-4}$  до  $0,58 \times 10^{-4}\%$ , в среднем составляя  $0,11 \times 10^{-4}\%$ . Коэффициенты биологического накопления урана в соответствии с этими данными колеблются от 3 до 190, в среднем равны 36.

**Кораллы.** Концентрация урана в современных кораллах океана колеблется по данным Г.Н. Батурина от  $1,28 \cdot 10^{-4}$  до  $4,8 \cdot 10^{-4}\%$ , что соответствует коэффициентам биологического накопления от 420 до 1600. Из всех изученных организмов они характеризуются наиболее активным накоплением урана, вследствие чего концентрация урана в них достигает кларка, характерного для осадочных пород. Как и для других организмов, способность к накоплению урана у кораллов зависит от их видовой принадлежности. В кораллах, сохраняющих арагонитовую структуру и остающихся в море, концентрация урана практически не изменяется. В древних кораллах, подвергшихся перекристаллизации, концентрация урана уменьшается и не превышает  $(1,2) \cdot 10^{-4}\%$ .