

# Химическая технология ядерного топлива

Тема 5. Уран в природе.  
Общая технологическая схема  
переработки природного урана

**Амелина Галина Николаевна**  
доцент ОЯТЦ ИЯТШ  
334-10 к.

Широко распространен в природе.

Обнаружен в

- горных породах,
- водах океанов, морей,
- лунном грунте,
- метеоритах.

***Среднее содержание урана в земной коре  $(2 - 4) \cdot 10^{-4} \%$ ,***

т.е. в 1 тонне содержится около 3 г урана.

***Содержание урана в мантии Земли примерно  $10^{-6} \%$ ,  
в морской воде – 3 мкг/л.***

Всего в 20-тикилометровом слое земной коры содержится  
около  $1,3 \cdot 10^{14}$  т урана,  
в морской воде  $\approx 10^9$ .

***Более богаты ураном*** кислые изверженные породы с  
высоким содержанием кремнезема  $\text{SiO}_2$ .

В тонне гранита содержится до 25 грамм урана.

Почти повсеместное присутствие урана объясняется высокой миграционной способностью. Это связано с его физико-химическими свойствами:

- 1) **амфотерность урана** – в высшем валентном состоянии (+6) он способен давать соединения как основного, так и кислотного характера;
- 2) **переменная валентность урана** дает ему возможность участвовать в окислительно-восстановительных процессах;
- 3) **большая комплексообразующая способность;**
- 4) **изоморфизм** – возможность образования смешанных или кристаллов внедрения в кристаллическую решетку соединений многих редких металлов.

## ВАЖНЕЙШИЕ УРАНОВЫЕ МИНЕРАЛЫ

≈ 200 урановых и урансодержащих минералов

20 из них – основные компоненты урановых руд.

≈ 100 минералов урана с содержанием U > 1%.

≈ в 1/3 этих минералов уран четырёхвалентен, в остальных – шестивалентен.

15 из этих урановых минералов являются простыми оксидами или гидроксидами,

20 – комплексные титанаты и ниобаты

14 – силикаты

17 – фосфаты

10 – карбонаты

6 – сульфаты

8 – ванадатами

8 – арсенатами

Промышленное значение имеют 15 минералов урана

# Минералы урана, имеющие промышленное значение

Название	Формула	Содержание урана, %
Уранинит	(U,Th)O <sub>2x</sub>	62-85
Настуран	UO <sub>2x</sub>	52-76
Урановые черни	UO <sub>2x</sub>	11-53
Коффинит	U(SiO <sub>4</sub> ) <sub>1-x</sub> (OH) <sub>4x</sub>	60-70
Браннерит	(U,TH)Ti <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	35-50
Отенит	Ca(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·10H <sub>2</sub> O	48-54
Уранофан	Ca[UO <sub>2</sub> (SiO <sub>3</sub> OH)] <sub>2</sub> ·5H <sub>2</sub> O	55-58
Карнотит	K <sub>2</sub> (UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (VO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O	52-66
Торбернит	Cu(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·12H <sub>2</sub> O	48
Тюямунит	Ca(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (VO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·80H <sub>2</sub> O	57-65
Казалит	Pb[UO <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> ]·H <sub>2</sub> O	42-50
Нингионит	CaU(PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	20-30
Цейнерит	Ca(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·12H <sub>2</sub> O	55
Давидит	(Fe,Ce,U)(Ti,Fe,V,Cr) <sub>3</sub> (O,OH) <sub>7</sub>	1-7

- **Первичные минералы (эндогенные, коренные)** – образовались при формировании земной коры (как правило, магматического происхождения).
- **Вторичные минералы (экзогенные)** – образовались на более поздних стадиях под действием природных факторов:
  - *действие ветра,*
  - *суточные и годовые колебания температуры,*
  - *поверхностные и подземные воды, содержащие кислород и другие растворенные вещества,*
  - *процессы, связанные с деятельностью микроорганизмов и почвообразованием.*

Выветривание сопровождается не только механическим разрушением рудного тела и вмещающих пород, но и химическим преобразованием многих минералов.

- Оксленный до шестивалентного состояния уран, может растворяться слабокислыми или карбонатными водами и переноситься поверхностными или подземными водами на значительные расстояния. При этом уран может неоднократно участвовать в процессах осаждения и растворения. При этом образуются **осадочные месторождения**.

## Первичные урановые минералы

*Уранинит* – встречается в пегматитовых породах. В момент образования его состав отвечал формуле  $\text{UO}_2$ . С увеличением возраста минерала в нем накапливаются радиоактивные продукты распада, а также увеличивается содержание  $\text{UO}_3$  вследствие окисления, которому способствует радиоактивный распад. Поэтому состав минерала выражается формулой:



$x >> y$ , причем  $y$  и  $z$  увеличиваются с ростом возраста минерала.



*В кислотах* растворяется с трудом, лучше всего в концентрированной соляной кислоте, азотной кислоте, в серной кислоте – в присутствии окислителя.

*Некоторые физические свойства минерала*: цвет черный, плотность 7,6 – 10 г/см<sup>3</sup>, твердость 5–7,6 по десятибалльной шкале Мооса.

**Настуран (урановая смолка, смоляная обманка) – основной минерал урана в гидротермальных месторождениях.**

Состав минерала отвечает той же формуле:  $x\text{UO}_2 \cdot y\text{UO}_3 \cdot z\text{PbO}$ , но при соотношении  $x:y \approx 1:2$ , поэтому обычно минералу приписывают формулу  $\text{U}_3\text{O}_8$ .

«Обманкой» минерал называют за то, что он меняет цвет от черного до светло-серого, а смолкой – за то, что его зерна похожи на капли застывшей смолы.



*В кислотах* настуран растворяется с трудом: лучше всего в концентрированной соляной кислоте, азотной кислоте, в серной кислоте в присутствии окислителя.

*Некоторые физические свойства* минерала: Цвет минерала – черный, плотность  $4,5 - 7,7 \text{ г/см}^3$ , твердость 4–6,3.

**Давидит** (~52% U) – титанат железа, урана, РЗЭ.

Некоторые физические свойства минерала:

Цвет от серовато-черного до черного, плотность 4,8 г/см<sup>3</sup>, твердость – 6.

**Коффинит** – частично гидролизованный **силикат четырехвалентного урана** –  $\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x} \cdot (\text{OH})_{4x}$ .

Содержание урана 45–67 %. Цвет – черный, бутылочно-зеленый, буровато-зеленый, плотность 5,1 г/см<sup>3</sup>, твердость 5–6.



Давидит



Коффинит

## Вторичные урановые минералы

Имеют малую твердость и химическую прочность, они легко вскрываются, цвет минералов желтый, реже – зеленый.

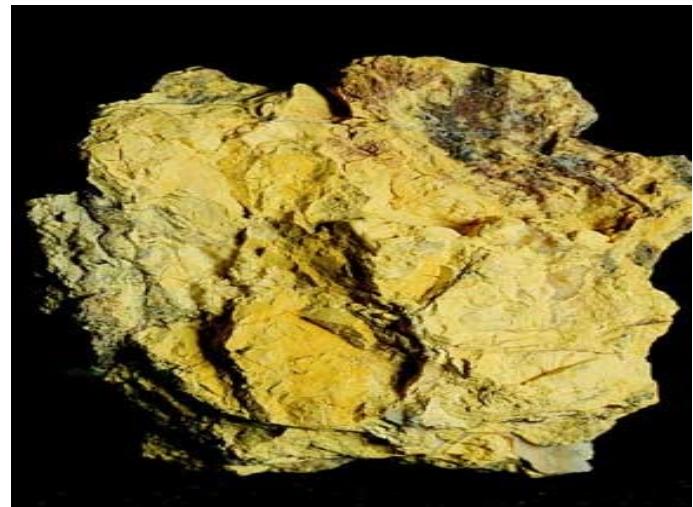
### Ванадиевая группа.

*Карнотит*  $K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot (1-3)H_2O$  – **двойной ванадат калия и уранила**. Минерал ярко-желтого цвета, плотность 4,5 г/см<sup>3</sup>, твердость 2–2,5.

*Тюямунит*  $Ca(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot (4-10)H_2O$  – **двойной ванадат кальция и уранила**. Цвет – ярко-желтый, плотность 3,3-4,4 г/см<sup>3</sup>, твердость 1–2.



Тюямунит



Карнотит

## Фосфатная группа

*Отенит* –  $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot (8-12)\text{H}_2\text{O}$ . Цвет – от серовато-желтого до зеленовато-желтого, плотность 3-3,2 г/см<sup>3</sup>, твердость 2–2,5.

*Торбернит* –  $\text{CuO} \cdot 2\text{UO}_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot (8-12)\text{H}_2\text{O}$

Присутствие меди меняет цвет минерала на зеленый, плотность ~3,2-3,6 г/см<sup>3</sup>, твердость 2–2,5.

*Парсонит* –  $2\text{PbO} \cdot \text{UO}_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Цвет светло-желтый, присутствие свинца увеличивает плотность до 5,4 – 6,2 г/см<sup>3</sup>, твердость 2,3–2,5.



Торбернит



Отенит

## Классификация по величине запасов урановых руд месторождения

- мелкие – запасы месторождений от 0,5 до 5 тыс. т;
- средние – от 5 до 20 тыс. т;
- крупные – от 20 до 100 тыс. т;
- уникальные – более 100 тыс. т.

# Уникальные и крупнейшие по запасам урановые месторождения мира

Название, страна	Промышленный тип	Способ отработки	Начало отработки	Компания-владелец
Олимпик-Дэм (OlympicDam), Австралия	брекчийевый	Подземный, И попутно	1988	BHP Billiton
Россинг (Rossing), Намибия	интрузивный	открытый	1976	Rio Tinto
МакАртур-Ривер (McArthur River), Канада	несогласия	подземный	1999	Самесо
Инкай (Inkai), Казахстан	песчаниковый	СПВ	2007	Самесо: Uranium One
Доминион Dominion, ЮАР	конгломератовый	Открытый и подземный	2007	Uranium One
Рейнджер Ranger, Австралия	несогласия	Открытый	1980	Rio-Tinto
Харасан Harasan, Казахстан	песчаниковый	СПВ	2008	Казатомпром
Мынкудук Mynluduk	песчаниковый	СПВ	2002	Казатомпром
Моинкум (Moinkum), Казахстан	песчаниковый	СПВ	2006	Казатомпром, AREVA

## Оценка мировых ресурсов урана

Страна	Разведанные месторождения урана, тыс. т U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Доля от общих запасов, %
Австралия	889	27
Казахстан	558	17
Канада	511	15
ЮАР	354	11
Намибия	256	8
Бразилия	232	7
Россия	157	5
США	125	4
Узбекистан	125	4
Всего в мире	3 340	100

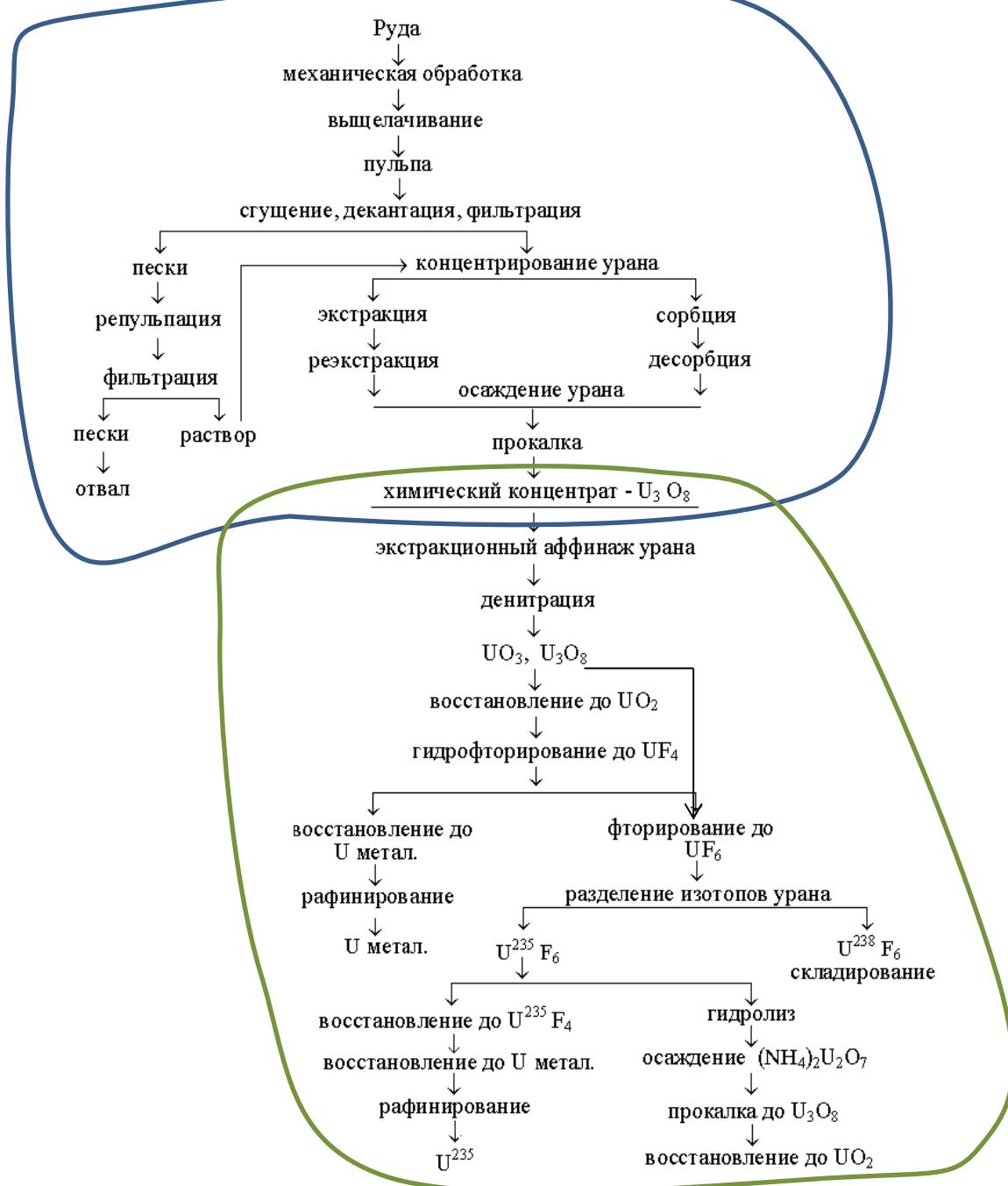
## ТЕХНОЛОГИЯ УРАНА

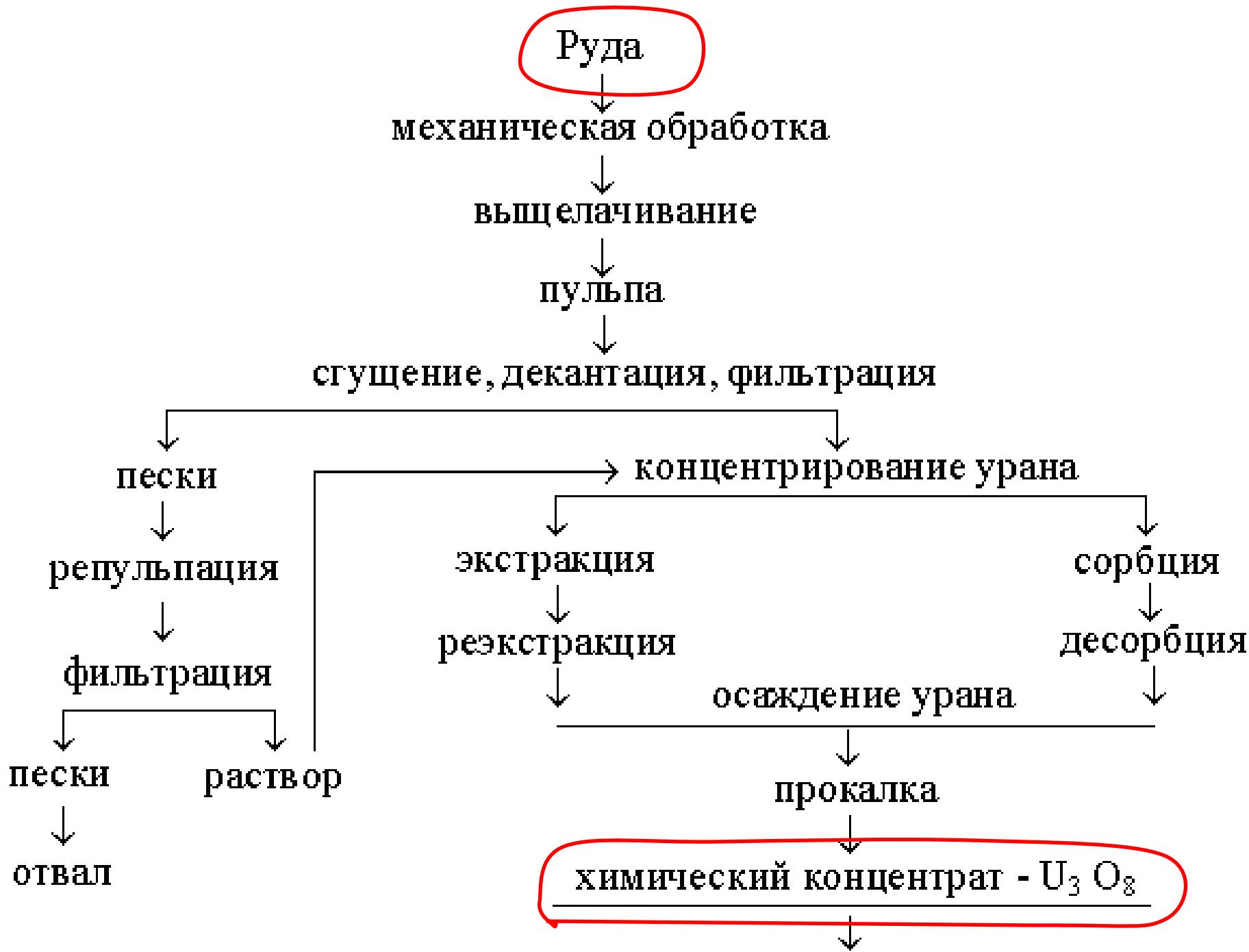
*Основная задача технологии урана* – получение урана в форме, пригодной для использования его в ядерных реакторах:

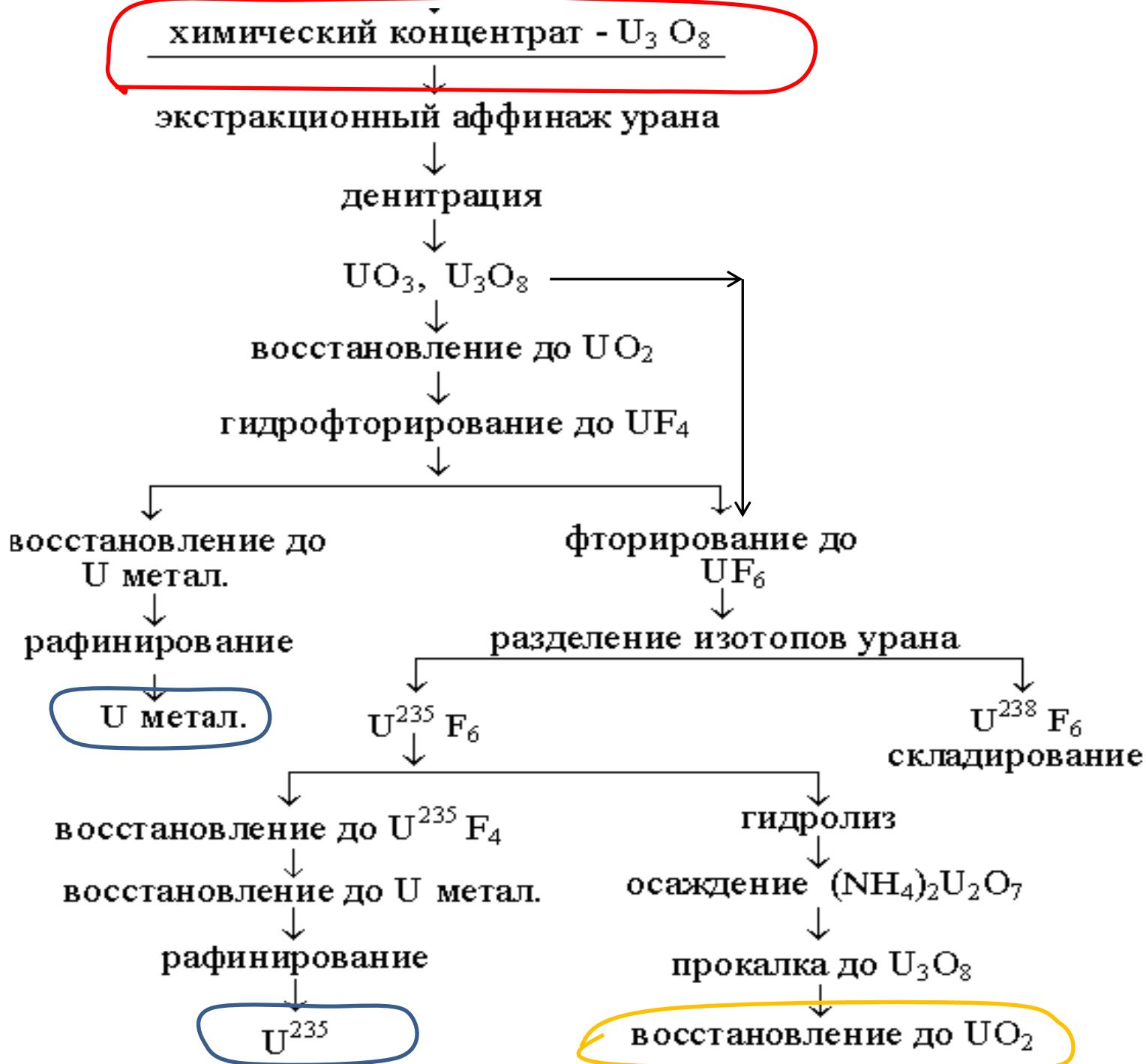
- уран металлический,
- диоксид урана,
- тетрафторид урана.

Выбор технологической схемы определяется **требованием ядерной чистоты урана**, предназначенного для использования в ядерных реакторах: содержание некоторых элементов в ЯТ (**Cd, В, Р.З.Э. и др.**) не д. б.  $> 10^{-6} - 10^{-5}$  % масс.

# Общая схема переработки урансодержащих руд







# Стадии гидрометаллургического передела урана

## 1. Добыча руды

## 2. Подготовка руды к выщелачиванию:

- **механическая обработка рудного материала** (дробление, измельчение) с целью раскрытия ценных минералов;
- **физическое обогащение бедных руд** (гравитационное обогащение, радиометрическая сортировка, флотация, электромагнитная сепарация);
- **вскрытие рудного материала** (окислительный обжиг, сульфатизирующий и хлорирующий обжиг, спекание или сплавление с солями или щелочными реагентами (содой, известью, хлоридами и др.).

# Стадии гидрометаллургического передела урана

## 3. Выщелачивание

Перевод металла из руды (или продукта, полученного при подготовительных операциях) в водный раствор.

## 4. Разделение твердой и жидкой фаз:

- сгущение
- фильтрация
- отмывка тв. фазы от продуктивного раствора.

## 5. Выделение урана из растворов (или пульп):

- химическое осаждение
- ионообменные процессы
- Экстракция

## 6. Получение хим.концентрата (желтый кек / $\text{U}_3\text{O}_8$ )

# **Стадии передела соединений урана**

- 7. Аффинаж (тонкая очистка) соединений урана**
- 8. Получение оксидов урана природного изотопного состава**
- 9. Получение тетрафторида урана**
- 10. Получение гексафторида урана**
- 11. Обогащение урана по U-235**
- 12. Получение диоксида / металлического урана, обогащенного по U-235**

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УРАНОВЫХ РУД

- Химический состав нерудной составляющей (вмещающей породы)
- «Контрастность» руды
- Крупность зёрен урановых минералов и их агрегатов.

## **Химический состав нерудной составляющей**

По химическому составу вмещающей породы урановые руды подразделяются на следующие разновидности:

- **силикатные** – состоят в основном из силикатных минералов
- **карбонатные** – содержат более 15% карбонатов;
- **железо-окисные** – комплексные железо-урановые руды
- **сульфидные** – содержат более 20 % сульфидных минералов
- **fosfatные** – содержат более 8 %  $P_2O_5$  и др.

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УРАНОВЫХ РУД

**Химический состав нерудной составляющей** играет решающее значение при выборе способа их химической переработки:

- из силикатных руд уран выщелачивают кислотами;
- из карбонатных – содовыми растворами;
- сульфидные руды предварительно подвергают обжигу;
- железо-окисные руды подвергают переплавке, а затем уран выщелачивают из шлака и т.д.

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УРАНОВЫХ РУД

**«Контрастность» руды** – степень неравномерности содержания урана в кусковой фракции горной массы.

*По «контрастности» руды подразделяются:*

- а) **«контрастные»** – смесь богатых штуфов, содержащих основную массу урана и породы с низким содержанием урана,  
содержание урана в штуфах превышает в десятки раз среднее содержание урана во всей горнорудной массе;
- б) **«слабоконтрастные»** – руды с более или менее равномерным распределением урана по всей горнорудной массе; могут быть руды с небольшим превышением урана в штуфах (в 3 – 5 раз).

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УРАНОВЫХ РУД

«Контрастность» руд играет важную роль при выборе метода их обогащения:

- «контрастные» руды обогащают исключительно радиометрическим методом;
- «слабоконтрастные» – гравитационным или флотационным методом.

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УРАНОВЫХ РУД

**По размерам зёрен урановых минералов и их агрегатов**

руды подразделяются на:

- крупнозернистые – с размером зерен 25–300 мм;
- среднезернистые (3–25 мм);
- мелкозернистые (0,1–3 мм);
- тонкозернистые (0,015–0,1 мм);
- субмикроскопические (0,001–0,015 мм);
- коллоидно-дисперсные (< 0,001 мм).

**Размеры зёрен и агрегатов определяют степень измельчения руд при их обогащении и гидрометаллургической переработке.**

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УРАНОВЫХ РУД

## Классификация руды по содержанию урана

>1 % – богатые руды;

0,1–1 % – рядовые (обычные) руды;

0,01–0,1 % – бедные руды;

<0,01 % – забалансовые (беднейшие) руды.