

1. УРАН

Уран, (лат. *Uranium*) U, элемент III группы, периодической системы, порядковый номер 92, атомная масса 238,029; самый тяжелый из встречающихся в природе, Сиборгом отнесен (по формальному признаку – характеру заполнения электронных оболочек) к актинидам.

Использовался он еще в начале нашей эры, осколки керамики с желтой глазурью (содержащие более 1% оксида урана) находились среди развалин Помпеи и Геркуланума. Уран был открыт в 1789 году в урановой смолке немецким химиком М.Г.Клапротом, назвавшего его в честь планеты уран, открытой в 1781. (Уран - бог неба, сын и одновременно супруг богини Земли - Геи, отец титанов и циклопов - одноглазых гигантов). Впервые получил металлический уран французский химик Эжен Пелиго в 1841, восстановив безводный тетрахлорид урана металлическим калием. В 1896 году А. Беккерель открыл явление радиоактивности урана случайным засвечиванием фотопластинок ионизирующим излучением от оказавшегося поблизости кусочка соли урана.

<div style="font-size: 2em; font-weight: bold; margin-bottom: 5px;">U</div> <div style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">УРАН</div> <div style="font-size: 0.8em; margin-bottom: 5px;">238,029</div> <div style="font-size: 0.8em;">5f³6d¹7s²</div>	92
	2
	9
	21
	32
	18
8	

Эжен Пелиго в 1841, восстановив безводный тетрахлорид урана металлическим калием. В 1896 году А. Беккерель открыл явление радиоактивности урана случайным засвечиванием фотопластинок ионизирующим излучением от оказавшегося поблизости кусочка соли урана.

Периодическая система элементов																	
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo
* La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu																	
** Ac Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr																	

1.1 Изотопы и их ядерно-физические характеристики

Известно 14 изотопов урана. В природном уране три радиоактивных изотопа: ²³⁸U (99,2739%, T=4.47*10⁹ лет), ²³⁵U (0.7205%, T=7*10⁹ лет) и ²³⁴U (0.0056%, T=2.48*10⁵ лет). Последний изотоп является не первичным, а радиогенным, он входит в состав радиоактивного ряда ²³⁸U. Радиоактивность природного урана обусловлена в основном изотопами ²³⁸U и ²³⁴U, в равновесии их удельные активности равны. Удельная активность изотопа ²³⁵U в природном уране в 21 раз меньше активности ²³⁸U.

Радионуклид	T _{1/2}	Тип распада	Средняя энергия излучения, МэВ/Бк.с		Дочерний радионуклид (выход)
			характеристическое, γ- и аннигиляционное излучение	β-излучение, конверсионные электроны и электроны Оже	
²³⁰ U	20,8 сут	α	2,98 · 10 ⁻³	2,16 · 10 ⁻²	²²⁶ Th радиоакт.
²³¹ U	4,2 сут	3β; α	8,20 · 10 ⁻²	7,06 · 10 ⁻²	²³¹ Pa радиоакт. ²²⁷ Th радиоакт. (5,5 · 10 ⁻⁵)
²³² U	72 года	α	2,19 · 10 ⁻³	1,74 · 10 ⁻²	²²⁸ Th радиоакт.
²³³ U	1,585 · 10 ⁵ лет	α	1,31 · 10 ⁻³	6,08 · 10 ⁻³	²²⁹ Th радиоакт.
²³⁴ U	2,445 · 10 ⁵ лет	α	1,73 · 10 ⁻³	1,32 · 10 ⁻²	²³⁰ Th радиоакт.
²³⁵ U	703,8 · 10 ⁶ лет	α	1,54 · 10 ⁻¹	4,80 · 10 ⁻²	²³¹ Th радиоакт.
²³⁶ U	2,3415 · 10 ⁷ лет	α	1,57 · 10 ⁻³	1,14 · 10 ⁻²	²³² Th радиоакт.
²³⁷ U	6,75 сут	β ⁻	1,42 · 10 ⁻¹	1,94 · 10 ⁻¹	²³⁷ Np радиоакт.
²³⁸ U	4,468 · 10 ⁹ лет	СД; α	1,36 · 10 ⁻³	1,00 · 10 ⁻²	²³⁴ Th радиоакт.
²³⁹ U	23,54 мин	β ⁻	5,11 · 10 ⁻²	4,08 · 10 ⁻¹	²³⁹ Np радиоакт.
²⁴⁰ U	14,1 ч	β ⁻	7,61 · 10 ⁻³	1,38 · 10 ⁻¹	^{240m} Np радиоакт.

Табл.1 . Некоторые изотопы урана

Чрезвычайно важным свойством некоторых изотопов урана является их способность к делению при захвате нейтронов. Ядра ²³⁴U и ²³⁵U делятся при захвате как тепловых, так и быстрых нейтронов, а ядра ²³⁸U способны к делению только при захвате нейтронов с энергией более 1 МэВ. При захвате нейтронов с меньшей энергией ядра ²³⁸U превращаются сначала в ядра ²³⁹U, которые далее испытывают β-распад и последовательно превращаются в ²³⁹Np и ²³⁹Pu (этот процесс осуществляется в бродерных реакторах). Эффективное сечение тепловых нейтронов

ядер ²³⁴U, ²³⁵U и ²³⁸U равны 98, 683 и 2,7 барн соответственно.

В качестве ядерного топлива используют изотопы ²³⁵U и ²³³U, способные поддерживать цепную реакцию деления.

Средняя энергия α-излучения ²³⁰U, ²³¹U, ²³²U, ²³³U, ²³⁴U, ²³⁵U, ²³⁶U, ²³⁸U равна соответственно 5,97; 3,05·10⁻⁴; 5,4; 4,89; 4,84; 4,47; 4,58; 4,26 МэВ/(Бк.с).

Из 11 искусственных радиоактивных изотопов с массовыми числами от 227 до 240 долгоживущий – ²³³U (T_{1/2} = 1,62·10⁵ лет); он получается при нейтронном облучении тория.

²³⁸U и ²³⁵U являются родоначальниками двух радиоактивных рядов. В процессе распада изотоп ²³⁸U образует несколько радиоактивных элементов. Среди продуктов распада урана встречаются как короткоживущие изотопы (²³⁴Pa - T_{1/2} = 1,18 мин), так и долгоживущие (²³⁰Th - T_{1/2} = 8·10⁴ лет). Процесс

распада урана происходит с испусканием α - и β -частиц, а также γ -квантов. Конечным продуктом распада является стабильный изотоп свинца — ^{206}Pb .

Отдельные изотопы урана

U-235.

В природном уране только один, относительно редкий, изотоп подходит для изготовления ядра атомной бомбы или поддержания реакции в энергетическом реакторе. Степень обогащения по ^{235}U в ядерном топливе для АЭС колеблется в пределах 2-4.5%, для оружейного использования - минимум 80%, а более предпочтительно 90%. В США ^{235}U оружейного качества обогащен до 93.5% (промышленность способна выдать 97.65%). – Такой уран используется в реакторах для военно-морского флота.

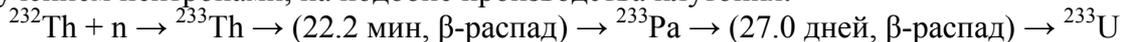
Будучи еще более легким, ^{234}U пропорционально обогащается даже еще в большей степени, чем ^{235}U во всех процессах разделения, основанных на разнице в массах. Высокообогащенный ^{235}U обычно содержит 1.5-2.0% ^{234}U . Интенсивность спонтанного деления ^{235}U 0.16 делений/с*кг. Чистая 60-килограммовая масса ^{235}U производит всего 9.6 делений/с, делая достаточно простой для изготовления пушечную схему. ^{238}U создает в 35 раз больше нейтронов на килограмм, так что даже маленький процент этого изотопа поднимает этот показатель в несколько раз. ^{234}U создает в 22 раза больше нейтронов и имеет похожее с ^{238}U нежелательное действие. Удельная активность ^{235}U всего 2.1 микрокури/г; загрязнение его 0.8% ^{234}U поднимают ее до 51 микрокури/г.

U-238

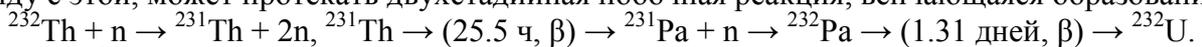
Хотя уран-238 не может быть использован как первичный делящийся материал, из-за высокой энергии нейтронов, необходимых для его деления, он занимает важное место в ядерной отрасли. Имея высокую плотность и атомный вес, ^{238}U пригоден для изготовления из него оболочек заряда/рефлектора в устройствах синтеза и деления. Тот факт, что он делится быстрыми нейтронами, увеличивает энерговыход заряда: косвенно, размножением отраженных нейтронов; непосредственно при делении ядер оболочки быстрыми нейтронами (при синтезе). Примерно 40% нейтронов, образованных при делении и все нейтроны синтеза обладают достаточными для деления ^{238}U энергиями. ^{238}U имеет интенсивность спонтанного деления в 35 раз более высокую, чем ^{235}U , 5.51 делений/с*кг. Это делает невозможным применение его в качестве оболочки заряда/рефлектора в пушечных бомбах, ибо подходящая его масса (200-300 кг) создаст слишком высокий нейтронный фон. Чистый ^{238}U имеет удельную радиоактивность 0.333 микрокури/г. Важная область применения этого изотопа урана - производство ^{239}Pu . Плутоний образуется в ходе нескольких реакций, начинающихся после захвата атомом ^{238}U нейтрона. Любое реакторное топливо, содержащее природный или частично обогащенный по 235-му изотопу уран, после окончания топливного цикла содержит в себе определенную долю плутония.

U-233 и U-232.

Изотоп уран-233 с периодом полураспада 162000 лет не встречается в природе. Его можно получить из тория-232, облучением нейтронами, на подобие производства плутония:



Наряду с этой, может протекать двухстадийная побочная реакция, венчающаяся образованием ^{232}U :



Наработка ^{232}U в ходе этой реакции зависит от присутствия в значительных количествах быстрых нейтронов, ибо сечение первой реакции этого цикла слишком мало для тепловых скоростей. Если в исходном веществе находится ^{230}Th , то образование ^{232}U дополняется реакцией: $^{230}\text{Th} + n \rightarrow ^{231}\text{Th}$ и далее как указано выше. Наличие ^{232}U очень важно из-за последовательности распада: $^{232}\text{U} \rightarrow (76 \text{ лет, } \alpha\text{-распад}) \rightarrow ^{228}\text{Th} \rightarrow (1.913 \text{ лет, } \alpha\text{-распад}) \rightarrow ^{224}\text{Ra} \rightarrow (3.64 \text{ дней, } \alpha\text{- и } \gamma\text{-распад}) \rightarrow ^{220}\text{Rn} \rightarrow (55.6 \text{ с, } \alpha\text{-распад}) \rightarrow ^{216}\text{Po} \rightarrow (0.155 \text{ с, } \alpha\text{-распад}) \rightarrow ^{212}\text{Pb} \rightarrow (10.64 \text{ ч, } \beta\text{- и } \gamma\text{-распад}) \rightarrow ^{212}\text{Bi} \rightarrow (60.6 \text{ мин, } \beta\text{- и } \gamma\text{-распад}) \rightarrow ^{212}\text{Po} \alpha\text{- и } \gamma\text{-распад} \rightarrow ^{208}\text{Tl}, ^{212}\text{Po} \rightarrow (3 \times 10^{-7} \text{ с, } \alpha\text{-распад}) \rightarrow ^{208}\text{Pb} \text{ (стабилен)}, ^{208}\text{Tl} \rightarrow (3.06 \text{ мин, } \beta\text{- и } \gamma\text{-распад}) \rightarrow ^{208}\text{Pb}$. Большое количество энергичных γ -лучей выделяется с началом быстрой последовательности распада ^{224}Ra . Около 85% всей общей энергии образуется при распаде последнего члена последовательности - тантала-208 - энергия гамма-лучей до 2.6 МэВ.

Накопление ^{232}U неизбежно при производстве ^{233}U . Это аналогично накоплению помимо ^{239}Pu других изотопов плутония, только в гораздо меньшей степени. Первая реакция цикла требует нейтронов с энергией не менее 6 МэВ. Такими энергиями обладает очень небольшое количество нейтронов деления и если зона воспроизводства тория находится в такой части реактора, где она облучается умеренно быстрыми нейтронами (~ 500 кэВ) эта реакция может быть практически исключена. Вторая реакция (с ^{230}Th) превосходно идет и с тепловыми нейтронами. Отсюда снижение образования ^{232}U требует загрузки тория с минимальной концентрацией ^{230}Th .

Вышеописанные меры предосторожности ведут к содержанию в оружейном ^{233}U ^{232}U в количестве 5 частей на миллион (0.0005%). В коммерческом ядерном топливном цикле сосредоточение ^{232}U не представляет собой большого недостатка, даже желательно, поскольку это снижает возможность

распространения урана для оружейных целей. Для экономии топлива, после его переработки и повторного использования уровень ^{232}U достигает 0.1-0.2%. В специально спроектированных системах этот изотоп накапливается в концентрациях 0.5-1%. В течение первых пары лет после производства ^{233}U , содержащего ^{232}U , ^{228}Th сохраняется на постоянном уровне, находясь в равновесии с собственным распадом. В этом периоде фоновое значение γ -излучения устанавливается и стабилизируется. Таким образом, первые несколько лет произведенная масса ^{233}U может испускать значительное γ -излучение. Десятикилограммовая сфера ^{233}U оружейной чистоты (5 миллионных долей ^{232}U) создает фон 11 миллибэр/час на расстоянии 1 м спустя 1 месяц после производства, 110 миллибэр/ч через год, 200 миллибэр/ч через 2 года. Обычная камера с перчатками, используемая для сборки ядер бомб, быстро создает трудности с безопасностью для сотрудников. Ежегодная предельная доза в 5 бэр превышает уже через 25 часов работы с таким материалом. Даже свежий ^{233}U (1 месяц со дня изготовления) ограничивает время сборки десятью часами в неделю. В полностью собранном оружии уровень радиации может снижаться поглощением корпусом заряда. В современных облегченных устройствах снижение не превышает 10 раз, создавая проблемы с безопасностью. В более тяжелых зарядах поглощение много более сильное - в 100 - 1000 раз. Рефлектор из бериллия увеличивает уровень нейтронного фона: $^9\text{Be} + \gamma\text{-квант} \rightarrow ^8\text{Be} + \text{n}$. γ -лучи ^{232}U образуют характерную сигнатуру, их можно обнаружить и отследить передвижения и наличие атомного заряда. Производимый по ториевому циклу специально денатурированный ^{233}U (0.5 - 1.0% ^{232}U), создает еще большую опасность. Такая же 10-килограммовая сфера, как описанная выше, изготовленная из такого материала, на расстоянии 1 м через 1 месяц создает фон 11 бэр/час, 110 бэр/ч через год и 200 бэр/ч через 2 года. Обработка и изготовление такого урана идет в специальных боксах, с применением механических манипуляторов (они используются при создании тепловыделяющих сборок для атомных станций). Если попытаться произвести атомную бомбу из этого вещества, даже при сокращении излучения в 1000 раз, непосредственный контакт с таким изделием ограничивается 25 часами в год. Наличие заметной доли ^{232}U в делящемся веществе делает его крайне неудобным для военного применения.

Короткий период полураспада у ^{232}U делает его очень активным источником α -частиц. ^{233}U с 1% ^{232}U имеет в три раза более сильную α -активность, чем оружейный плутоний и, соответственно, большую радиотоксичность. Эта α -активность вызывает рождение нейтронов в легких элементах заряда, представляя даже более серьезную проблему, чем реакция бериллия с γ -квантами. Для минимизации этой проблемы присутствие таких элементов как бериллий, бор, фтор, литий должно быть как можно меньшим. Наличие нейтронного фона совершенно не влияет на имплозионные системы, так как он все равно меньше, чем у плутония. Для пушечных проектов требуемый уровень чистоты по легким материалам - одна часть к миллиону. Хотя такая очистка урана нетривиальная задача, она не выходит за рамки стандартных химических методов очистки. (Электронная промышленность изготавливает кремний даже более высокой чистоты).

^{232}U имеет интенсивность спонтанного деления 0.47 делений/с*кг, ^{233}U - 720 делений/с*кг. Удельная радиоактивность ^{233}U 9.636 милликюри/г, давая α -активность (и радиотоксичность) примерно 15% от плутония. Всего 1% ^{233}U увеличивает радиоактивность до 212 милликюри/г. Несмотря на недостаток в виде сильной γ - и нейтронной радиоактивности, ^{233}U - прекрасный делящийся материал для ядра атомной бомбы. Он обладает меньшей критической массой, чем ^{235}U (критическая масса ^{233}U около 16 кг) и его ядерные характеристики сходны с плутонием. Индия придает большое значение ^{233}U как части исследования и производства оружия, и включила производство изотопа в свою ядерную программу.

Уран-233 также является наиболее перспективным топливом для газофазных ядерных ракетных двигателей.

Обедненный уран.

После извлечения ^{235}U из природного урана, оставшийся материал носит название "обедненный уран", т.к. он обеднен ^{235}U . В США хранится около 560000 тонн обедненного гексафторида урана (UF_6) на трех газодиффузионных обогатительных производствах. Обедненный уран в два раза менее радиоактивен, чем природный уран, в основном за счет удаления из него ^{235}U . Из-за того, что основное использование урана - производство энергии, обедненный уран бесполезный продукт с низкой экономической ценностью. Нахождение путей использования обедненного урана представляет собой большую проблему для обогатительных предприятий. В основном его использование связано с большой плотностью урана и относительно низкой его стоимостью. Две важнейшие сферы использования обедненного урана: использование его для радиационной защиты (как это не странно) и как балластная масса в аэрокосмических применениях, таких как рулевые поверхности летательных аппаратов. В каждом самолете Боинг-747 содержится 1500 кг обедненного урана для этих целей. Обедненный уран в значительной степени применяется при бурении нефтяных скважин в виде ударных штанг (при канатном бурении), его вес погружает инструмент в скважины, наполненные буровым раствором. Еще этот материал применяется в

высокоскоростных роторах гироскопов, больших маховиках, как балласт в космических спускаемых аппаратах и гоночных яхтах.

Но самое известное применение урана - в качестве сердечников для американских бронебойных снарядов. При определенном сплаве с другими металлами и термической обработке (сплавление с 2% Мо или 0.75% Ti, быстрая закалка разогретого до 850°C металла в воде или масле, дальнейшее выдерживание при 450°C 5 часов) металлический уран становится тверже и прочнее стали (прочность на разрыв > 1600 МПа). В сочетании с большой плотностью, это делает закаленный уран чрезвычайно эффективным для пробивания брони, аналогичным по эффективности существенно более дорогому монокристаллическому вольфраму. Процесс разрушения брони сопровождается измельчением в пыль большинства урана, проникновением пыли внутрь защищенного объекта и воспламенением ее на воздухе с другой стороны. Около 300 тонн обедненного урана остались на поле боя во время Бури в Пустыне (по большей части это остатки снарядов 30-мм пушки GAU-8 штурмовых самолетов А-10, каждый снаряд содержит 272 г уранового сплава). Обедненный уран используется в современной танковой броне, например, танка М-1 "Абрамс".

Табл.2 демонстрирует эффективность захвата нейтронов основными изотопами урана.

Табл.2 Захват нейтронов ^{235}U и ^{238}U

Скорость нейтронов	^{238}U	^{235}U
Быстрые нейтроны, энергия (>1 МэВ)	Происходит деление, маловероятен	захват, Происходит деление, маловероятен
Промежуточные нейтроны, энергия (<10 эВ)	Происходит деление, $\text{U}^{238} + \text{n} \rightarrow \text{U}^{239}$	захват, Захват маловероятен
Тепловые нейтроны, энергия (< 0.5 эВ)	Захват происходит очень редко (если происходит, образуется ^{239}U)	Происходит захват, ведущий к делению

1.2 Уран в земной коре

Уран – характерный элемент для гранитного слоя и осадочной оболочки земной коры. Среднее содержание урана в земной коре (кларк) $2,5 \cdot 10^{-4}\%$ по массе, в кислых изверженных породах $3,5 \cdot 10^{-4}\%$, в глинах и сланцах $3,2 \cdot 10^{-4}\%$, в основных породах $5 \cdot 10^{-5}\%$, в ультраосновных породах мантии $3 \cdot 10^{-7}\%$. Общее количество урана $1,3 \cdot 10^{14}$ т, т.е. урана на Земле больше, чем серебра, висмута или ртути. По мере продвижения к центру Земли концентрация урана падает. В морской воле концентрация урана менее 10^{-9} г/л, всего в морской воде содержится от 10^9 до 10^{10} тонн урана.

Уран энергично мигрирует в холодных и горячих, нейтральных и щелочных водах в форме простых и комплексных ионов, особенно в форме карбонатных комплексов. Важную роль в геохимии урана играют окислительно-восстановительные реакции, поскольку соединения урана, как правило, хорошо растворимы в водах с окислительной средой и плохо растворимы в водах с восстановительной средой (например, сероводородных).

В свободном виде уран в земле не встречается. Известно 200 минералов урана, промышленное значение имеют 12 из них. В ходе геологической истории содержание урана в земной коре уменьшилось за счёт радиоактивного распада; с этим процессом связано накопление в земной коре атомов Pb и He. Радиоактивный распад урана играет важную роль в энергетике земной коры, являясь существенным источником глубинного тепла.

Минералы урана делят на первичные, образовавшиеся при формировании земной коры, и вторичные – те, что образовались на более поздних стадиях ее развития под действием тех или иных природных факторов. Урановые минералы образуются на всех стадиях эндогенного минералообразования. Минералы подразделяются на соединения 4-валентного и 6 – валентного урана (соли уранила). Минералы группы оксидов представлены уранинитом, браннеритом и давидитом. Уранинит UO_2 и настуран U_3O_8 – одна минеральная фаза переменного состава UO_x , где x изменяется от 2 до 2,6. Обманкой этот минерал называют за переменчивость цвета: темно-серый, черный, зеленовато-черный... А смолкой – за то, что его зерна действительно похожи на капли застывшей смолы. Уранит $(\text{U}, \text{Th})\text{O}_2$ и урановая смоляная руда (содержит оксиды урана переменного состава) и тюямунит $\text{Ca}[\text{UO}_2]_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Из вторичных минералов распространен желто-зеленый отэнтит – гидратированный уранилфосфат кальция $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Часто урану в минералах сопутствуют другие полезные элементы – титан, тантал, редкие земли. Поэтому естественно стремление к комплексной переработке урансодержащих руд.

Примерный изотопный состав природного урана приведен в **Табл.3**.

Табл.3 Изотопный состав природного урана

Изотоп	Массовый %	Атомный %	Период полураспада
U-234	0.0054%	0.0055%	247 тыс. лет (альфа-распад)
U-235	0.7110%	0.7202%	710 млн. лет (альфа-распад)
U-238	99.2836%	99.2742%	4.51 млрд. лет (альфа-распад)

Хотя содержание изотопа ^{235}U в общем постоянно, могут иметься некоторые колебания его количества, в следствие обеднения руды из-за реакций деления, имевших место, когда концентрация ^{235}U была много выше, чем сегодня. Самый известный такой природный "реактор", возрастом 1.9 миллиарда лет, обнаружен в 1972 году в шахте Окло в Габоне. Когда этот реактор действовал, в природном уране содержалось 3% ^{235}U , столько же, сколько и в современном топливе для атомных электростанций. Теперь ядро шахты выгорело и обеднено, содержит лишь 0.44% ^{235}U .

Содержание ^{234}U в руде незначительно. В отличие от ^{235}U и ^{238}U , из-за своей короткой жизни, этот изотоп образуется вследствие распада атомов ^{238}U : $^{238}\text{U} \rightarrow$ (4.51 миллиарда лет, α -распад) \rightarrow $^{234}\text{Th} \rightarrow$ (24.1 дней, β -распад) \rightarrow $^{234}\text{Pa} \rightarrow$ (6.75 часов, β -распад) \rightarrow ^{234}U Обычно ^{234}U существует в равновесии с ^{238}U , распадаясь и образуясь с одинаковой скоростью. Однако распадающиеся атомы ^{238}U существуют некоторое время в виде тория и протактиния, поэтому могут химически или физически отделиться от руды (выщелачиваться подземными водами). Поскольку ^{234}U обладает относительно коротким временем полураспада, весь этот изотоп, находящийся в руде, образовался в последние несколько миллионов лет. Примерно половину радиоактивности природного урана составляет вклад ^{234}U .

^{236}U обладает периодом полураспада 23.9 миллиона лет и не встречается в природе в значительных количествах. Он накапливается, если уран облучается нейтронами в реакторах, и потому используется как "сигнализатор" отработанного уранового ядерного топлива.

Удельная радиоактивность природного урана 0.67 микрокюри/г (разделяется практически пополам между ^{234}U и ^{238}U , ^{235}U вносит маленький вклад). Природный уран достаточно радиоактивен для засвечивания фотопластинки за время около часа.

1.3 Физические и химические свойства урана

Уран очень тяжелый, серебристо-белый глянцеватый металл. В чистом виде он немного мягче стали, ковкий, гибкий, обладает небольшими парамагнитными свойствами, в порошкообразном состоянии пирофорен. Уран имеет три аллотропные формы: альфа (ромбическая, α -U, параметры решётки $a=285$, $b=587$, $c=496$ пм, стабильна до 667.7°C), бета (тетрагональная, β -U, стабильна от 667.7 до 774.8°C), гамма (с кубической объемно центрированной решёткой, γ -U, существующей от 774.8°C до точки плавления, $t_{\text{пл}}=1134^\circ\text{C}$), в которых уран наиболее податлив и удобен для обработки. Альфа-фаза - очень примечательный тип призматической структуры, состоящей из волнистых слоев атомов в чрезвычайно асимметричной призматической решетке. Такая анизотропная структура затрудняет сплав урана с другими металлами. Только молибден и ниобий могут создавать с ураном твердофазные сплавы. Всё же металлический уран может вступать во взаимодействие со многими сплавами, образуя интерметаллические соединения.

Наиболее распространенными методами получения урана в металлическом состоянии является восстановление их фторидов щелочными или щелочно-земельными металлами или электролиз расплавов их солей. Может быть получены также металло-термическим восстановлением из карбидов металлическим вольфрамом или танталом.

Основные физические свойства урана: температура плавления 1132.2°C ; температура кипения 3818°C ; плотность 19.12; удельная теплоемкость 6.65 кал/моль/ $^\circ\text{C}$ (25°C); прочность на разрыв 450 МПа, теплота плавления 9,3 кДж/моль, теплота испарения 494 кДж/моль, теплоёмкость $c_p=27,6$ Дж/(моль.К). Характеристическая температура Дебая $\Theta_d=200\text{K}$, температура перехода в сверхпроводящее состояние 0,68. Уран слабо парамагнитен.

Существенное влияние на физико-механические свойства урана оказывает облучение нейтронами, вызывающее увеличение размеров, изменение формы, а также резкое ухудшение механических свойств (ползучесть, охрупчивание) урановых блоков (ТВЭЛов) в процессе работы ядерного реактора. Увеличение объема обусловлено накоплением в уране при делении примесей элементов с меньшей плотностью (перевод 1% урана в осколочные элементы увеличивает объем на 3.4%).

Электронная конфигурация внешних оболочек $5s^2p^6d^{10}f^36s^2p^6d7s^2$. Конфигурация внешних электронов атома урана в основном состоянии $5f^36d7s^2$. Энергии последовательной ионизации равны 6,19; 11,6; 19,8; 36,7 эВ. Кристаллохимический радиус атома U 153 пм, радиус ионов U^{3+} и U^{4+} составляет 104 и 89 пм. Значение электроотрицательности 1,1 – 1,2. Работа выхода электрона 3,3 эВ.

Особенности структуры электронных оболочек атома урана (наличие 5f-электронов) и некоторые его физико-химические свойства служат основанием для отнесения урана к переходному ряду актинидов. Однако несомненна также химическая аналогия урана с элементами шестой побочной группы периодической системы (Cr, Mo, W). Уран отличается высокой химической активностью и реагирует со всеми элементами за исключением благородных газов. Уран образует соединения с валентностью 2, 3, 4, 5 и 6. Наиболее устойчивы как в твердом состоянии, так и в растворах соединения 4- и 6-валентного урана. Шестивалентные соединения включают в себя триоксид уранила UO_3 и уранилхлорид урана UO_2Cl_2 . Тетрахлорид урана UCl_4 и диоксид урана UO_2 - примеры четырехвалентного урана. Вещества, содержащие четырехвалентный уран

обычно нестабильны и обращаются в шестивалентные при длительном пребывании на воздухе. Ураниловые соли, такие как уранилхлорид распадаются в присутствии яркого света или органики.

Химически уран очень активный металл. Быстро окисляясь на воздухе, он покрывается радужной пленкой оксида. Мелкий порошок урана самовоспламеняется на воздухе, он загорается при температуре 150-175 °С, образуя U_3O_8 . При 1000 °С уран соединяется с азотом, образуя желтый нитрид урана. Вода способна разъедать металл, медленно при низкой температуре, и быстро при высокой. Уран растворяется в соляной, азотной и других кислотах, образуя четырехвалентные соли, зато не взаимодействует с щелочами. Уран вытесняет водород из неорганических кислот и солевых растворов таких металлов как ртуть, серебро, медь, олово, платина и золото. При сильном встряхивании металлические частицы урана начинают светиться.

Для всех четырех элементов в металлическом состоянии характерно взаимодействие с водородом, азотом и другими элементами. Все они окисляются кислородом воздуха с образованием оксидов.

В системе уран-кислород установлены шесть окислов: UO , UO_2 , U_4O_9 , U_3O_8 , UO_3 . Для них характерна широкая область гомогенности. UO_2 - основной окисел, тогда как UO_3 - амфотерна. UO_3 - взаимодействует с водой с образованием ряда гидратов, из них важнейшие - диурановая кислота $H_2U_2O_7$ и урановая кислота H_2UO_4 . Со щелочами UO_3 образует соли этих кислот - уранаты. При растворении UO_3 в кислотах образуются соли двухзарядного катиона уранила UO_2^{2+} . С фтором уран реагирует при комнатной температуре. Стабильность высших галогенидов падает от фторидов к иодидам. UF_6 (температура сублимации 56.5°C), используется для разделения урана, UF_4 (т.пл. 1030°C), служит исходным соединением для производства урана.

Гидриды типа UH_2 и UH_3 занимают промежуточное положение между солеподобными гидридами и гидридами типа твердых растворов водорода в металле. При взаимодействии урана с азотом образуются нитриды. Известны нитриды различного состава: UN , U_2N_3 и UN_2 . Теплопроводность моонитридов больше, чем оксидов, поэтому их можно рассматривать как потенциальное ядерное горючее для реакторов-размножителей. Уран способен образовывать металлорганические соединения. Наиболее подробно изучены циклопен-тадиенильные производные состава $U(C_5H_5)_4$ и их галогензамещенные $Ue(C_5H_5)_3\Gamma$ или $U(C_5H_5)_2\Gamma_2$.

В нейтральных и кислых растворах 6-валентный уран существует в виде UO_2^{2+} - иона уранила, окрашенного в желтый цвет. К хорошо растворимым солям уранила относятся нитрат $UO_2(NO_3)_2$, сульфат UO_2SO_4 , хлорид UO_2Cl_2 , фторид UO_2F_2 , ацетат $UO_2(CH_3COO)_2$. Эти соли выделяются из растворов в виде кристаллогидратов с различным числом молекул воды. Среди малорастворимых солей уранила, имеющих значение в технологии, следует назвать оксалат $UO_2C_2O_4$, фосфаты UO_2HPO_4 и $UO_2P_2O_4$, уранилфосфат аммония $UO_2NH_4PO_4$, уранилванадат натрия $NaUO_2VO_4$, ферроцианид $(UO_2)_2[Fe(CN)_6]$. Для иона уранила характерна склонность к образованию комплексных соединений. Так известны комплексы с ионами фтора типа $[UO_2F_3]^-$, $[UO_2F_5]^{3-}$, $[UO_2F_6]^{4-}$; нитратные комплексы $[UO_2(NO_3)_3]^-$ и $[UO_2(NO_3)_4]^{2-}$; сернокислые комплексы $[UO_2(SO_4)_2]^{2-}$ и $[UO_2(SO_4)_3]^{4-}$; карбонатные комплексы $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$ и $[UO_2(CO_3)_2(H_2O)_2]^{2-}$ и др. Известно большое число комплексных соединений уранила с жирными и ароматическими кислотами и рядом других классов органических соединений. При действии щелочей на растворы солей уранила выделяются труднорастворимые осадки диуранатов типа $Me_2U_2O_7$ (моноуранаты Me_2UO_4 не выделяются из растворов, они получаются сплавлением окислов урана с щелочами). Известны полиуранаты, состав которых может быть выражен формулой $Me_2U_nO_{3n+1}$ (например, $Na_2U_6O_{19}$).

Шестивалентный уран восстанавливается в кислых растворах до U^{4+} железом, цинком, алюминием, гидросульфитом натрия, амальгамой натрия (восстановление невозможно ни SO_2 , ни H_2S . Растворы окрашены в зеленый цвет. Щелочи осаждают из них гидроокись $UO_2(OH)_2$, плавиковая кислота - фторид $UF_4 \cdot 2,5H_2O$, щавелевая кислота - оксалат $U(C_2O_4)_2 \cdot 6H_2O$. склонность к комплексообразованию у иона U^{4+} меньше, чем у ионов уранила.

1.4 Производство урана

Способов выделения урана из руд разработано великое множество. Но каков бы ни был метод, каково бы ни было сырье, любое урановое производство включает три стадии: предварительное концентрирование урановой руды, выщелачивание урана и получение достаточно чистых соединений урана осаждением, экстракцией или ионным обменом. Далее, в зависимости от назначения получаемого урана, следует обогащение продукта изотопом ^{235}U или сразу же восстановление элементарного урана.

Среди осадительных методов выделения урана наибольшее распространение получил карбонатный метод. Суть этого метода заключается в том, что шестивалентный уран образует с карбонатом аммония растворимый карбонатный комплекс, в то время как большинство сопутствующих элементов переходят в твердую фазу. Возможно также осаждение урана в виде труднорастворимых соединений, например фосфатов, пероксида и др.

Из экстракционных методов наибольшее значение имеет экстракция $U(VI)$ из азотнокислых растворов кислородсодержащими экстрагентами (простыми и сложными эфирами, кетонами и др.). Преимуществом

экстракционного выделения урана в виде нитрата уранила является высокая избирательность процесса. В технологии урана широко используется ТБФ. Из растворов, содержащих смеси анионов, U(VI) экстрагируется третичными аминами, например триоктил-амином.

В технологии урана широко применяется сорбция урана из карбонатных сред с использованием сильноосновных анионитов. В лабораторной практике наряду с ионообменными нашли применение методы распределительной хроматографии. При этом используют гидрофобные инертные носители, например, фторопласт-4; в качестве неподвижной фазы применяются алкилфосфорные кислоты и амины.

1.5 Определение урана

Для качественного обнаружения урана применяют методы химического, люминисцентного, радиометрического и спектрального анализов. Химические методы преимущественно основаны на образовании окрашенных соединений (например, красно-бурая окраска соединения с ферроцианидом, желтая – с перекисью водорода, голубая – реактивом арсеназо). Весьма чувствительный люминисцентный метод основан на способности многих соединений урана под действием УФ-лучей давать желтовато-зеленоватое свечение. При количественном определении урана применяют для его отделения от других элементов осаждение малорастворимых соединений (диуранатов аммония или натрия, пероксида, осаждение органических комплексов с оксихинолином, купферроном и др.); экстракцию органическими растворителями; хроматографию; электролиз водных и неводных растворов.

Количественное определение урана производится различными методами. Важнейшие из них: объемные методы, состоящие в восстановлении U(VI) до U(IV) с последующим титрованием растворами окислителей; весовые методы – осаждение уранатов, пероксида, купферранатов U(IV), оксихинолята, оксалата и т.п. с последующей их прокалкой при 900 – 1000° и взвешиванием U₃O₈; полярографические методы в растворе нитрата позволяют определить 10⁻⁷ – 10⁻⁹ г урана; многочисленные колориметрические методы (например, с H₂O₂ в щелочной среде, с реактивом арсеназо в присутствии ЭДТА, с дибензоилметаном, в виде роданидного комплекса и др.); люминисцентный метод, позволяющий определить при сплавлении с NaF до 10⁻¹¹ г урана.

1.6 Применение урана

Небольшая добавка урана придаёт красивый зеленовато-жёлтый оттенок стеклу. Карбид урана-235 в сплаве с карбидом ниобия и карбидом циркония применяется в качестве топлива для ядерных реактивных двигателей (рабочее тело — водород + гексан). Сплавы железа и обедненного урана (уран-238) применяются как мощные магнестрикционные материалы. В начале XX века уранилнитрат широко применялся в качестве вирулирующего агента для получения тонированных фотографических отпечатков.

Уран служит основным горючим в ядерных реакторах. В реакторах часто используют металлический уран, легированный и нелегированный. Однако в некоторых типах реакторов применяют горючее в форме твердых соединений (например, UO₂), а также водных соединений урана или жидкого сплава урана с другим металлом. На основе ²³²U изготавливают изотопных источников электрической энергии, теплоты, а также механической энергии. Соли урана находят применение в фотографии, стеклоделии (окраска стекла в желто-зеленый цвет), производстве пигментов для высокотемпературных глазурей.

Уран применяют в ядерном оружии. Критическая масса ²³⁵U варьируется от 1-2 кг (в растворе) до 50-60 кг. Находит использование и обеднённый ²³⁵U уран -238 как защитный материал при поглощении рентгеновского и γ-излучения, для легирования броневой стали, улучшения броневой характеристик снарядов.

1.7 Физиологические характеристики

В микроколичествах (10⁻⁵—10⁻⁸ %) обнаруживается в тканях растений, животных и человека. В наибольшей степени накапливается некоторыми грибами и водорослями. Соединения урана всасываются в желудочно-кишечном тракте (1%), в легких — 50%. Основные депо в организме: селезенка, почки, скелет, печень, легкие и бронхо-легочные лимфатические узлы. Содержание в органах и тканях человека и животных не превышает 10⁻⁷ г. Уран и его соединения **токсичны**. Особенно опасны аэрозоли урана и его соединений. Для аэрозолей растворимых в воде соединений урана ПДК в воздухе 0,015 мг/м³, для нерастворимых форм урана ПДК 0,075 мг/м³. При попадании в организм уран действует на все органы, являясь общеклеточным ядом. Молекулярный механизм действия урана связан с его способностью подавлять активность ферментов. В первую очередь поражаются почки (появляются белок и сахар в моче). При хронической интоксикации возможны нарушения кроветворения и нервной системы.

Величина всасывания урана в организме при различных путях поступления зависит от растворимости его соединений. У взрослых людей в организме задерживается в среднем 1,1%, у подростков — 1,8% суточного поступления. Нитрат уранила, фторид уранила, оксид урана (VI), хлорид урана (V), диуранаты аммония и натрия могут в значительных количествах всасываться через кожу. Нерастворимые соединения урана (²³⁸UO₂, ²³⁸UO₄, ²³⁸U₃O₈) практически через кожу не всасываются. Растворимые соединения урана

быстро всасываются в кровь и разносятся по органам и тканям. По удельному содержанию урана в ранние сроки (1—4 ч) почки занимают первое место по сравнению с другими органами. В скелете в ранние сроки уран откладывается не более 0,1%. До 4 сут происходит накопление урана в значительных количествах. Через 16 сут происходит медленное выведение его из организма с $T_{\text{б}}$, равным 150—200 сут. В отдаленные сроки кости (критический орган) содержат более 90 % всего отложившегося в организме урана.

На характер распределения урана в организме существенное влияние оказывает его валентность. При внутривенном введении шестивалентный уран накапливается в почках до 20%, в костях — от 10 до 30%; совсем незначительные количества откладываются в печени. Четырехвалентный уран, наоборот, накапливается в большем количестве в печени и селезенке — до 50%, в костях и почках — 10 - 20%. Это, по-видимому, связано с тем, что четырехвалентный уран легко присоединяется к белкам и не проникает через мембраны, а шестивалентный уран такими свойствами не обладает.

Независимо от путей поступления в организм выделение урана происходит в основном с калом и мочой. Большая часть урана, поступившего в организм, выделяется в первые 24 ч.

Табл. 5. Биологические периоды полувыведения урана при ингаляционном поступлении.

В легких человека, случайно вдохнувшего $^{238}\text{U}_3\text{O}_8$, через 1,5 года определяется не более 3% поступившего количества.

Острая и хроническая урановая интоксикация характеризуются политропным действием урана на различные органы и системы. Растворимые и нерастворимые соединения урана вызывают однотипный характер поражения, разница заключается лишь в скорости развития интоксикации и степени тяжести поражения. В ранние сроки воздействия преобладает химическая токсичность элемента, в поздний период оказывает действие радиационный фактор. При длительном поступлении в организм труднорастворимых соединений урана, когда наблюдается биологическое действие урана, как α -излучателя, развивается хроническая лучевая болезнь.

Табл. 6. Гигиенические нормативы урана.

Объект исследования	Соединение	$T_{\text{б}}$ из легких, сут	$T_{\text{б}}$ из почек, сут	$T_{\text{б}}$ из скелета, сут
Крысы	$^{238}\text{U}_2\text{O}_7(\text{NH}_4)_2$	2 (80 %)	1,8 (43 %)	2,4 (0,76 %)
		30—40 (15 %)	16—32 (57 %)	250—300 (0,24 %)
Собаки	$^{238}\text{UO}_2$	240 (5 %)	—	512 (15 %)
		200	8—16	400
Человек	$^{238}\text{U}_3\text{O}_8$	120	16	300
		$^{238}\text{UO}_2 + ^{238}\text{U}_3\text{O}_8$	118—150	—

Механизм действия растворимых и нерастворимых соединений урана весьма разнообразен. Уран может вызывать не только функциональные, но и органические изменения, как в результате непосредственного (прямого) действия на организм, так и опосредовано через центральную нервную систему и железы внутренней секреции. Полиморфизм поражения урана обусловлен еще и тем, что воздействие его на организм происходит не в виде чистого соединения, а чаще всего большого комплекса соединений (продуктов распада).

В клинике уранового отравления наряду с обширной патологией различных органов и систем ведущим является нарушение почек.

При ингаляционном воздействии различных соединений урана наблюдаются выраженные симптомы легочной патологии, особенно это выявляется для фторида урана (VI).

В опытах на собаках с ингаляцией ^{235}U , обладающего значительно большей радиоактивностью, чем ^{238}U , в отдаленные сроки возникают злокачественные новообразования в легких. В этом случае биологический эффект обусловлен не только химическими свойствами урана, но в большей степени его радиационным действием за счет α -излучения.

Уран во внешней среде определяют методом радиометрического анализа путем измерения α -активности сухих и зольных остатков проб. Определение микроколичеств урана в почве проводят фотометрическим

Для категории А:

Радионуклид	Состояние радионуклида в соединении	Критический орган	ДС _А , Бк	ГДП, Бк/год	ДК _А , Бк/л
^{238}U	Р	Кость	$1,1 \cdot 10^2$	$5,2 \cdot 10^4$	—
		Почки	12,5	$1,3 \cdot 10^4$	—
^{232}U	НР	Легкие	0,4	$0,5 \cdot 10^4$	$19,2 \cdot 10^{-4}$
		Кость	$1,7 \cdot 10^2$	$5,2 \cdot 10^4$	—
^{233}U	Р	Почки	21,1	$1,3 \cdot 10^4$	—
		Легкие	$0,7 \cdot 10^2$	$0,1 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^{-4}$
^{234}U и уран обогатенный ^{235}U	НР	Почки	$0,9 \cdot 10^2$	$5,2 \cdot 10^4$	—
		Кость	$8,1 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^4$	—
^{238}U	Р	Легкие	$2,9 \cdot 10^2$	$0,5 \cdot 10^4$	$20,7 \cdot 10^{-4}$
		Почки	$0,9 \cdot 10^2$	$5,6 \cdot 10^4$	—
^{238}U	НР	Кость	$8,5 \cdot 10^2$	$2,6 \cdot 10^4$	—
		Легкие	$3,0 \cdot 10^2$	$0,5 \cdot 10^4$	$20,4 \cdot 10^{-4}$
^{238}U	Р	Почки	$0,4 \cdot 10^2$	$2,3 \cdot 10^4$	—
		(хим. токсичность)	Кость	$8,9 \cdot 10^2$	$2,7 \cdot 10^4$
^{238}U	НР	Легкие	$3,2 \cdot 10^2$	$0,6 \cdot 10^4$	$22,2 \cdot 10^{-4}$
		Кость	$8,9 \cdot 10^2$	$2,7 \cdot 10^4$	—
^{238}U	НР	Почки	$0,9 \cdot 10^2$	$5,6 \cdot 10^4$	—
		Легкие	$3,1 \cdot 10^2$	$0,5 \cdot 10^4$	$20,7 \cdot 10^{-4}$
^{238}U	Р	Почки	11,5	$0,7 \cdot 10^4$	—
		(хим. токсичность)	0,9 мг	550 мг/год	—

Гигиенические нормативы [41].

Группа радиационной опасности	МЗА, Бк
^{238}U , ^{233}U , ^{234}U и уран обогатенный, ^{235}U , ^{236}U	Б $3,7 \cdot 10^4$
^{232}U	А $3,7 \cdot 10^3$
^{238}U	Г $3,7 \cdot 10^6$ (300 г)
^{240}U	В $3,7 \cdot 10^6$
Уран естественный ^е	Г $3,7 \cdot 10^6$ (150 г)

методом. Он заключается в экстракции урана трибутилфосфатом из раствора нитрата аммония и трилона Б. и реэкстракции раствором арсеназо III. Реэкстракт разбавляют концентрированной азотной кислотой, обработанной мочевиной, и измеряют на фотоколориметре с красным светофильтром.

При определении урана в почве и других минеральных пробах применяют следующий метод. Пробу разлагают плавиковой кислотой, экстрагируют урана этилацетатом и после реэкстракции определяют его колориметрически в виде комплекса с арсеназо III. Другим методом определения урана в почвах, илах, растениях и тканях животных является экстракционно-люминесцентный метод.

Определение урана в природных водах основано на концентрировании урана из воды на гидроксиде железа с последующей экстракцией трибутилфосфатом и реэкстракции раствором арсеназо III с дальнейшим определением фотометрическим методом. Определение урана в растительности основано на измерении люминесценции урана в перлах NaF. Проводят полное переведение пробы в раствор и избирательное экстрагирование урана диэтиловым эфиром. Для контроля химического выхода используют ^{237}U ($T_{1/2}$ — 2,3 сут) с высокой удельной активностью.

Наиболее чувствительным и точным методом определения очень малых количеств урана является активационный метод. Он основан на измерении активности продуктов деления урана, получаемых при облучении урана потоком тепловых нейтронов при плотности потока 10^{12} — 10^{13} нейтр/(см²-с).

Основным вредным фактором при добыче урана являются α -активные аэрозоли и радон. С целью профилактики на рудниках проводят мероприятия, обеспечивающие активное проветривание. При переработке руд, получении солей и т. д. необходимо увлажнение руды, механизация и автоматизация производственных процессов. Механическая вентиляция с 5—7-кратным воздухообменом. Работы с ураном и его соединениями проводят с соблюдением санитарных правил и норм радиационной безопасности.

Дезактивация кожи водой с мылом или содовым раствором. Внутрь раствор двузамещенного фосфата натрия 10:200, слизистые отвары, молоко, яичный белок. Промывание желудка. После очистки желудка—повторно двузамещенный фосфат натрия. При ингаляционном поражении — вдыхание аэрозоля 5 % пентафацина или фосфицина. При болях — внутрь белладонна, атропин (1:100 - 0,5мл). При неукротимой рвоте— витамин Вх с глюкозой, аминазин в/м (0,5% — 5,0 мл). Внутрь солевые слабительные (сернокислый натрий или магний 30:210). В/в 5% раствор пентафацина 40 мл или 10% раствор фосфицина — 20 мл. Фонурит 0,25 г в первые часы после интоксикации, как специфическое средство, предупреждающее поражение почек. Капельное вливание 5% раствора натрия двууглекислого (50,0—100,0 мл). Очистительные клизмы.

При поражении фторидом урана (VI) — немедленно обильное обмывание водой пораженных участков кожи и слизистых оболочек. Обмывание 2 % раствором двууглекислого натрия. Содовые ингаляции, примочки, ванночки. При попадании в желудок внутрь жженную магнезию, глюконат кальция, слизистые отвары. Вдыхание кислорода, карбогена. При спазме голосовой щели — атропин (1:1000- 0,5 мл). При неукротимой рвоте — аминазин в/м (0,5 % — 0,5 мл). Назначение глюконата кальция, хлористого кальция (10 % — 20,0 мл с 40 % глюкозой — 20,0 мл). Очистительные клизмы, мочегонные — фонурит 0,25 г.