КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ
Физико-технический факультет
Кафедра теоретической и ядерной физики

«Основы производства радиоактивных изотопов»

Лекция 7. Производство радионуклидов на реакторе.

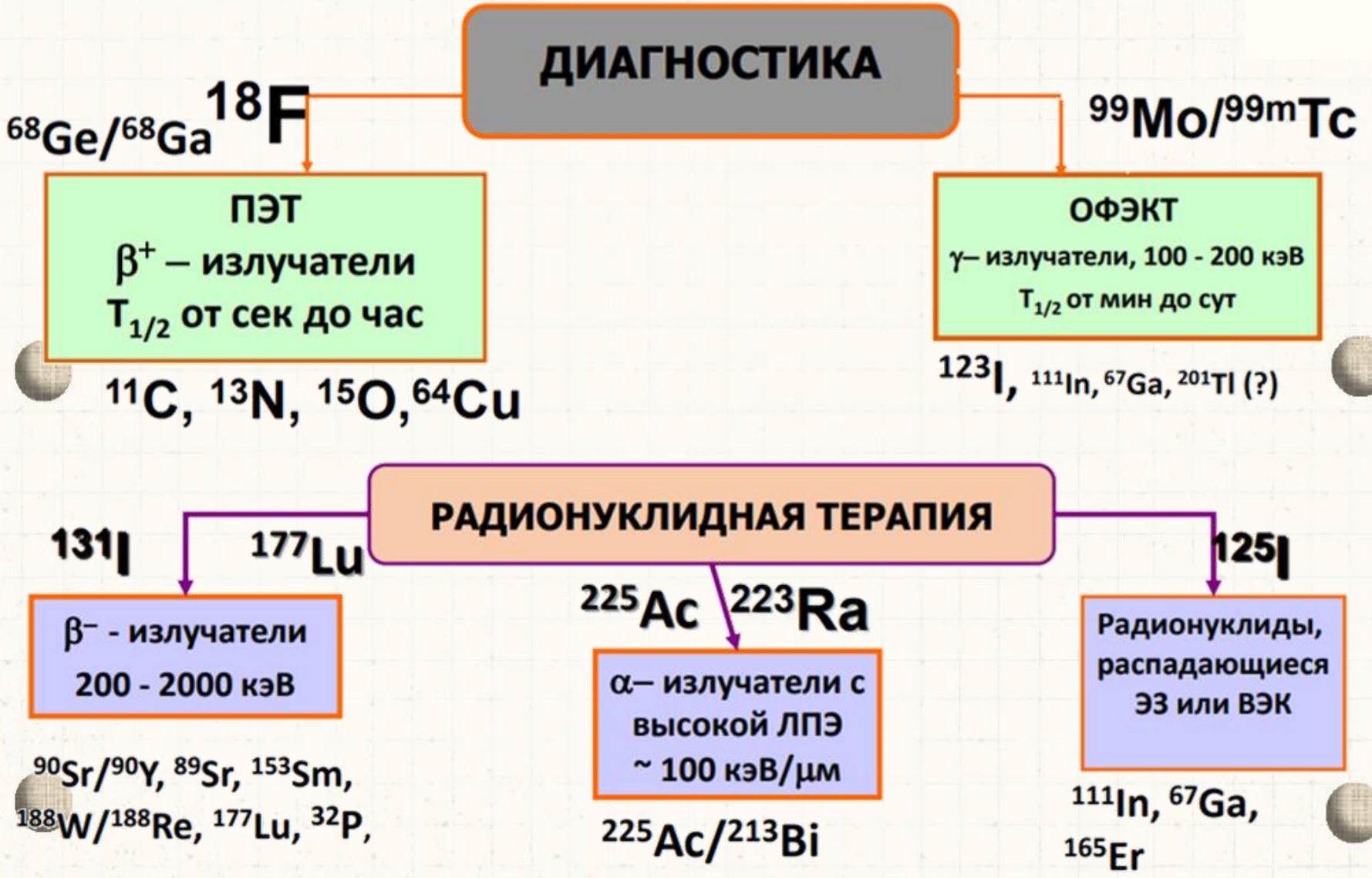
и.о. доцента кафедры
теоретической и ядерной физики
PhD Зарипова Ю.А.

Цель лекции: сформировать представление о принципах и технологиях получения радионуклидов на ядерных реакторах, раскрыть основные типы нейтронных реакций, особенности наработки и выделения радиоактивных изотопов, а также показать их значение для ядерной медицины.

Результаты обучения:

По завершении лекции обучающийся будет способен:

1. Объяснять основные принципы получения радионуклидов на ядерных реакторах и характеризовать используемые нейтронные реакции.
2. Различать реакции радиационного захвата нейтронов и деления тяжёлых ядер, объяснять особенности образования радионуклидов.
3. Описывать основные способы получения молибдена-99 и его значение для производства технеция-99m.
4. Объяснять физический смысл удельной активности и факторы, определяющие выход радионуклидов при облучении мишеней.
5. Характеризовать закономерности накопления и распада радионуклидов, а также основные способы оптимизации их производства.


ДИАГНОСТИКА
$^{68}Ge/^{68}Ga$ ^{18}F
$^{99}Mo/^{99m}Tc$
ПЭТ
β^+ – излучатели
$T_{1/2}$ от сек до час
^{11}C, ^{13}N, ^{15}O, ^{64}Cu
ОФЭКТ
γ– излучатели, 100 - 200 кэВ
$T_{1/2}$ от мин до сут
^{123}I, ^{111}In, ^{67}Ga, ^{201}Tl (?)
РАДИОНУКЛИДНАЯ ТЕРАПИЯ
^{131}I
^{177}Lu
^{225}Ac
^{223}Ra
^{125}I
β^- - излучатели
200 - 2000 кэВ
$^{90}Sr/^{90}Y$, ^{89}Sr, ^{153}Sm,
$^{188}W/^{188}Re$, ^{177}Lu, ^{32}P,
α– излучатели с высокой ЛПЭ
~ 100 кэВ/мкм
$^{225}Ac/^{213}Bi$
Радионуклиды, распадающиеся ЭЗ или ВЭК
^{111}In, ^{67}Ga,
^{165}Er

Реакторные нуклиды (^{131}I, ^{133}Xe) производят, либо помещая мишень из стабильного вещества в нейтронный канал реактора, либо выделяя продукты распада из ОЯТ (отработанное ядерное топливо) или урановых мишеней.

Реакторные радионуклиды получают в ядерных реакторах реакцией нейтронного захвата или делением тяжелых ядер.

1. Реакция радиационного захвата нейтрона – поглощение нейтрона ядром атома, приводящее к ядерных реакциям

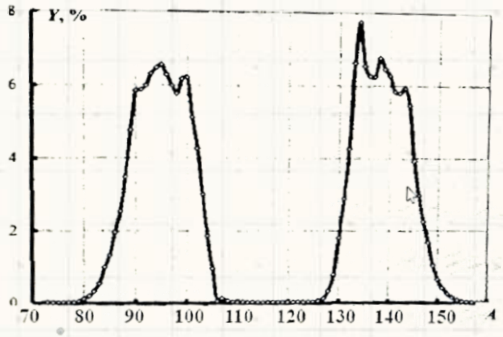
$$^{98}\mathrm{Mo}\,(n,\gamma)\ ^{99}\mathrm{Mo} \rightarrow {}^{99m}\mathrm{Tc}$$

$$^{112}\mathrm{Sn}\,(n,\gamma)\ ^{113}\mathrm{Sn} \rightarrow {}^{113m}\mathrm{In}$$

$$^{130}\mathrm{Te}\,(n,\gamma)\ ^{131}\mathrm{Te} \rightarrow {}^{131}\mathrm{I}$$

2. Реакция деления тяжелых ядер, осколочные радионуклиды – поглощение нейтронов тяжелыми ядрами и их последующий распад на два легких ядра:

$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{236}_{92}U \rightarrow {}^{99}_{42}Mo + {}^{133}_{50}Sn + 4\,{}^{1}_{0}n$$



Реакторные радионуклиды и их применение в медицине

Радионуклид	$T_{1/2}$	Энергия распада, МэВ		Применение
		$E_{\beta max}$	$E\gamma$	
^{99}Mo	67 ч	0.87	0.74	Изготовление РФП на основе ^{99m}Tc для диагностики
^{131}I	8.02 сут	0.61	0.28 0.36 0.64	Диагностика и лечение функциональных нарушений и рака щитовидной железы
^{32}P	14.3 сут	1.71	-	Диагностика, терапия, маркировка нуклеотидов
^{51}Cr	27.8 сут	-	0.323	Маркировка эритроцитов для биологических исследований
^{153}Sm	1.95 сут	0.81	0.07 0.103	Лечение боли в костях при метастазах
^{166}Ho	1.1 сут	1.60	0.08	Лечение ревматоидного артрита
^{125}I	60.2 сут	ЭЗ	0.028- 0.035	РИА, брахитерапия онкозаболеваний

ЭЗ – электронный захват, РИА – радиоиммунный анализ.

Наиболее распространенные мишени |

Радиоизотоп	Мишень	Природное содержание, %	Радионуклидные примеси
^{99}Mo	MoO_3 ^{98}Mo-24%	^{92}Mo (15.1), ^{94}Mo (9.3), ^{95}Mo (15.8), ^{96}Mo (16.5), ^{97}Mo (9.6), ^{100}Mo (9.7)	^{93m}Mo, ^{93}Mo, ^{101}Mo, ^{101}Tc, ^{99}Tc, $^{186+188}Re$
^{131}I	Te/TeO_2 ^{130}Te-34.5%	^{126}Te (18.8), ^{128}Te (31.7)	^{129}I, ^{75}Se, ^{125}Sb, ^{198}Au, $^{197+203}Hg$, др.
^{32}P	S ^{32}S-95%	^{33}S (0.75), ^{34}S (4.21)	^{33}P, ^{35}S
^{51}Cr	K_2CrO_4 ^{50}Cr-4. 35%	^{52}Cr (83.9), ^{53}Cr (9.5)	^{42}K
^{125}I	Xe (газ) ^{124}Xe-0.1%	^{126}Xe (0.09), ^{132}Xe (26.9)	^{126}I, ^{127}I , ^{131}I, ^{133}Xe
^{153}Sm	Sm_2O_3 ^{152}Sm-26.7%	^{144}Sm (3.1), ^{154}Sm (22.7)	^{145}Sm, ^{151}Sm, ^{155}Sm $^{154+155}Eu$, др.
^{166}Ho	Ho_2O_3	^{165}Ho (100)	Радиоантаноиды, ^{166}Dy
^{203}Hg	HgO ^{202}Hg-29.8%	^{196}Hg (0.15), ^{198}Hg (9.97)	^{197}Hg, ^{199}Hg, $^{198+199}Au$
^{82}Br	NH_4Br ^{81}Br-49.3%	^{79}Br (50.69)	^{80m}Br, ^{82m}Br

Способы снижения в мишенях содержания примесей и очистки от них

- *выбор оптимальных параметров облучения;*
- *адекватное охлаждение мишени и контейнера;*
- *радиохимическая обработка и методы очистки:*

- *растворение;*
- *преципитация;*
- *жидкостная экстракция/ионообменное разделение;*
- *электрохимическое окисление/восстановление;*

- жидкостная хроматография высокого давления; - дистилляция, кристаллизация

Продукты нейтронного облучения			
Изотоп	**$T_{1/2}$**	**Реакция**	**Применение**
^{32}P	14 дн	$^{32}S(n,p)^{32}P$	Используется при лечении истинной полицитемии (избыток красные кровяные клеток). Бета-излучатель.
^{24}Na	15 ч	$^{23}Na(n,\gamma)^{24}Na$	Для исследования электролитов в организме.
^{42}K	12 ч	$^{41}K(n,\gamma)^{42}K$	Используется для определения обменного калия в коронарном кровотоке.
^{51}Cr	28 дн	$^{50}Cr\ (n,\gamma)^{51}Cr$	Для мечения красных кровяных телец и количественной оценки потери белка в желудочно-кишечном тракте.
^{59}Fe	46 дн	$^{58}Fe(n,\gamma)^{59}Fe$	Используется в исследованиях метаболизма железа в селезенке.
^{60}Co	5.27 л	$^{59}Co(n,\gamma)^{60}Co$	Для дистанционной лучевой терапии, для стерилизации.
^{75}Se	120 дн	$^{74}Se(n,\gamma)^{75}Se$	Используется в виде селено-метионина для изучения производства пищеварительных ферментов
^{89}Sr	50 дн	$^{235}U\ (n,f\ )^{89}Sr$	Очень эффективным в снижении боли при раке простаты и костей. Бета-излучатель.
^{90}Y	64 ч	$^{235}U\ (n,f\ )^{90}\ Sr \rightarrow {}^{90}Y$	Используется при брахитерапии рака, а также для снятия боли при артрите в больших синовиальных суставах. Чистый бета-излучатель и приобретает все большее значение в терапии, особенно рака печени.
^{99}Mo	66 ч	$^{98}Mo(n,\gamma)^{99}Mo$ $^{235}U(n,f)^{99}Mo$	Родительский изотоп в генераторе ^{99m}Tc
^{99m}Tc	6 ч	$^{99}Mo \rightarrow {}^{99m}Tc$	Используется для визуализации скелета и сердечной мышцы, а также мозга, щитовидной железы, легких (перфузии и вентиляции), печени, селезенки, почек (структура и скорость фильтрации), желчного пузыря, костного мозга, слюнных и слезных желез и пр. Производится из Mo-99 в генераторе.

Активаци

^{103}Pd	17 дн	$^{102}Pd(n,\gamma)^{103}Pd$	Для производства крошечных радиоактивных источников, которые имплантируются в простату при ранних стадиях рака.
^{131}I	8 дн	$^{235}U(n,f)^{131}I$ $^{130}Te\ (n,\gamma)\ ^{131}Te \rightarrow\ ^{131}I$	Используется д лечения рака щитовидной железы и ее визуализации. В диагностике нарушения функции печени, почечного кровотока и обструкции мочевыводящих путей. Сильный гамма-излучатель, но используется для бета-терапии.
^{125}I	59.4 дн	$^{124}\ Xe(n,\gamma)^{125}\ Xe \rightarrow\ ^{125}I$	Используется при брахитерапии рака (простаты и мозга), для оценки скорости фильтрации почек и диагностики тромбоза глубоких вен в ноге. Он также широко используется в радиоиммунном анализе.
^{133}Xe	5 дн	$^{235}U\ (n,\ f\ )^{133}Xe$	Используется для вентиляционных исследований легких.
^{137}Cs	30 л		Для стерилизации крови.
^{153}Sm	47 ч	$^{15\ 2}\ Sm(n,\gamma)^{153}Sm$	Является очень эффективным в облегчении боли вторичного рака в кости. Также очень эффективен при раке простаты и молочной железы. Бета-излучатель
^{165}Dy	2 ч	$^{16\ 4}\ Dy(n,\gamma)^{165}Dy$	Используется в качестве агрегированного гидроксида при синовэктомии в лечении артрита.
^{166}Ho	26 ч	$^{16\ 5}\ Ho(n,\gamma)^{166}Ho$	Используется для диагностики и лечения опухолей печени
^{169}Er	9.4 дн	$^{16\ 8}\ Er(n,\gamma)^{169}Er$	Используется для снятия боли в синовиальных суставах при артрите
^{169}Yb	32 дн	$^{16\ 8}\ Yb(n,\gamma)^{169}Yb$	Используется для исследований спинномозговой жидкости.
^{177}Lu	6.7 дн	$^{176}Yb(n,\gamma)^{177}Yb \rightarrow ^{177}Lu$	Используется для визуализации. Бета-излучение используется для терапии малых (например, эндокринных) опухолей.
^{186}Re	3.8 дн	$^{18\ 5}\ Re\ (n,\gamma)^{186}Re$	Для облегчения боли при раке костей. Бета-излучатель со слабым гамма для работы с изображениями.

Активац

^{188}W	68.9 дн	$^{186}W(n,\gamma)$ $^{187}W(n,\gamma)^{188}W$	Родительский изотоп в генераторе ^{188}R e
^{188}Re	17 ч	$^{188}W \rightarrow {}^{188}Re$	Используется для бета облучения коронарных артерий.
^{192}Ir	74 дн	$^{19\,1}Ir(n,\gamma)^{192}Ir$	Используется в качестве внутреннего источника при лучевой терапии рака. Бета-излучатель.
^{198}Au	2.7 дн	$^{197}Au(n,\gamma)^{198}Au$	Используется для сканирования печени, определение кровотока печени, регионарного лимфотока и сканирование лимфатических узлов. В качестве лечебного средства вводится в ткани, полости и лимфатические сосуды.
^{212}Bi	10.6 ч	Генераторный изотоп $^{228}Th/^{224}Ra$ и $^{224}Ra/^{212}Bi$	Со своим продуктом распада ^{212}Po используется в таргетной альфа терапии рака или альфа радиоиммунотерапии, особенно при меланоме, раке молочной железы и раке яичников.
^{213}Bi	46 м	Генераторный изотоп $^{229}Th/^{225}Ac$ и $^{225}Ac/^{213}Bi$	Используется в таргетной альфа терапии

Основные характеристики качества радионуклидной продукции:

1. *Удельная активность (количество распадов на единицу массы);*
2. *Радионуклидная чистота.*

Существует универсальная формула, которая позволяет проводить расчеты количества производимых радионуклидов, но она работает только в случае короткого облучения и тонкой мишени

$$N_2 = \sigma N_1 \Phi t$$

где N_1-ядер в мишени, Ф-поток частиц (шт/см^2/с), σ-сечение (см^2)

Интегрированием выражения $N_2 = \sigma N_1 \Phi t$ можно получить выражение для толстой мишени без учета распада:

$$A = Yit$$

где А-активность (Бк), Y-выход (Бк/мкАч), t-время облучения. И выражение для толстой мишени с учетом распада за время облучения:

$$A = Yi(1 - e^{-\lambda t})/\lambda$$

Выводы:

1. Ядерные реакторы обеспечивают получение радионуклидов посредством взаимодействия тепловых и быстрых нейтронов с веществом мишени.
2. Основными процессами производства реакторных радионуклидов являются радиационный захват нейтронов и деление тяжёлых ядер.
3. Молибден-99, получаемый в реакторе, служит материнским радионуклидом для технеция-99m, широко применяемого в медицинской диагностике.
4. Выход и удельная активность радионуклидов зависят от плотности потока нейтронов, сечения реакции, состава мишени и продолжительности облучения.

Вопросы для самопроверки:

1) Какие типы нейтронных реакций используются при получении радионуклидов на реакторах?
2) В чём суть реакции (n,γ) и почему продукты этой реакции имеют невысокую удельную активность?
3) Как образуется молибден-99 и почему он является важным радионуклидом для медицины?
4) Что означает понятие «динамическое равновесие» при облучении мишеней в реакторе?
5) Какие факторы влияют на выход радионуклида при его наработке на реакторе?

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

