

ПЛУТОНИЙ*

И. Я. Василенко

доктор медицинских наук,

Государственный научный центр — Институт биофизики

О. И. Василенко†

доктор физико-математических наук,

физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова

Плутоний — трансурановый элемент. Известны радиоактивные изотопы с массовыми числами $232 \div 246$. Практическое значение имеют ^{238}Pu и ^{239}Pu . Ядерно-физические характеристики основных радиоизотопов приведены в табл. 1. Стабильных изотопов плутония в природе не обнаружено.

Радиоизотопы плутония получают в промышленных урановых реакторах по реакции (n, γ) . Тяжёлые изотопы получают облучением ^{239}Pu нейтронами. ^{239}Pu наряду с ^{235}U используют в ядерных и термоядерных боеприпасах, а также в качестве ядерного горючего на АЭС. ^{238}Pu нашёл широкое применение для изготовления атомных электрических батарей, источников питания для электрокардиостимуляторов, получения энергии в космических аппаратах.

Наиболее значимым источником загрязнения внешней среды плутонием ($^{239\div 241}\text{Pu}$ и др.) были испытания ядерного оружия. Так, только в пик испытаний (1945–1976 гг.) во внешнюю среду поступило 13 ТБк $^{239,240}\text{Pu}$, 360 ТБк ^{241}Pu и 0.13 ТБк других трансурановых элементов с массовыми числами более 241. Источником загрязнения были и остаются некоторые этапы топливно-ядерного цикла, аварии на АЭС и аварии на летательных аппаратах, где плутоний используется как источник энергии. В 1969 г. при сгорании навигационного спутника в атмосферу поступило 0.63 ТБк ^{238}Pu . Потенциальным источником также могут быть аварии при уничтожении накопленных ядерных боеприпасов, которое проводится в настоящее время в широких масштабах. Следует отметить, что ^{239}Pu в ничтожно малых количествах образуется в урановых рудах в результате действия нейтронов на ^{238}U . Его содержание колеблется от 0.4 до 15 частей на 10^{12} частей урана.

* И. Я. Василенко, О. И. Василенко. “Плутоний.” // Энергия: экономика, техника, экология. 2004, № 1, С. 60–63.

†E-mail address: vasilenko@depni.sinp.msu.ru

1 Миграция во внешней среде

Миграция плутония во внешней среде связана с растворимостью его соединений в природных средах, что имеет решающее значение в перемещении нуклида в цепи: почва (вода) → растения → животные → человек. При испытаниях ядерного оружия плутоний поступал во окружающую среду в форме окислов и отдельных атомов. Тугоплавкие оксиды плутония практически нерастворимы. Плутоний в виде атомов и их соединений более растворим. Плутоний в выбросах атомной энергетики (переработка отработанного топлива) представлен в основном растворимыми формами, а также комплексными соединениями с органическими лигандами.

В настоящее время основным резервуаром плутония является почва и донные отложения водоёмов (более 99 % количества, поступившего во внешнюю среду). В биологических компонентах экосистем содержится менее 1 %. В зависимости от источника поступления и состава почвы до 10 % плутония может находиться в растворимой форме, доступной для усвоения растениями.

2 Процессы метаболизма (поступление, распределение и выведение из организма)

В организм человека плутоний может поступать через органы дыхания, кожные покровы, ожоговые поверхности, раны и перорально. Ингаляционный путь поступления при вдыхании загрязнённого воздуха в производственных условиях является наиболее значимым и потенциально опасным, что связано со значительными объёмами потребления воздуха и большой поверхностью лёгких. Суточное потребление воздуха "стандартным человеком" (МКРЗ-23) составляет более 20000 дм³, а воды 2.5 ÷ 3 л (дм³). Поверхность лёгких у мужчин достигает 75 м², у женщин — 66 м², а поверхность кожи 1.8 и 1.5 м² соответственно. Задержка в дыхательной системе аэрозолей плутония зависит от дисперсного состава и объёма дыхания. Задержка происходит в результате инерционного осаждения, осаждения под действием силы тяжести (седиментации), диффузии и броуновского движения. Инерционное осаждение характерно для верхних дыхательных путей (носоглотка, трахея, бронхи), где задерживаются частицы крупнее одного микрона. Частицы размерами менее 0.1 микрона задерживаются в альвеолах в результате броуновского движения и диффузии. В лёгких плутоний оседает неравномерно, что приводит к неравномерному облучению органа. В местах депонирования формируются дозы во много раз превышающие среднетканевую. Особенно интенсивному облучению подвергаются лимфатические узлы (перибронхиальные и медиастанальные), где накапливается плутоний в процессе его перераспределения.

Пероральное поступление определяется содержанием нуклида в пищевом рационе. Отметим, что 70 ÷ 90 % ингалированного нуклида в процессе механического очищения лёгких поступает через ротовую полость в кишечник. Резорбция нуклида в кишечнике колеблется от $0.1 \cdot 10^{-4}$ % для труднорастворимых соединений диоксида до 10^{-3} % для других соединений. У детей в период молочного вскармливания резорбция выше.

Основное количество проходит транзитом и выводится с калом.

Через кожу, раны и ожоговые поверхности плутоний может поступать в форме порошков и растворов. Перкутанный путь поступления имеет значение в профессиональных условиях, особенно "раневое" поступление из-за нарушения техники безопасности. Через кожу плутоний всасывается медленно. Величина резорбции составляет $2 \cdot 10^{-6}$ в час. Всасывание через раны определяется характером повреждения. Особенно быстро нуклид всасывается в растворимой форме через глубокие повреждения.

Всосавшийся в кровь плутоний гидролизуется с образованием агрегатов, которые задерживаются клетками ретикулоэндотелиальной системы. Независимо от пути поступления плутония в организм органами основного депонирования являются скелет и печень. Депонируется нуклид и в других органах. Накопление печенью растворимых соединений нуклида достигает $80 \div 90$ %, а слаборастворимых около 40 % от содержания в организме. В печени плутоний образует прочные соединения с гамма-глобулином. Выводится нуклид крайне медленно. $T_{\text{эфф.ект.}}$ (время, в течение которого выводится 50 % нуклида) достигает 40 лет. Доза, равная 15, 25, 50 % формируется в течение 6, 40 и 90 лет. Пожизненные дозы от внутреннего облучения плутонием приведены в табл. 2.

Из крови плутоний поступает также в скелет. Сначала происходит коллоидная сорбция нуклида на поверхности структур костной ткани, а затем он проникает в глубину, задерживаясь в течение длительного времени. $T_{\text{эфф.ект.}}$ оценивается примерно в 100 лет. Накопление плутония в костях может привести к остеалгическому синдрому, связанному с развитием склеротических процессов.

3 Токсичность

Плутоний — один из наиболее токсичных радионуклидов, характеризующийся высокой удельной активностью ($1 \text{ г} \Leftrightarrow 22.57 \cdot 10^8 \text{ Бк}$). Биологическое действие определяется альфа-излучением. При инкорпорации нуклида энергия альфа-частиц полностью реализуется. В табл. 3 приведена сравнительная токсичность разных радионуклидов.

Биологическое действие плутония исследовано в опытах на разных видах животных. Острые, подострые и хронические поражения у собак наблюдали при введении 92.5, менее 92.5 и менее 4 кБк/кг массы тела. У мышей и кроликов острая форма лучевого поражения развивалась после введения им более 417 кБк/кг, а у крыс — более 740 кБк/кг массы тела. Гибель животных наступала в первые 2–3 недели от апластической анемии и лейкопении, а также кровоизлияний различной локализации и развития инфекционных осложнений.

При ингаляционном поступлении нуклида у животных в отдалённые сроки наблюдали развитие склеротических процессов, сопровождавшихся сердечно-сосудистой патологией, развитием дистрофических процессов в печени с нарушением функции органа. развитие склеротических процессов отмечали и в других органах. В отдалённые сроки у животных регистрировали опухоли лёгких, остеосаркомы, опухоли печени, эндокринных органов, лейкозы. Минимальное недействующее количество плутония по выходу опухолей составляет 0.3 кБк/кг массы тела.

Накопление плутония в гонадах проявлялось нарушение их функциональной актив-

ности, более ранним развитием дегенеративно-склеротических процессов, приводивших к бесплодию. Рождённое потомство характеризовалось пониженной жизнеспособностью и повышенной частотой образования опухолей. Изменения в яичниках регистрировали при поглощённой дозе 2 сЗв, в семенниках — 3 сЗв.

Практический интерес представляют клинические наблюдения за поступлением плутония персоналу в производственных условиях. При поступлении больших количеств (сотен кБк) регистрировали развитие острого интерстициального пневмонита с летальным исходом. Поступление десятков кБк приводило к развитию пневмосклероза. Распространённость процесса и его тяжесть возрастали с увеличением поглощённой дозы, а латентный период сокращался. Развитие склероза является основной неопухоловой формой отдалённой патологии. Склероз обычно носит очаговый характер. Развитие лёгочной недостаточности сопровождается соответствующими нарушениями со стороны сердечно-сосудистой системы. Минимальная пневмосклеротическая доза находится в диапазоне $0.8 \div 1.3$ Зв.

Наиболее опасными являются канцерогенные эффекты. Опухоли в лёгких развивались у облучённых в широком диапазоне доз от 0.8 до 100 Зв. Минимальная канцерогенная доза для оксида плутония равна 0.8 Зв. Дозы, не вызывающие опухоль, меньше 0.4 Зв. Минимальная доза для индукции остеосарком равна 1.4 Зв.

У персонала плутониевого завода, работавшего с растворимыми и нерастворимыми соединениями плутония, увеличение частоты рака лёгкого зарегистрировано через 18 лет после начала работы. На 1 Зв дозы в лёгких избыточный относительный риск составил у мужчин $0.23 \div 0.38$, у женщин $0.08 \div 0.43$. Медицинские последствия поступления плутония взрослому населению приведены в табл. 4.

4 Неотложная помощь

Для принятия эффективных мер защиты и снижения дозы облучения необходимо уточнить

- химическую форму соединения;
- результаты первичной радиометрии;
- время и пути поступления радионуклида в организм;
- состояние пострадавшего.

Основными мерами неотложной помощи являются снижение всасывания поступившего в организм плутония и ускорение его выведения. Для этого под радиометрическим контролем проводят обмывание водой тела пострадавшего с применением моющих средств (Защита-7, паста 11 или 115), очистку слизистых рта и носа водой или 2 % раствором соды, промывают желудок, дают рвотное (апоморфин 1 % — 0.5 мл), слабительные, мочегонные (фонуриг 0.25), кишечник очищают с помощью обильных очистительных клизм, дают адсорбенты (активированный уголь, пектин). Эффективным

средством является цинкацин. Подобно пентацину он связывает плутоний в устойчивые нерастворимые комплексы. Цинкацин более эффективен, чем пентацин. Разовая доза цинкацина равна 0.25 г (5 мл 5 % раствора, при ингаляционном введении — 10 ÷ 20 мл 5 % раствора). Внутривенно препарат вводится капельным способом с физиологическим раствором. Длительность курсов лечения определяется количеством поступившего в организм плутония и варьирует от 7-10 дней до 1-2 месяцев. При необходимости курс лечения повторяется через 1-2 месяца. Лечение проводится чередованием ингаляционного и внутривенного введения препарата.

Дезактивация глубоких ран проводится путём обкалывания ран 5 % раствором цинкацина. При необходимости удаление плутония из раны проводится хирургическим путём. Для дезактивации ран и ожогов используют растворы различных комплексообразователей (ЭДТА, ДЭЭТА, ДТПА и др.) с применением моющих средств (Защита-7, паста 11 или 115). Лечение проводится под контролем выведения плутония из организма с мочой и калом.

Неотложную помощь следует проводить и при отсутствии полной дозиметрической информации.

**Ядерно-физические свойства
основных радиоактивных изотопов плутония**

Радио- нуклид	$T_{1/2}$	Тип распада	Средняя энергия излучения, МэВ/(Бк·с)			Дочерний радио- нуклид (выход)
			характери- стическое, γ - и аннигиля- ционное излучение	β -излучение, конвер- сионные электроны и электроны Оже	α -излу- чение и ядра отдачи	
^{236}Pu	2.851 года	СД, α	$2.09 \cdot 10^{-3}$	$1.35 \cdot 10^{-2}$	5.85	^{232}U радиоакт.
^{237}Pu	45.3 сут.	ЗЭ, α	$5.23 \cdot 10^{-2}$	$1.58 \cdot 10^{-2}$	$2.74 \cdot 10^{-4}$	^{233}U (выход $5 \cdot 10^{-5}$); ^{237}Np радиоакт.
^{238}Pu	87.74 года	СД, α	$1.81 \cdot 10^{-3}$	$1.06 \cdot 10^{-2}$	5.58	^{234}U радиоакт.
^{239}Pu	24065 лет	α	$7.96 \cdot 10^{-4}$	$6.65 \cdot 10^{-3}$	5.23	^{235}U радиоакт.
^{240}Pu	6537 лет	СД, α	$1.73 \cdot 10^{-3}$	$1.06 \cdot 10^{-2}$	5.24	^{236}U радиоакт.
^{241}Pu	14.4 года	β^-	$2.54 \cdot 10^{-6}$	$5.24 \cdot 10^{-3}$	$1.22 \cdot 10^{-4}$	^{237}U радиоакт. (выход $2.45 \cdot 10^{-5}$); ^{241}Am радиоакт.
^{242}Pu	376300 лет	СД, α	$1.44 \cdot 10^{-3}$	$8.72 \cdot 10^{-3}$	4.974	^{238}U радиоакт.
^{243}Pu	4.956 ч.	β^-	$2.55 \cdot 10^{-2}$	$1.71 \cdot 10^{-1}$	—	^{243}Am радиоакт.

Таблица 2

**Пожизненные эффективные дозы Зв/Бк
от внутреннего облучения (МКРЗ. Публ. 63)**

Нуклид	Возраст, лет				
	< 1	1-2	2-7	7-17	> 17
Поступление с рационом					
²³⁹ Pu	$42.0 \cdot 10^{-7}$	$4.2 \cdot 10^{-7}$	$3.3 \cdot 10^{-7}$	$2.6 \cdot 10^{-7}$	$2.5 \cdot 10^{-7}$
Поступление через органы дыхания					
²³⁹ Pu	$4.1 \cdot 10^{-5}$	$3.8 \cdot 10^{-5}$	$2.6 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$

Таблица 3

**Количество радионуклидов,
вызывающее 50 % гибель крыс
в течение 30 суток (СД_{50/30})**

Радио- нуклид	Количество, кБк/г	Радио- нуклид	Количество, кБк/г
⁸⁹ Sr	166	¹⁴⁰ La	526
⁹⁰ Sr	55	¹⁴⁴ Ce	126
⁹⁰ Y	259	¹⁴⁷ Pm	259
⁹¹ Y	136	²³⁷ Np	0.01
⁹⁵ Nb	311	²³⁹ Pu	2.18
¹⁰⁶ Ru	136	²⁴¹ Am	4.07
¹³¹ I	148	²⁴⁴ Cm	4.07
¹³⁷ Cs	80	²⁵² Cf	0.44
¹⁴⁰ Ba	74		

Таблица 4

**Медицинские последствия поступления
плутония взрослому населению**

Диапазон поступления кБк ^{*)}	Последствия
3.7 · 10 ³ ÷ 10 ⁵	Возможны смертельные исходы в течение года в результате развития острого интерстициального пневмонита.
37 ÷ 3.7 · 10 ³	Серьёзные детерминированные эффекты, приводящие к инвалидности, в связи с пневмосклерозом и высокой вероятностью развития рака.
0.6 ÷ 37	Отдалённые медицинские последствия в виде лёгочной патологии.
0.3 ÷ 0.6	Возможно учащение рака лёгкого по сравнению с фоновыми показателями необлучённой популяции.

*) Оксиды плутония с АМАД = 1 мкм.