

3. ПОЛОНИЙ

Полоний— радиоактивный химический элемент VI группы периодической системы элементов. Атомный номер 84. Атомная масса 209. Обозначается символом Po (лат. *Polonium*).

Элемент открыт в 1898 супругами Пьером Кюри и Марией Склодовской-Кюри в смоляной обманке— урановой руде. При этом элемент 84 концентрировался в висмутовой фракции. Первый образец полония, содержащий 0,1 мг этого элемента, был выделен в 1910. Элемент назван в честь родины Марии Склодовской-Кюри— Польши (лат. *Polonia*). М.Кюри предположила, что повышенная радиоактивность некоторых образцов урановой смоляной руды обусловлена присутствием в руде других, ещё неизвестных радиоактивных веществ. Это подтвердилось, и из урановой руды сначала был выделен новый элемент, концентрирующийся в соединениях висмута – полоний, а затем элемент, сходный с барием – радий.

84	Po
6 18 32 18 (209) 8 2	ПОЛОНИЙ
	$6s^2 6p^4$

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

Полоний всегда присутствует в урановых и ториевых минералах. Равновесное содержание полония в земной коре $2 \cdot 10^{-14}\%$ по массе. В урановых рудах равновесное отношение урана к полонию составляет $1,9 \cdot 10^{10}$. Это означает, что в урановых минералах полония почти в двадцать миллиардов раз меньше, чем урана (в равновесии с 1 г радия находится 0,2 мг полония).

Содержание полония в земной коре $10^{-15}\%$. Существуют семь изотопов полония,

которые образуются во всех трех естественно-радиоактивных семействах в процессе распада эманации (радона, торона, актинона) или их продуктов распада. В процессе распада они превращаются в стабильные или радиоактивные изотопы свинца.

Основным источником ^{210}Po в окружающей среде является ^{222}Rn , выделяющийся из почвы. Для средних широт Северного полушария средние концентрации ^{210}Po составляют $0,12 \cdot 10^{-3}$ Бк/м³. Концентрация ^{210}Po в почве колеблется в пределах $(7,4-22,2) \cdot 10^{-2}$ Бк/г в зависимости от типа почвы; в атмосферных осадках — $(0,37-9,2) \cdot 10^{-2}$ Бк/л; в воде открытых водоемов концентрация ^{210}Po в 10 - 100 раз меньше.

Электронная конфигурация атома полония $6s^2 6p^4$ аналогична конфигурациям селена и теллура.

Полоний (Po)	
Атомный номер	84
Внешний вид	серебристо-серый металл
Свойства атома	
Атомная масса (молярная масса)	208,9824 а.е.м. (г/моль)
Радиус атома	176 пм
Энергия ионизации (первый электрон)	813,1 (8,43) кДж/моль (эВ)
Электронная конфигурация	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁴
Химические свойства	
Ковалентный радиус	146 пм
Радиус иона	(+6e) 67 пм
Электроотрицательность (по Полингу)	2,0
Электродный потенциал	Po ← Po ³⁺ 0,56 В Po ← Po ²⁺ 0,65 В
Степени окисления	-2, +2, +4, +6
Термодинамические свойства	
Плотность	9,32 г/см ³

<u>Удельная теплоёмкость</u>	0,125 <u>Дж/(К·моль)</u>
<u>Температура плавления</u>	527 <u>К</u>
<u>Теплота плавления</u>	(10) <u>кДж/моль</u>
<u>Температура кипения</u>	1,235 <u>К</u>
<u>Теплота испарения</u>	(102,9) <u>кДж/моль</u>
<u>Молярный объём</u>	22,7 <u>см³/моль</u>

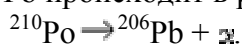
Кристаллическая решётка

<u>Структура решётки</u>	кубическая
<u>Период решётки</u>	3,350 <u>Å</u>

3.1 Изотопы полония

На начало 2006 года известны 33 изотопа полония в диапазоне массовых чисел от 188 до 220. (Полоний - один из самых многоизотопных элементов). Кроме того, известны 10 метастабильных возбуждённых состояний изотопов полония. Наиболее долгоживущий изотоп, ^{209}Po (получен искусственно), имеет период полураспада 102 года.

Наиболее долгоживущий из природных изотопов полоний-210 (природный радионуклид) – практически чистый альфа-излучатель ($T=138,401$ дня), образующийся в радиоактивном ряду урана-238 (выход γ -квантов составляет $1,1 \cdot 10^{-3}\%$). Он является одним из продуктов долгоживущего активного осадка радона. Превращение ^{210}Po в ^{206}Pb происходит в результате α -распада



В подавляющем количестве случаев ^{210}Po распадается на основное состояние ^{206}Pb с испусканием альфа-частиц с энергией 5.3 МэВ, и только ничтожная доля (0.00122%) ядер ^{210}Po распадается на возбужденное (803 кэВ) состояние ^{206}Pb , которое распадается с испусканием гамма-квантов. Обнаружить сопутствующее такому альфа-распаду гамма-излучение можно только в прецизионном эксперименте. Изотоп ^{210}Po является не только самым долгоживущим среди естественных, т.е. существующих на Земле, а не полученных искусственным путем, изотопов полония, но и самым распространенным. Он постоянно образуется за счет цепочки распадов изотопов, которая начинается с ^{238}U и кончается ^{206}Pb .

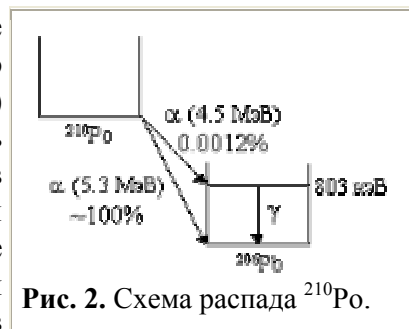


Рис. 2. Схема распада ^{210}Po .

$^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} \rightarrow ^{234}\text{Pa} \rightarrow ^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th} \rightarrow ^{228}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po} \rightarrow ^{214}\text{Pb} \rightarrow ^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po} \rightarrow ^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$.

Таким образом, источником получения полония-210 может служить активный осадок радона, накапливающийся в старых радоновых ампулах.

Период полураспада ($T_{1/2}$) ^{238}U 4.5 миллиарда лет. В естественной урановой смеси ^{238}U более 99%. Для количества ядер (N) изотопов урана (^{238}U) и полония (^{210}Po) в естественной смеси и их периодами полураспада ($T_{1/2}$) справедливо соотношение

$$\frac{N(^{238}\text{U})}{N(^{210}\text{Po})} = \frac{T(^{238}\text{U})}{T(^{210}\text{Po})}$$

Аналогичные соотношения справедливы для всех изотопов цепочки последовательных распадов, т.к. они находятся в *вековом равновесии*, когда количество распадов в единицу времени у всех изотопов одинаковое. В 1 тонне урановой руды содержится 100 микрограмм полония. В основном это ^{210}Po . Всех других естественных изотопов полония еще меньше (и на много). Полоний можно выделить из урановых руд при обработке отходов уранового производства. Однако для того, чтобы получить заметное количество полония, пришлось бы обработать немыслимое количество таких отходов.

Кроме ^{210}Po еще два искусственно-радиоактивных изотопа полония имеют относительно большие периоды полураспада - это ^{208}Po ($T=2.898$ лет) и ^{209}Po ($T=102$ лет). Эти изотопы можно получить, используя бомбардировку ускоренными в циклотроне пучками альфа-частиц, протонов или дейтронов мишеней из свинца или висмута. Все остальные изотопы полония имеют периоды полураспада от 8.8 дней (^{206}Po) до долей микросекунды (Табл.).

Некоторые изотопы полония, входящие в радиоактивные ряды урана и тория, имеют собственные (устаревшие) наименования:

Изотоп	Название	Обозначение
^{210}Po	Радий F	RaF

^{211}Po	Актиний С'	AcC'
^{212}Po	Торий С'	ThC'
^{214}Po	Радий С'	RaC'
^{215}Po	Актиний А	AcA
^{216}Po	Торий А	ThA
^{218}Po	Радий А	RaA

Радионуклиды полония входят в состав естественных радиоактивных рядов:
 ^{210}Po ($T = 138,376$ суток), ^{218}Po ($T = 3,10$ мин) и ^{214}Po ($T = 1,643 \cdot 10^{-4}$ с) — в ряд ^{238}U ;
 ^{216}Po ($T = 0,145$ с) и ^{212}Po ($T = 2,99 \cdot 10^{-7}$ с) — в ряд Th;
 ^{215}Po ($T = 1,781 \cdot 10^{-3}$ с) и ^{211}Po ($T = 0,516$ с) — в ряд ^{235}U

Табл. 4. Изотопы полония.

Изотопы полония			
A	$T_{1/2}$	Тип распада	Радиоактивный ряд
190	2.53 мс	α , ЭЗ 0.1%	
191	22 мс	α	
192	33.2 мс	$\alpha \approx 99.5\%$, ЭЗ $\approx 0.5\%$	
194	0.392 с	α	
195	4.64 с	$\alpha 75\%$, ЭЗ 25%	
196	5.8 с	$\alpha \approx 98\%$, ЭЗ $\approx 2\%$	
197	1.4 м	ЭЗ 56%, $\alpha 44\%$	
198	1.87 м	$\alpha 57\%$, ЭЗ 43%	
199	4.58 м	ЭЗ 92.5%, $\alpha 7.5\%$	
200	10.9 м	ЭЗ 88.9%, $\alpha 11.1\%$	
201	15.3 м	ЭЗ 98.4%, $\alpha 1.6\%$	
202	44.7 м	ЭЗ 98.08%, $\alpha 1.92\%$	
203	36.7 м	ЭЗ 99.89%, $\alpha 0.11\%$	
204	3.53 ч	ЭЗ 99.34%, $\alpha 0.66\%$	
205	1.66 ч	ЭЗ 99.96%, $\alpha 0.04\%$	
206	8.8 д	ЭЗ 94.55%, $\alpha 5.45\%$	
207	5.80 ч	ЭЗ 99.98%, $\alpha 0.02\%$	
208	2.898 г	α , ЭЗ	
209	102 г	$\alpha 99.52\%$, ЭЗ 0.48%	
210	138.376 д	α	^{238}U
211	0.516 с	α	^{235}U
212	0.299 мкс	α	^{236}U
213	3.65 мкс	α	^{237}Np
214	164.3 мкс	α	^{238}U

215	1.781 мс	α, β^- 0.00023%	^{235}U
216	0.145 с	α	^{236}U
217	1.47 с	$\alpha > 95\%, \beta^- < 5\%$	^{237}Np
218	3.10 м	$\alpha 99.98\%, \beta^- 0.02\%$	^{238}U
219	2 м	$\alpha?, \beta^-?$	

Табл. 5. Ядерно-физические характеристики некоторых наиболее распространённых изотопов полония.

Радионуклид	$T_{1/2}$	Тип распада	Средняя энергия излучения, МэВ/Бк·с		Дочерий радионуклид (выход)
			характеристическое γ - и аннигиляционное излучение	β^- излучение, конверсионные электроны и электроны Оже	
^{203}Po	36,7 мин	$3\beta; \beta^+$	1,64	$1,60 \cdot 10^{-1}$	^{203}Bi радиоакт. (0,9989)
^{205}Po	1,8 ч	$3\beta; \beta^+; \alpha$	1,55	$5,75 \cdot 10^{-2}$	^{201}Pb радиоакт. ($1,40 \cdot 10^{-3}$) ^{205}Bi радиоакт. (0,999)
^{207}Po	350 мин	$3\beta; \beta^+$	1,32	$5,05 \cdot 10^{-2}$	^{207}Bi радиоакт.
^{210}Po	138,38 сут	α	$8,50 \cdot 10^{-6}$	$8,18 \cdot 10^{-8}$	^{206}Pb стаб.
^{211}Po	0,516 с	α	$7,79 \cdot 10^{-3}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$	^{207}Pb стаб.
^{212}Po	0,305 мкс	α	—	—	^{208}Pb стаб.
^{213}Po	4,2 мкс	α	—	—	^{209}Pb радиоакт.
^{214}Po	164,3 мкс	α	$8,83 \cdot 10^{-5}$	$8,19 \cdot 10^{-7}$	^{210}Pb радиоакт.
^{215}Po	0,001780 с	α	$1,76 \cdot 10^{-4}$	$6,30 \cdot 10^{-6}$	^{211}Pb радиоакт.
^{216}Po	0,15 с	α	$1,69 \cdot 10^{-5}$	$1,61 \cdot 10^{-7}$	^{212}Pb радиоакт.
^{218}Po	3,05 мин	$\beta^-; \alpha$	$9,12 \cdot 10^{-6}$	$1,42 \cdot 10^{-5}$	^{214}Pb радиоакт. (0,9998) ^{218}At радиоакт. ($2,0 \cdot 10^{-1}$)

3.2 Физические и химические свойства

Полоний - серебристый металл, светящийся в темноте, легкоплавкий и сравнительно низкокипящий; температуры его плавления и кипения соответственно 254 и 962 °С.

Сопоставление свойств полония со свойствами серы, селена и теллура, с одной стороны, и висмута, свинца и таллия — с другой, показывает, что металлический полоний по своим физическим свойствам скорее напоминает элементы, соседние по периоду (Bi), чем по группе (Te). Подавляющее большинство исследований химического поведения полония в растворах проводилось с микроколичествами ^{210}Po . Это обусловлено тем, что исследования с большими количествами этого элемента осложнены сильным авторадииолизом (массовая активность ^{210}Po составляет $1,7 \cdot 10^{14}$ Бк/г). Специфическим носителем при изучении поведения микроколичеств полония является теллур. Однако следует учитывать, что в наибольшей степени аналогия в химическом поведении этих двух элементов проявляется в случае ковалентных соединений (оксианионы, элементарорганические соединения и др.). Более основной характер полония по сравнению с теллуrom определяет некоторое различие в поведении их ионных форм. Особенно это сказывается в склонности полония к комплексообразованию с многими лигандами, для которых комплексообразование с теллуrom нехарактерно. В этом отношении полоний занимает промежуточное положение между теллуrom и висмутом, и часто отделить полоний от висмута труднее, чем от теллура.

Чистый полоний имеет две аллотропных модификации: низкотемпературная α -форма с кубической решеткой, и высокотемпературная β -форма с ромбической решёткой. Фазовый переход из одной формы в другую происходит при 36 °С. Интересно, что при комнатной температуре свежеприготовленный полоний находится в высокотемпературной форме. Его подогревает собственное излучение – выделение тепла происходит в самом образце при испускании полонием α -частиц. По внешнему виду полоний похож на любой самый обыкновенный металл. По легкоплавкости - на свинец и висмут. По электрохимическим свойствам - на благородные металлы. По оптическому и рентгеновскому спектрам - только на самого себя. А по поведению в растворах - на все другие радиоактивные элементы: благодаря ионизирующему излучению в растворах, содержащий полоний, постоянно образуются и разлагаются озон и перекись водорода.

Наиболее применимыми методами получения металлического полония являются термическое разложение сульфида полония в вакууме при 500—700° С или вакуумная возгонка с поверхности электродов из благородных металлов, на которые полоний выделяется электролизом.

Атомный диаметр полония 3,38А, атомный объём 22,1-22,5 (А)³, плотность 9,392 г/см³ (чуть меньше, чем у свинца), т.пл. 254°, т.кип. 962°, теплота парообразования 24,597 ккал/моль. Давление пара полония в интервале 438-745о определяется уравнением:

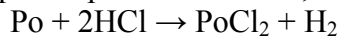
$$\lg p = \frac{-5377}{T} + 7,2345$$

Термический коэффициент линейного расширения 2,35*10⁻⁵. Удельное электросопротивление для α- и β-форм при 0°С соответственно равно (мкОм.см) 42 и 44.

По химическим свойствам полоний - прямой аналог серы, селена и теллура. Он проявляет валентности 2-, 2+, 4+, 6+, что естественно для элемента этой группы. Наиболее устойчивым из них является Po⁴⁺. Полоний хорошо адсорбируется на различных материалах, особенно на металлах. Обладает амфотерными свойствами. Образует коллоидальные гидроксиды или основные соли в щелочных, нейтральных или слабокислых растворах.

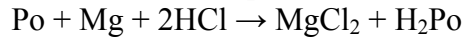
Элементарный полоний окисляется на воздухе. Известны диоксид полония (PoO₂)_x и монооксид полония PoO. С кислородом полоний быстро реагирует при нагревании, образуя при 250° двуокись PoO₂. В индикаторных количествах получены кислотный триоксид полония PoO₃ и соли полониевой кислоты, не существующей в свободном состоянии— полонаты K₂PoO₄. С галогенами при нагревании полоний даёт тетрагалогениды PoГ₄. С водородом и азотом не взаимодействует. При нагревании металлического полония с металлами образуются полониды, изоморфные с соответствующими теллуридами. Металлический полоний растворяется в азотной и соляной кислотах.

Металлический полоний медленно растворяется в 2n HCl, образуя раствор Po(II),

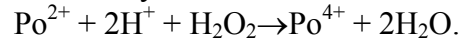


Катион Po²⁺ окрашен в розовый цвет. Он под действием собственного излучения окисляется и переходит в Po(IV).

При растворении полония в соляной кислоте в присутствии магния образуется полонород:



Процесс окисления сложен. Есть предположение, что полоний окисляется перекисью водорода, образующейся в растворах под действием α-излучения:

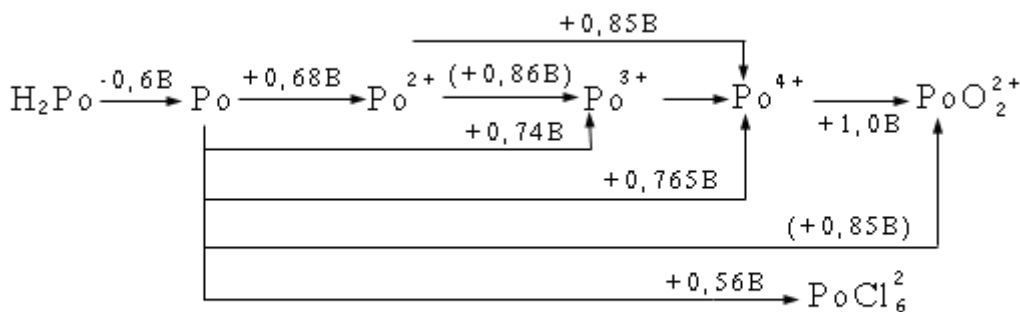


Металлический полоний легко растворяется в концентрированной (но не разбавленной) азотной кислоте с выделением оксидов азота.

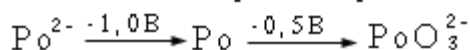
Известны следующие оксиды полония: PoO, PoO₂ и PoO₃. Из них наиболее устойчивым является PoO₂. Соответствующий этому оксиду гидроксид трудно растворим в воде и обладает амфотерными свойствами. При растворении PoO₂ в щелочах образуются полонаты: PoO(OH)₂ + 2KOH = K₂PoO₃ + 2H₂O а при растворении в минеральных и некоторых органических (например, уксусной, щавелевой и др.) кислотах — соответствующие соли полония (IV). Получены также галогениды полония (II) и (IV), растворимые в избытке галогеноводородных кислот. Соединения типа PoГ₄ образуются прямым синтезом из элементов, а соединения PoГ₂ — термическим разложением галогенидов Po(IV).

Согласно современным представлениям устойчивость полония в различных степенях окисления может быть представлена схематически:

в кислотных растворах:



в щелочных растворах:



Данная схема позволяет предсказать степень окисления полония в растворе при действии различных окислителей и восстановителей. Однако следует учитывать, что в растворах галогеноводородных кислот, уксусной, щавелевой и некоторых других органических кислот полоний образует прочные комплексные соединения.

в которых он находится в наиболее характерной степени окисления +4. Кроме того, для Po (IV) характерно образование устойчивых гидросокомплексов. В растворах других кислот, таких, как азотная,

серная, хлорная, для которых нехарактерно образование комплексов с полонием, имеет место диспропорционирование Po(IV) с образованием соединений двух- и шестивалентного полония.

В водных растворах в области pH > 1 все соли и комплексные соединения полония гидролизуются. При значениях pH 4,5 — 5 образуется гидроксид полония (IV), растворимый при pH 12. Склонность к гидролизу и комплексообразованию наряду с повышенной сорбируемостью гидролизных форм полония осложняет изучение химии этого элемента.

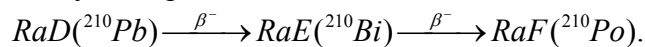
Валентность -2 проявляется в образовании H₂O и соответствующих полонидов. Валентное состояние +2 проявляется в образовании галогенных и некоторых других солей (например, сульфидов). Четырехвалентному состоянию полония отвечают двуокись PoO₂, галогениды PoX₄ и др. соли. Химические свойства PoO₂ аналогичны свойствам TeO₂. При взаимодействии PoO₂ с кислотами образуются соли Po(IV). Двуокись полония растворима в воде, соляной кислоте, ацетоне и некоторых др. кетонах. Гидроокись полония вероятной формулы PoO(OH)₂ получается при добавлении раствора NH₃ или NaOH к кислому раствору свежеполученных PoCl₄ или PoBr₄; трудно растворима в воде и растворах NaOH, легко растворяется в разбавленных кислотах.

Получено большое число комплексных соединений 4-валентного полония общей формулы Me[PoX₆], где Me-K, Rb-K, Rb, Cs, NH₄, X – галоген; гексахлорополониты цезия, рубидия, калия и аммония желтого цвета, изоморфны аналогичным солям Te. Известно большое число полоний-органических соединений типа R₂PoX₂, RPoX₃ и R₃PoX, где R – органический радикал. 4-валентный полоний даёт большое число комплексных соединений с органическими растворителями: ацетоном, изопропиловым эфиром, метилизобутилкетонем, трибутилфосфатом и др.

Подобно теллуру полоний образует элементарорганические соединения следующих типов: PoR₂, PoR₄, PoR₃X, PoR₂X₂ и PoRX₃, где R — алкил или арил, X — галоген. Впервые органические производные полония (II) и (IV) были получены В. Г. Хлопиным и его учениками методом специфических носителей. Большую роль в синтезе полонийорганических соединений сыграл также метод, основанный на процессах β-распада ²¹⁰Bi в составе различных органических соединений этого элемента (см. ч. IV).

3.3 Получение

Изотоп ²¹⁰Po может быть выделен из урановых руд как побочный продукт при добывании радия. Обычно ²¹⁰Po получают из долгоживущего радиоактивного изотопа свинца ²¹⁰Pb (T=23,3 года):



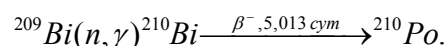
Выделяют полоний из солей радия и старых радоновых ампул экстракцией, ионным обменом, хроматографией или возгонкой. Сначала извлекают RaD, который и выдерживают для накопления полония. Часто для целей экстракционного выделения полония используется хорошая растворимость хелатных комплексов этого элемента в органических растворителях (например, соединения с ТТА, дитизоном).

Для разделения RaD и Po либо проводят анодное выделение полония на платине, либо осаждение PbS сероводородом, а также кристаллизацию бромидов из концентрированных растворов HBr. Извлечение может быть проведено экстракцией из солянокислой среды органическими растворителями (ацетилацетоном, трибутилфосфатом и др.). Часто для целей экстракционного выделения полония используется хорошая растворимость хелатных комплексов этого элемента в органических растворителях (например, соединения с ТТА, дитизоном).

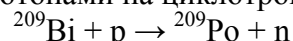
Металлический Po получают термическим разложением в вакууме сульфида PoS или диоксида (PoO₂)_x при 500 С.

Для выделения полония из больших количеств облученного висмута используются вакуумная сублимация, а также методы, основанные на процессах экстракции или соосаждения полония с носителями из расплавленного висмута. Процесс экстракции полония из расплавленного висмута при 400—500° С гидроксидом натрия в инертной атмосфере является технологическим способом извлечения его из облученного висмута. За две последовательные экстракции этим методом удастся извлечь 99,5% полония. Методы ионообменного отделения полония от других элементов, в частности от теллура, основаны на образовании устойчивых ацидокомплексов типа PoX²⁻₆. Для этой цели могут быть использованы как катиониты, так и аниониты.

На практике в граммовых количествах нуклид полония ²¹⁰Po синтезируют искусственно, облучая природный ²⁰⁹Bi нейтронами в ядерных реакторах. Получившийся ²¹⁰Bi за счет β-распада превращается в ²¹⁰Po:



²⁰⁹Po получают бомбардировкой висмута протонами на циклотроне по реакции:



Однако при этом образуется ²⁰⁹Pb (T=3,3 час) - одна из самых трудноудаляемых примесей к полонию.

Основным методом определения полония является радиометрический, основанный на регистрации α -излучения ^{210}Po . Массы полония более 1 мкг могут быть определены с помощью γ -счета (Π - $10^{-3}\%$ распада ^{210}Po , $E_\gamma = 0,803$ МэВ) или калориметрически (удельное тепловыделение ^{210}Po составляет около 140 Вт/г). Преимущества этих методов определения полония заключаются в том, что они не требуют разрушения образца.

3.4 Применение

Радиоактивные источники ^{210}Po используются как в научных исследованиях, так и в технике.

Во время работы над Манхэттенским проектом по созданию атомной бомбы (США) полоний-бериллиевый нейтронный источник предполагалось использовать в качестве запала атомной бомбы. Нейтроны в таком источнике получаются в результате взаимодействия альфа-частиц от распада ^{210}Po с бериллием, реакция $^9\text{Be}(\alpha, n)$. Однако в последствии от такого решения отказались.

Полоний применяют для изготовления компактных и очень мощных не обладающих γ -излучением источников нейтронов. Для этого его сплавляют с элементом, имеющим изотопы с высоким сечением (α, n)-реакции, например, с бериллием или бором. Это герметичные металлические ампулы, в которые заключена покрытая полонием-210 керамическая таблетка из карбида бора или карбида бериллия. Такие нейтронные источники легки и портативны, совершенно безопасны в работе и очень надежны. Например латунная ампула диаметром два и высотой четыре сантиметра ежесекундно дает до 90 миллионов нейтронов. Полоний-бериллиевые генераторы нейтронов используются в качестве источников энергии в космических исследованиях. Изотопные генераторы электроэнергии на ^{210}Po успешно применяли на спутниках связи «Космос-84» и «Космос-85».

Удельное энерговыделение полония велико – 140 Вт/г. Капсула содержащая 0.5 г полония нагревается до 500°C . (1 см^3 ^{210}Po выделяет 1320 Вт тепла). Эта мощность весьма велика, она легко приводит полоний в расплавленное состояние, поэтому его сплавляют, например, со свинцом. И хотя эти сплавы имеют заметно меньшую энергоплотность (150 Вт/см^3), тем не менее более удобны к применению и безопасны. Такие сплавы используются для создания в термоэлектрических источниках, которые в частности применяются в космических аппаратах. Например у советского лунохода для обогрева приборного отсека находился полониевый обогреватель.

Полоний также используется в устройствах для снятия статического электричества. В некоторых устройствах такого рода может содержаться полоний с активностью до 500 мкКи (около 0.1 микрограмм). Этого количества теоретически достаточно, чтобы убить 5000 человек.

Полоний-210 может послужить в сплаве с литием-6 веществом, которое способно существенно снизить критическую массу ядерного заряда и послужить своего рода ядерным детонатором. Поэтому полоний является стратегическим металлом, должен очень строго учитываться, и его хранение должно быть под контролем государства ввиду угрозы ядерного терроризма.

Полоний также применяется в электродных сплавах автомобильных свечей зажигания для уменьшения напряжения возникновения искры, а также для α -активационного анализа. Небольшие количества полония используют для изучения радиационно-химических процессов в жидкостях под действием α -излучения на живые организмы.

3.5 Санитарно-гигиенические аспекты

При работе с полонием приходится соблюдать особую осторожность - это один из самых опасных радиоэлементов. Хотя полоний-210 излучает только альфа-частицы, брать его руками нельзя, результатом будет лучевое поражение кожи и, возможно, всего организма: полоний довольно легко проникает внутрь сквозь кожные покровы. Элемент №84 опасен и на расстоянии, превышающим длину пробега альфа-частиц. Его соединения саморазогреваются, переходят в аэрозольное состояние и заражают воздух. Поэтому работают с полонием лишь в герметичных боксах.

Максимальная допустимая дозовая нагрузка на организм при попадании ^{210}Po внутрь всего 0.03 мкКи ($6.8 \cdot 10^{-12}$ г). При одинаковом весе ^{210}Po в $2.5 \cdot 10^{11}$ раз токсичнее, чем синильная кислота. Попав в организм человека, полоний через ток крови распространяется по тканям. Полоний выводится из организма в основном вместе с калом и мочой. Больше всего его выводится в первые несколько дней. За 50 дней выводится около половины попавшего в организм полония. Наличие полония у зараженных им людей идентифицируется по слабому гамма-излучению выделений. Попадание внутрь организма человека одной сотысячной миллиграмма полония в 50% случаев приводит к летальному исходу. Полоний весьма летучий металл, на воздухе за 45 часов 50% его испаряется при температуре 55°C .

Удельная активность ^{210}Po составляет 4,5 кюри/мг, что соответствует 10^{13} распадов/мин.мг, а максимальное количество ^{210}Po , допустимое для организма человека - 0,02 мккюри, т.е. работа с миллиграммовыми количествами полония опасна. В экспериментах с полонием необходимо учитывать также радиационные эффекты, происходящие под действием α -излучения: разложение растворителя, разрушение

частиц твёрдого осадка, увеличение хрупкости и разрушение стекла. Кроме того, при хранении образцов полония в запаянных ампулах в них происходит нарастание давления гелия (гелий, выделяемый источником полония в 1 кюри, оказывает давление на стенки капилляра объёмом $0,3 \text{ мм}^3$, равное $0,4 \text{ атм}$).

ПДК в водоемах и в воздухе рабочих помещений $11,1 \cdot 10^{-3} \text{ Бк/л}$ и $7,41 \cdot 10^{-3} \text{ Бк/м}^3$.

При работе с открытыми и жидкими препаратами полония существует реальная возможность выделения газообразных летучих продуктов. Особенно опасными для загрязнения окружающей среды являются различные операции, связанные с возгонкой металлического полония, а также с переработкой галогенидов и гидрида.

При работе электростанций, работающих на органическом топливе, например, угле и сланце, с летящей золой в атмосферу поступают естественные радионуклиды, в том числе полоний. Сланцевые и угольные электростанции равной мощности обуславливают эквивалентную дозу облучения легких у жителей окрестных районов в пределах $0,01—0,2 \text{ мЗв/год}$, что составляет не более нескольких процентов естественного фона. Основной вклад в дозу на легкие за счет выбросов электростанций вносит ^{210}Po , а естественное облучение в основном формируется за счет коротко-живущих продуктов распада ^{222}Rn .

В среднем за сутки в организм человека с пищей поступает $3,7 \cdot 10^{-2}—3,7 \cdot 10^{-1} \text{ Бк } ^{210}\text{Po}$. В регионах, где человек потребляет пищу морского происхождения, а также питается мясом северных оленей (карибу) наблюдается повышенное поступление ^{210}Po в организм: $2,2 - 11,1 \text{ Бк/сут}$. Курение увеличивает поступление ^{210}Po в организм человека, поскольку радионуклид переходит в воздушную среду при температуре сгорания табака. В сигарете содержится $7 (3 - 24) \text{ мБк } ^{210}\text{Po}$. Из этого количества при курении в пепле остается 3 мБк , а в табачный дым переходит 4 мБк . При этом в легких курильщика, выкуривающего $10—60$ сигарет в сутки, создаются концентрации ^{210}Po $1,66 \text{ мБк/г}$, что выше, чем у некурящих в $7—9$ раз, и соответствует дозам $0,027—0,04 \text{ мГр/год}$. Поступление ^{210}Po при курении в 10 раз выше, чем плутония, даже в период максимальных выпадений последнего.

В зубах и других костях жителей РФ содержание ^{210}Po составляет $1,9 \text{ Бк/кг}$. Клетки костной поверхности за счет ^{210}Po получают дозу $29 \cdot 10^{-6}$ в Гр/год, клетки костного мозга — $3,9 \cdot 10^{-6}$ в Гр/год. Общее содержание ^{210}Po в организме человека составляет $18,5 \text{ Бк}$, из них $11,8 \text{ Бк}$ в костях, $6,3 \text{ Бк}$ в мягких тканях. На долю пищевого поступления приходится $2,78 \text{ Бк}$, а 85% общего содержания ^{210}Po обусловлено распадом ^{210}Pb . У пастухов, питающихся мясом северных оленей, во всех тканях ^{210}Po содержится в 10 раз больше. Коэффициент всасывания ^{210}Po из ЖКТ при поступлении его в составе белков составляет $0,43$, с минеральными солями — $0,33$; наименьшая величина получена при поглощении ^{210}Po лишайниками — $0,125$. Величина всасывания из ЖКТ человека равна $0,2$.

Табл. 6. Средние тканевые дозы, обусловленные излучением ^{210}Po , при нормальном и повышенном поступлении радионуклида (в мГр/год).

Группа населения	Гонады	Легкие	Костный мозг	Костные клетки
<i>Регионы с нормальным поступлением</i>				
Некурящие	0,006	0,003	0,007	0,015
Курящие	0,009	0,009	0,009	0,022
<i>Регионы с повышенным поступлением</i>				
Питающиеся мясом северных оленей (карибу)	0,06	0,04	0,05	0,075

Основное количество полония фиксируется в поверхностном слое кожи толщиной 500 мкм . Депо этого излучателя в коже являются придатки, в частности волосяные фолликулы. Через кожные покровы человека за первые сутки всасывается 2% нанесенного полония. К исходу суточной экспозиции отложение ^{210}Po в организме резко возрастает и достигает $0,21\%$. При повреждении кожного покрова резорбция ^{210}Po усиливается. Всасывание ^{210}Po через ссадины увеличивается в 40 раз, из кожномышечных ран — в 750 раз по сравнению с резорбцией через неповрежденную кожу. Еще интенсивнее ^{210}Po всасывается из мышечной ткани (20% общего количества в течение первого часа). При ожоге I и II степени за 1 ч контакта радионуклида всасывается в 6 раз больше, чем за это же время через неповрежденную кожу, что обусловлено активной гиперемией участка ожога. При ожоге II степени поступление полония в организм увеличивается в 2 раза. При ожоге III степени поступление полония в организм резко снижается ($0,0015 \%$ нанесенного количества или 11% величины всасывания через интактную кожу).

Наибольшее количество ^{210}Po (на 1 г ткани) наблюдается в почках, крови и лимфатических узлах. Полоний элиминируется с калом в $10—20$ раз больше, чем с мочой. При поступлении с пищей ^{210}Po наибольшая экскреция с мочой наблюдается через 24 ч , с калом — через 3 сут . Из всего поступившего полония доли $0,1$; $0,1$; $0,1$ и $0,7$ переносятся в печень, почки, селезенку и все другие ткани соответственно. Из организма человека ^{210}Po выводится с $T_6 = 80 \text{ сут}$.

Коротко остановимся на токсическом действии полония. Для животных ^{210}Po - один из наиболее токсичных радионуклидов. При введении полония собакам в количестве $1,85—6,66 \text{ кБк/г}$ у животных

развивается острая лучевая болезнь с гибелью через 10 -25 сут. При введении полония в количестве 0,092 кБк/г развивается хроническое поражение, также приводящее к 100% гибели животных через 6—12 мес. При введении ^{210}Po в количествах, вызывающих острое или подострое течение лучевой болезни, состояние животных в первые дни (5—7 сут) не отличается от нормального. В дальнейшем они становятся вялыми, снижается аппетит, падает масса тела. Часто отмечаются поносы со слизью или примесью крови и рвота, появляется сильная жажда. У животных развиваются светобоязнь, конъюнктивит, ринит с кровавыми выделениями; на коже, слизистой оболочке рта и конъюнктиве глаз обнаруживаются точечные кровоизлияния; шерсть теряет блеск, становится взъерошенной. Собаки перестают ухаживать за собой. В финальной части заболевания собаки лежат неподвижно, не реагируют на раздражение, отказываются от пищи, теряют в массе до 30—40 % по отношению к исходной и погибают.

При хроническом (в течение 6 мес) введении собакам ^{210}Po в количестве $3,7 \cdot 10^{-5}$ кБк/г к концу 1 и 2 мес. отмечены небольшое снижение массы тела, кишечные расстройства, дистрофические нарушения. Введение ^{210}Po в количестве $3,7 \cdot 10^{-7}$ кБк/г не приводит к каким-либо выраженным клиническим нарушениям. К числу отдаленных последствий относят циррозы печени, нефросклерозы, дисгормональные нарушения, гиперплазия передней доли гипофиза, щитовидной железы, а также опухоли толстого кишечника, семенников, предстательной железы, надпочечников, подкожной клетчатки, гипофиза, щитовидной железы, молочных желез и матки. У животных с циррозами печени возникают аденомы и аденокарциномы печени, исходящие из эпителия ложных желчных путей. При подкожном введении собакам ^{210}Po в количестве 74 кБк/кг опухоли почек развиваются у 20% животных со средним латентным периодом 9,9 лет и кумулятивной дозе около 5,3 Гр. У 2 из 20 собак обнаружен рак мочевого пузыря. Риск развития рака почек у собак составляет $380 \cdot 10^{-6}$ сГр⁻¹. Поступление ^{210}Po через дыхательные пути обуславливает возникновение опухолей легких. Основной тип опухолей — плоскоклеточный рак (50 % случаев).

Гигиенические нормативы определяют правила работы с полонием. Для ^{210}Po группа радиационной опасности А, минимально значимая активность (МЗА) = $3,7 \cdot 10^3$ Бк.

Табл.7. Предельно допустимы концентрации ^{210}Po для категории А (Р -растворимое соединение, НР – нерастворимое соединение, ДСА - допустимое содержание радионуклида в критическом органе, ПДП - предел годового поступления радионуклида в организм, ДКА - допустимая концентрация радионуклида в воздухе рабочей зоны).

Радионуклид	Состояние радионуклида в соединении	Критический орган	ДСА, Бк	ПДП, Бк/год	ДКА, Бк/л
^{210}Po	Р	Селезенка	$4,1 \cdot 10^1$	$2,4 \cdot 10^4$	—
		Почки	$8,1 \cdot 10^1$	$2,2 \cdot 10^4$	—
		Кость	$7,4 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^5$	—
	НР	Легкие	$2,7 \cdot 10^2$	$0,9 \cdot 10^3$	$3,4 \cdot 10^{-3}$

При оценке влияния ^{210}Po на здоровье персонала основное внимание обращают на исследование наиболее чувствительных к действию полония органов, их функционального состояния, к числу которых относят прежде всего печень и почки. Обязательным является тщательное исследование крови. Накопление в организме ^{210}Po в количествах, превышающих допустимые, является основанием для выведения человека из условий, где он может подвергаться дополнительному воздействию радионуклида.

При работе с закрытыми источниками γ -излучения мощность дозы за защитой не должна быть выше 0,014 мЗв/ч. В этом случае при 36-часовой рабочей неделе и постоянном пребывании в помещении экспозиционная доза не превышает 0,5 ПДД, т. е. 0,025 Зв/год. На расстоянии 0,5 м такую мощность дозы создает источник ^{210}Po активностью 2590 ГБк. При работе с источниками ^{210}Po активностью меньше указанной можно не принимать мер по защите от γ -излучения. Источник ^{210}Po активностью 7,4 ГБк на расстоянии 0,5 м создает мощность дозы, равную среднему космическому фону $4,0 \cdot 10^{-8}$ Гр/ч. Удельная активность составляет $1,66 \cdot 10^5$ ГБк/г.

Неотложная помощь включает дезактивацию кожи водой с мылом, затем 5 % раствором унитиола или 5% раствором оксатиола, пастой-47. При попадании ^{210}Po на кожу или в рану в количествах, не поддающихся дезактивации, показано иссечение пораженных участков. Внутрь - противоядие от тяжелых металлов (antidotum metallorum — 50 мл). Питье молока, слизистые отвары, яичный белок.