

УДК 504.05:615.9:546.249

ПРИМЕР СИТУАЦИОННОГО РАДИОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА (ИНЦИДЕНТ С ПОЛОНИЕМ-210)

В.К. Власов, Т.Б. Петрова, А.М. Афиногенов

(кафедра радиохимии; e-mail: vlasov@radio.chem.msu.ru)

Обобщены данные о ядерно-физических, химических и радиобиологических свойствах полония-210, рассмотрены особенности поступления, транспорта и депонирования радионуклида в различных органах человека. Рассмотрено формирование дозы для α -излучения с использованием ОБЭ = 3 для детерминированных эффектов с позиций формальной дозиметрии инкорпорированных радионуклидов. Проведен радиологический анализ ситуации, связанной с отравлением полонием-210 в Лондоне. Оценена активность радионуклида при которой создается летальный эффект при одномоментном пероральном введении (от 0,012 до 0,36 ГБк), а также рассмотрена формальная возможность обнаружения носителя полония-210 по выделениям экскретов и по γ -излучению на счетчиках излучения человека (СИЧ).

В ночь с 23 на 24 ноября 2006 г. в клинике Университетского колледжа Лондона (UCN) скончался бывший офицер ФСБ А. Литвиненко, бежавший из России в Великобританию в 2000 г. [1]. Почти месяц Литвиненко находился в тяжелом состоянии, после того как был отравлен 1 ноября (по некоторым данным 16 октября) в одном из ресторанов Лондона [2]. Все это время врачи не могли определить токсины, вызвавшие отравление, однако не сомневались в том, что это было именно отравление [3].

24 ноября впервые (со ссылкой на “британских экспертов”) появилась информация о том, “что в организме погибшего обнаружены следы радиоактивного элемента, вероятнее всего полония-210” [1]. Вскоре “представителями Агентства здравоохранения Великобритании” было подтверждено, что радиоактивное воздействие – возможная причина смерти Литвиненко, в моче которого была обнаружена “значительная доза радиоактивных альфа-частиц” [4].

В дальнейшем последовал шквал публикаций, интервью и “экспертиз”, в которых спекуляции и здравые соображения оказались настолько перемешаны журналистами, что ставили в тупик даже специалистов. По нашему мнению, инцидент с отравлением нуждается в корректном рассмотрении, т.е. в проведении *ситуационного радиологического анализа*, который должен дать ответ на следующие вопросы:

- 1) какова активность полония-210, приводящая к летальному исходу при одномоментном введении;
- 2) какими могут быть варианты загрязнения полонием-210 разного рода объектов как в Лондоне, так и в других местах;

3) какие существуют методы получения полония-210, существует ли возможность его кустарного производства.

Основные ядерно-физические характеристики полония-210

Полоний-210 - первый радионуклид, выделенный Марией Кюри из урановой руды в 1898 г. В настоящее время известно 35 изотопов полония с массовыми числами от 192 до 218 и периодами полураспада от $2,98 \cdot 10^{-7}$ с до 102 лет. Большинство из них являются α -излучателями.

Известно 7 естественных изотопов полония в радиоактивных рядах ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th с периодами полураспада от $3 \cdot 10^{-7}$ с (^{212}Po) до 138,38 сут (^{210}Po). Природные изотопы Po содержатся во всех объектах живой и неживой природы в ничтожных количествах. Так, например, в условиях радиоактивного равновесия 1 г ^{238}U (активность $1,235 \cdot 10^4$ Бк) содержит $7,4 \cdot 10^{-11}$ г ^{210}Po . Удельная активность ^{210}Po , схема распада которого приведена на рис. 1, составляет $1,66 \cdot 10^{14}$ Бк/г.

Основные химические свойства полония

Полоний – элемент VI группы периодической системы. По химическим свойствам сходен со своим аналогом по группе периодической системы теллуром и отчасти с левым соседом – висмутом. В растворе полоний образует ионы PoO_4^{2-} , PoO_3^{2-} , Po^{4+} и Po^{2+} . Наиболее устойчивой является степень окисления +4. Полоний (IV) образует амфотерную гидроксид $\text{PoO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. В кислых растворах микро-

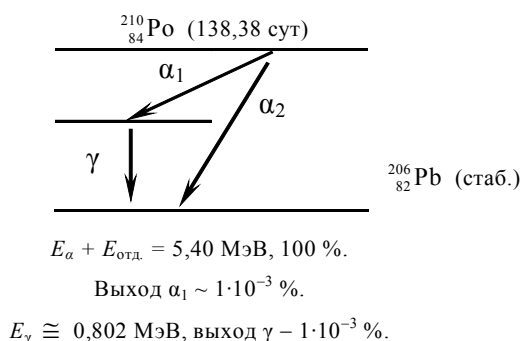


Рис. 1. Схема распада ^{210}Po

личества Po (IV) изоморфно сокристаллизуются с солями типа $\text{K}_2\text{Te}^{\text{IV}}\text{Cl}_6$ [5].

Формирование дозы от инкорпорированных радионуклидов

Поглощенная доза от ионизирующего излучения, создаваемая инкорпорированными радионуклидами, рассчитывается по переданной энергии ΔE в критических органах (КО):

$$D = \Delta E/m \text{ [Дж/кг], [Гр]},$$

где m – масса КО.

По определению Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) 1948 г. [6] критический орган имеет следующие признаки:

а) получает наибольшую дозу или депонирует наибольшее количество радионуклида из поступившего в организм;

б) играет наиболее важную роль в жизнедеятельности всего организма;

в) обладает наивысшей радиочувствительностью, т.е. повреждается относительно низкими дозами по сравнению с другими органами.

Даже при последовательной оценке по указанным пунктам одновременно несколько органов могут обладать этими признаками. Кроме того, с течением времени порядок критичности органов может меняться в результате транспорта радионуклидов из барьерного органа в депо. Например, нерастворимые (плохо растворимые) соединения стронция при попадании в организм ингаляционно сначала облучают преимущественно легкие, а с течением времени растворяются и депонируются костями.

При расчете все КО моделируются сферами различного эффективного радиуса ($R_{\text{эфф}}$), равномерно заполненных раствором радионуклида за-

данной удельной активности. Для различных излучателей принимаются различные варианты утечки излучения из КО для различных $R_{\text{эфф}}$.

Эквивалентная доза (H) применима только при равномерном хроническом облучении всего тела различными видами излучения на уровне доз, не превышающих предельно допустимый уровень за 50 лет облучения для профессионалов ($20 \cdot 10^{-3}$ Зв/год) и за 70 лет для всего населения ($1 \cdot 10^{-3}$ Зв/год):

$$H = D \cdot w_R \text{ [Зв]},$$

где w_R [Зв/Гр] – модифицирующий (взвешивающий) коэффициент для отдельных видов излучений (для β -, γ - и рентгеновского излучений $w_R = 1$, для α -излучения $w_R = 20$).

Понятие “эквивалентная доза” используется только лишь для оценки стохастических эффектов у людей (отдаленные соматические последствия, наследственные заболевания, сокращение продолжительности жизни), но не используется для оценки тяжести острых радиационных поражений (детерминированные эффекты).

Поглощенная доза D (Гр) не учитывает различную биологическую эффективность различных видов излучения при остром поражении. Для оценки этого вводится коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ) (при идентичных условиях облучения).

$$\text{ОБЭ} = \frac{\text{поглощенная доза контрольного (стандартного) излучения}}{\text{поглощенная доза рассматриваемого излучения}}$$

ОБЭ – многопараметрическая функция биологического объекта, биологического эффекта излучения, дозы и т.п. Например, инактивации 99% клеток по-

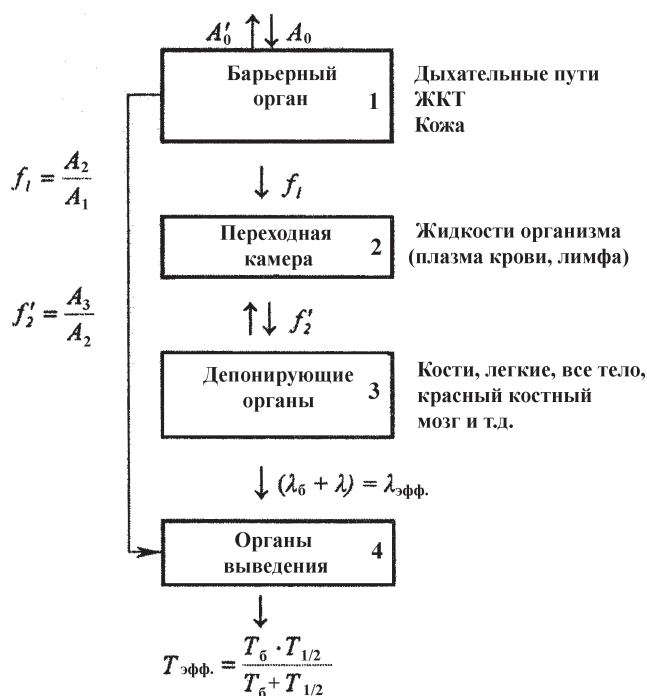


Рис. 2. Транспорт радионуклидов в организме
(коэффициенты f_1, f_2' даны по рекомендации МКРЗ [6])

чек человека в культуре при облучении α -излучением с $E_\alpha = 5$ МэВ соответствует ОБЭ $\cong 3$ [7].

Поступление и транспорт радионуклидов в организме

Поступление радионуклидов в организм человека может происходить разными путями:

- 1) ингаляционно (с вдыхаемым воздухом в виде радиоактивных аэрозолей, паров и газов различного химического состава и физических параметров);
- 2) перорально (с пищей и водой, содержащих радионуклиды в различном химическом состоянии);
- 2) перкутанно (через неповрежденную кожу при ее загрязнении);
- 3) внутривенно, внутримышечно, подкожно.

В организме с радионуклидами происходят следующие процессы (рис. 2):

- 1) поступление в барьерный орган (легкие, ЖКТ, кожа) радионуклида активностью A_0 , выведение в момент поступления A_1 , депонирование в барьерном органе A_1 ;
- 2) перевод радионуклида из барьерного органа в плазму крови и лимфу (переходная камера) с коэффициентом всасывания

$$f_1 = A_2 \text{ (кровь и лимфа)} / A_1 \text{ (барьерный орган)};$$

3) депонирование радионуклида в тех или иных органах с коэффициентом

$$f_2 = A_3 \text{ (орган)} / A_2 \text{ (кровь и лимфа)}$$

(кости, печень, почки, щитовидная железа и т.д.);

4) выведение радионуклида из организма в результате биологического выведения (λ_b) и физического распада (λ). Так как эти процессы независимы, то вводится понятия эффективной скорости выведения ($\lambda_{эфф.}$) и эффективного периода полувыведения радионуклида из органа (или из организма):

$$\lambda_{эфф.} = \lambda_b + \lambda, \text{ сут}^{-1}$$

и

$$T_{эфф.} = \frac{T_b \cdot T_{1/2}}{T_b + T_{1/2}}, \text{ сут.}$$

Выведение радионуклида происходит в виде:

- 1) аэрозолей, газов, паров (с выдыхаемым воздухом);
- 2) растворимых соединений (с мочой, калом, потом, с поверхности кожи);
- 3) нерастворимых соединений (с калом, с поверхности кожи).

При любых вариантах поступления радионуклида в организм происходит перераспределение радионуклида по органам и тканям с различными константами скорости переноса (k_i) и с различными коэффициентами депонирования ($f_{2,i}$). Облучение при этом затрагивает все тело (все органы и ткани), но в различной степени. Поэтому радиобиологические эффекты не могут быть однозначно связаны с поступившей в организм активностью радионуклида, а можно лишь дать оценку вариации исследуемых параметров. Дополнительную неопределенность вносят физические и химические характеристики радионуклида, а также взаимодействие этих физических и химических форм с внутренней средой организма.

Радиобиологические свойства полония-210

Общее содержание ^{210}Po в организме человека составляет 18,5 Бк (из них 11,8 Бк в костях и 6,3 Бк в мягких тканях), что соответствует фоновым значениям для стандартного человека. В сутки с пищей и водой поступает от 0,037 до 0,37 Бк ^{210}Po .

Коэффициент всасывания из ЖКТ в зависимости от формы нахождения ^{210}Po в растворе варьирует весьма широко (от 0,06 до 0,43) [6, 8]. В настоящее время принято среднее значение $f_2' = 0,2$.

Распределение в организме при пероральном поступлении при $f_1 = 0,2$:

$$f'_2 = 0,1 \text{ печень } (m = 1,7 \text{ кг}),$$

$$f'_2 = 0,1 \text{ почки } (m = 0,3 \text{ кг}),$$

$$f'_2 = 0,1 \text{ селезенка } (m = 0,15 \text{ кг}),$$

$$\Sigma f_{2,i} = 0,7 \text{ сумма остальных органов.}$$

Исследования острого токсического воздействия и отдаленных последствий, связанных с поступлением ^{210}Po , показали следующее.

При ингаляции 17% ^{210}Po депонируется в легких, и основной причиной гибели животных являются радиационные пневмонии.

При подкожном введении собакам 1,85–6,66 кБк/г у животных развивается острая лучевая болезнь с гибелью через 10–30 сут. Для собак абсолютно летальные концентрации ^{210}Po – от 0,74 до 1,11 кБк/г, т.е. летальная удельная активность ^{210}Po составляет $1 \cdot 10^6$ Бк/кг для собак. В отдаленные периоды после поступления ^{210}Po у животных наблюдаются опухолевые и неопухолевые формы лучевой патологии (циррозы печени, нефросклерозы, опухоли различных органов) [8].

В монографии А.К. Гуськовой ^{210}Po назван “высокотоксичным и быстродействующим нуклидом” [9] и отмечено, что работа с ним требует особых мер защиты. В период экспериментов с “нейтронными запалами” (конец 1940-х – начало 1950-х гг.) имели место несколько несчастных случаев. Незначительные отклонения в состоянии здоровья возникали при поступлении в организм (через органы дыхания, кожу и ЖКТ) около 1 МБк ^{210}Po , явная клиническая картина регистрировалась при ~ 2 МБк. “До 80% дозы формировалось в первые 3 месяца”, что объясняет подострый характер развития болезни у пострадавших. “Поражались слизистые оболочки, печень, почки, реже и в меньшие степени легкие и кроветворение” [9].

Описан случай, когда неустановленное количество ^{210}Po попало в кровь сотрудника в результате травмы кисти руки при работе с микроманипулятором, загрязненным раствором полония-210. В первые 3 дня у пострадавшего возникла местная реакция в зоне травмы. “На 2–3 месяце были отмечены умеренные изменения крови, <...> нараставшие к исходу 3-го месяца, и нерезкие изменения функции почек. Пациент умер через 8 месяцев от необра-

тимого поражения печени и токсического нефроза” [9].

Другой пострадавший скончался “на 13-й день после ингаляционного поступления около 3 мКи (0,1 ГБк. – прим. авт.) аэрозолей полония. <...> Содержание нуклида было в 10 раз большим в почках по сравнению с легкими и печенью” [9].

В любом случае при расчете необходимо учитывать характер радиационного воздействия:

1) для области существования эквивалентных доз (хроническое облучение в допустимых дозах) коэффициент $w_R = 20$ для α -излучателей;

2) для острого одномоментного поражения α -излучателями коэффициент ОБЭ < 20 и расчет ведется для поглощенной дозы.

При одномоментном поступлении ^{210}Po в барьерный орган (например, ЖКТ) будут наблюдаться несколько процессов одновременно:

1) поступление ^{210}Po в ЖКТ, смешивание с пищей, движение по ЖКТ, сопровождаемое облучением стенок кишечника, и, наконец, выведение из организма 90% поступившего радионуклида в течение 24–40 ч с фекальными массами;

2) переход в кровь и межклеточные жидкости организма (f_1), поглощение ^{210}Po в различных органах в результате обменных и сорбционных процессов (например, 10% поступившего в кровь радионуклида депонируется в почках). Эти процессы происходят достаточно быстро (минуты, часы), и содержание ^{210}Po достигает максимального значения ($A_{i, \text{ макс}}$) в КО с последующим падением активности за счет процессов выведения.

Мощность дозы в КО с момента t , в который достигнута $A_{i, \text{ макс}}$, описывается уравнением:

$$P_\alpha = \frac{A \cdot f_1 \cdot f'_2 \cdot \Delta E_\alpha \cdot \text{ОБЭ}}{m} \cdot e^{-\lambda_{\text{эфф}} \cdot t}, \quad (1)$$

где A – начальная введенная в барьерный орган активность, Бк; $f_1 = 0,1$ – коэффициент всасывания; $f'_2 = 0,1$ – коэффициент депонирования; ΔE_α – переданная энергия α -излучения, Мэв/с·Бк; ОБЭ = 3 – для острого облучения клеток почки в культуре (см. выше) [7]; m – масса КО, кг.

Доза, накопленная за время с t_1 по t_2 , выражена интегралом уравнения (1), так как $dD/dt = P$:

$$D(\alpha) = \int_0^{t_2} P(t) dt = \int_0^{t_2} P_0(\alpha) e^{-\lambda t} dt = \frac{P_0(\alpha)}{\lambda_{\text{эфф}}} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{\text{эфф}} \cdot t_2}\right) [\text{Гр}],$$

Т а б л и ц а 1

Критический орган	$T_{эфф.}$ сут	Масса, кг	Мощность дозы, Гр/с·Бк
Все тело	25	70	$3,7 \cdot 10^{-14}$
Печень	32	1,7	$1,5 \cdot 10^{-12}$
Селезенка	42	0,15	$1,7 \cdot 10^{-11}$
Почки	46	0,3	$8,7 \cdot 10^{-12}$

где $P_0(\alpha) = (A \cdot f_1 \cdot f_2' \cdot \Delta E_\alpha \text{ ОБЭ})/m$ [Гр/с·Бк] и $A_{i, \text{ макс}} = A \cdot f_1 \cdot f_2'$.

Рассчитаем удельную мощность дозы в различных критических органах при поступлении в них 1 Бк ^{210}Po по формуле:

$$\Delta P_i = \frac{\Delta E \left[\frac{\text{МэВ}}{\text{с} \cdot \text{Бк}} \right] \cdot K \left[\frac{\text{Дж}}{\text{МэВ}} \right] \cdot \text{ОБЭ}}{m \text{ [кг]}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{с} \cdot \text{Бк}} \right] \rightarrow \left[\frac{\text{Гр}}{\text{с} \cdot \text{Бк}} \right],$$

где K – коэффициент перевода ($1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$); ОБЭ = 3 (табл. 1).

Как уже отмечалось, радиационная чувствительность разных органов неодинакова. В описываемом инциденте при одновременном воздействии инкорпорированного радионуклида на все органы организма имеет смысл отнести радиационное воздействие на весь организм.

Радиология Лондонского отравления

Оценим активность ^{210}Po , необходимого для получения летального исхода за 20 сут при нижеперечисленных условиях.

1. Критический орган – весь организм; $T_{эфф.} = 25$ сут; $\lambda_{эфф.} = 0,0277 \text{ сут}^{-1} = 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$.

Дозовый коэффициент для указанного срока гибели определяется уравнением:

$$\Delta D = \frac{\Delta P_i}{\lambda_{эфф.}} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{эфф.} \cdot t}\right) = \frac{3,7 \cdot 10^{-14}}{3,2 \cdot 10^{-7}} \cdot \left(1 - e^{-0,0277 \cdot 20}\right) \rightarrow$$

$$\rightarrow 4,9 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Гр/Бк} \quad (\sum f_{2,i}' = 1).$$

2. Критические органы – печень, почки. $\lambda_{эфф.}$ (печень) = $0,0216 \text{ сут}^{-1} = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$; $\lambda_{эфф.}$ (почки) = $0,0151 \text{ сут}^{-1} = 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$.

Дозовый коэффициент:

$$\Delta D = \frac{\Delta P_i (\text{печень})}{\lambda_{эфф.} (\text{печень})} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{эфф.} (\text{печень}) \cdot t}\right) +$$

$$+ \frac{\Delta P_i (\text{почки})}{\lambda_{эфф.} (\text{почки})} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{эфф.} (\text{почки}) \cdot t}\right) =$$

$$= \frac{1,5 \cdot 10^{-12}}{2,5 \cdot 10^{-7}} \cdot \left(1 - e^{-0,0216 \cdot 20}\right) +$$

$$+ \frac{8,7 \cdot 10^{-12}}{1,7 \cdot 10^{-7}} \cdot \left(1 - e^{-0,0151 \cdot 20}\right) \rightarrow$$

$$\rightarrow 2,1 \cdot 10^{-6} + 1,3 \cdot 10^{-5} \rightarrow 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ Гр/Бк}.$$

Полученные значения дозовых коэффициентов для случая острого поражения с летальным исходом за 20 сут используем для оценки активности ^{210}Po , введенного в организм.

Дозовый критерий поражения человека зависит от неравномерности облучения органов и тканей, мощности дозы в органах и тканях, времени облучения, вида и спектра ионизирующего излучения, способа облучения (внешнее или внутреннее). Это означает, что при сугубо неравномерном облучении, таком, как в нашем случае, оценка весьма затруднена. Сошлемся на мнение С.П. Ярмоненко [10]: “Если доза облучения основной массы тканей тела достигает 5–6 Гр, то выживание невозможно, несмотря на медицинский уход и самую совершенную терапию. При дозах 2,0–4,5 Гр выживание возможно” (но необязательно. – прим. авт.).

Воспользуемся статистическими данными работы [7], где приведены вероятности летального исхода при равномерном внешнем γ -облучении, что не противоречит вышеприведенным значениям:

Вероятность гибели, %	Доза, Гр
10	$LD_{10} = 2,2$
50	$LD_{50} = 2,86$
90	$LD_{90} = 3,52$

В случае $LD_{90} = 3,52 \text{ Гр}$ для различных вариантов распределения ^{210}Po получим:

1) равномерное распределение ^{210}Po в жидкостях организма, в тканях и органах, например, при введении в кровь, внутримышечно или подкожно:

$$A = \frac{LD_{90}}{\Delta D} = \frac{3,52}{4,9 \cdot 10^{-8}} \cong 7,2 \cdot 10^7 \text{ Бк} = 0,072 \text{ ГБк};$$

2) пероральное введение с последующим равномерным распределением по органам и тканям ($f_2' = 0,2$):

$$A = \frac{LD_{90}}{\Delta D \cdot f_2'} = \frac{3,52}{4,9 \cdot 10^{-8} \cdot 0,2} \cong 3,6 \cdot 10^8 \text{ Бк} \cong 0,36 \text{ ГБк};$$

3) пероральное введение с последующим преимущественным поражением печени и почек ($f_2' \cdot f_{2,i}' = 0,2 \cdot 0,1 = 0,02$):

$$A = \frac{LD_{90}}{\Delta D \cdot f_2' \cdot f_{2,i}'} = \frac{3,52}{1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,02} \cong 1,2 \cdot 10^7 \text{ Бк} \cong 0,012 \text{ ГБк}.$$

В монографии [11] отмечено, что при локальном облучении обеих почек в течение 5 недель дозой 2800 Р (~22 Гр) летальный исход может быть вызван хроническим необратимым нефритом.

Для $D = 22$ Гр [11] получим:

$$A = \frac{D}{\Delta D \cdot f_2' \cdot f_{2,i}'} = \frac{22}{1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,02} \cong 7,3 \cdot 10^7 \text{ Бк} \cong 0,073 \text{ ГБк}.$$

Таким образом, для разных коэффициентов усвоения радионуклида полоний-210 введенная летальная активность лежит в пределах от 0,012 до 0,36 ГБк, что согласуется с приведенными выше литературными данными [9].

Возможность воздействия на окружающую среду

Загрязнение полонием-210 объектов внешней среды могло происходить как при транспортировке радионуклида и различных манипуляциях с ним, так и за счет выделений (пот, моча, слюна, кал) основным носителем радиоактивности.

Недостаток данных позволяет оценить поступление ^{210}Po только по второму пути.

Оценим, например, удельную активность жидкостей организма ($m = 43$ кг для стандартного человека). Для максимальной введенной активности получим:

$$\Delta A_{\text{ж}} = \frac{0,36 \text{ [ГБк]}}{43 \cdot 10^3 \text{ [мл]}} = 8,4 \cdot 10^3 \text{ Бк/мл}.$$

Такой уровень удельной активности жидкостей организма вполне достаточен для оставления измеримых следов α -излучателя (радиоактивные загрязнения объектов).

Например для выделения объемом $v = 0,1$ мл с площадью загрязнения $S = 100 \text{ см}^2$ получим выход α -частиц в верхнюю полусферу:

$$A_S = \Delta A_{\text{ж}} (v/S) \cong 8 \text{ Бк/см}^2 \rightarrow 4 \alpha\text{-част./см}^2 \cdot \text{с} \rightarrow 240 \alpha\text{-част./см}^2 \cdot \text{мин},$$

что существенно выше допустимых уровней (ДУ) загрязнения (ДУ(α) = 2–20 α -част./см²·мин).

Внешнее γ -излучение, создаваемое носителем полония-210

Как уже отмечалось, ^{210}Po является слабым γ -излучателем с $E_{\gamma} \cong 0,8$ МэВ (выход $1 \cdot 10^{-3}$ %) при $K_{\gamma} = 5,35 \cdot 10^{-5} \text{ Р} \cdot \text{см}^2/(\text{ч} \cdot \text{мКи})$ [12].

Оценим мощность дозы, создаваемую γ -излучением ^{210}Po активностью 0,36 ГБк (9,7 мКи), для следующих вариантов.

1. Вся активность локализована в одной точке (точечный источник). Тогда мощность дозы на расстоянии $R = 10$ см равна:

$$P_{\gamma} = \frac{A \cdot K_{\gamma}}{R^2} = \frac{9,7 \cdot 5,35 \cdot 10^{-5}}{100} = 5,2 \cdot 10^{-6} \text{ Р/ч} = 5,2 \text{ мкР/ч}.$$

2. Активность равномерно распределена по всему телу (модель – сфера радиусом 30 см, заполненная раствором ^{210}Po [6, 13]). Тогда для точки на поверхности сферы можно записать:

$$P_{\gamma} = \frac{2\pi \cdot A \cdot K_{\gamma}}{\mu \cdot v} \cdot \left[1 - \frac{1}{2 \cdot \mu \cdot R} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \mu \cdot R}) \right]. \quad (2)$$

Для $\mu = 0,078 \text{ см}^{-1}$ (коэффициент ослабления γ -излучения с энергией 0,8 МэВ в воде) и $v = 1 \cdot 10^5 \text{ см}^3$ (объем сферы для $R = 30$ см) получим:

$$P_{\gamma} = \frac{2\pi \cdot 9,7 \cdot 5,35 \cdot 10^{-5}}{0,078 \cdot 1 \cdot 10^5} \cdot \left[1 - \frac{1}{2 \cdot 0,078 \cdot 30} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 0,078 \cdot 30}) \right] = 0,3 \text{ мкР/ч}.$$

3. Активность ^{210}Po локализована в почках с $f_2' = 0,1$ ($A = 9,7 \cdot 0,1$). Приняв, что $R = 7$ см ($v = 300 \text{ см}^3$), рассчитаем по уравнению (2):

$$P_{\gamma} = 5,5 \text{ мкР/ч}.$$

Приведенные расчеты показывают, что γ -излучение ^{210}Po в организме может быть зарегистрировано только при условии локализации радионуклида во внутренних органах с помощью специальных счетчиков излучения человека (СИЧ) (но не с помощью

широко распространенных стандартных радиометров). В целом, наличие полония-210 в организме может быть определено по результатам α -спектрометрического анализа экскретов, крови и тканей организма.

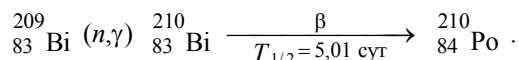
Очевидно, особенности схемы распада ^{210}Po сильно затруднили постановку диагноза, но решение именно этой нетривиальной задачи вывело из тупика следственные органы.

Методы получения полония-210

^{210}Po может быть химически выделен из урановой руды. По расчету в условиях радиоактивного равновесия во всем ряду ^{238}U 1 кг 30%-й урановой руды имеет активность $3,7 \cdot 10^6$ Бк по каждому члену ряда. Однако в реальных условиях активность ^{210}Po будет меньше из-за смещения равновесия за счет утечки ^{222}Rn . В монографии [14] отмечено, что 1 т урановой смоляной руды содержит 0,1 мг ^{210}Po , что соответствует активности $1,66 \cdot 10^7$ Бк/кг.

^{210}Po может быть выделен также при радиоактивном распаде предшественников в ряду ^{238}U , например, ^{222}Rn , однако выход ^{210}Po составляет $1,3 \cdot 10^{-2}$ % от исходной активности ^{222}Rn .

В промышленности ^{210}Po получают в ядерных реакторах по (n, γ)-реакции из $^{209}_{83}\text{Bi}$



Сечение этой реакции $\sigma = 0,014$ барн. Для $\Phi = 1 \cdot 10^{14}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ и времени облучения $t = 1$ год получим на 1 г ^{209}Bi :

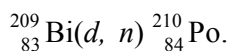
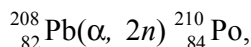
$$N(^{210}\text{Po}) = \Phi \cdot \sigma \cdot N(^{209}\text{Bi}) \cdot (1/\lambda)(1 - e^{-\lambda t}) = 5,84 \cdot 10^{16} \text{ ядер/г}$$

и

$$A(^{210}\text{Po}) = N \cdot \lambda = 3,4 \cdot 10^9 \text{ Бк/г.}$$

Полученный результат согласуется с данными монографии [15].

Возможно получение ^{210}Po и на ускорителях по реакциям:



Авторы выражают глубокую признательность И.Э. Власовой за помощь в подготовке доклада на основе материалов этой статьи.

Во всех случаях за счет побочных реакций ^{210}Po получается с примесью других радионуклидов. В технике ^{210}Po используется в радионуклидных источниках тепла (активностью 10^6 – 10^8 Бк) и нейтронных Po–Be- и Po–В-источниках (активностью $2 \cdot 10^{10}$ – $1 \cdot 10^{13}$ Бк).

Оригинальную технологию получения ^{210}Po , используемого в ядерных боеприпасах и закрытых источниках ионизирующего излучения, разработали в 1948 г. во ВНИИ неорганических материалов под руководством З.В. Ершовой [16].

Выводы

1. Активность полония-210, создающая летальный эффект, лежит в пределах от 0,012 до 0,36 ГБк при одномоментном пероральном введении. Другие способы введения могут снизить уровень летальной активности на порядок.

2. Загрязненность различных объектов полонием-210 возможна за счет выделений экскретов основным носителем радиоактивности, а также может быть связана с неквалифицированным обращением с радионуклидом при транспортировке и других действиях.

3. Полоний-210 может быть произведен лишь в нескольких странах с развитым научно-техническим потенциалом в ядерной и радиохимической областях, а получение “на кухне” полностью исключается. Связанное с производством наличие примесей других радионуклидов может служить меткой для поиска производителя.

После проведения расчетов авторы продолжали следить за сообщениями средств массовой информации в надежде на появление каких-либо количественных оценок, подтверждающих (или опровергающих) полученные результаты.

27 января 2007 г., со ссылкой на показанный по британскому телевидению документальный фильм, было сообщено следующее: “Следы полония говорят о том, что радиоактивный элемент был подмешан ему [А. Литвиненко. – Прим. авт.] в чашку, причем доза была громадной – 4 миллиарда беккерелей... [т.е. 4 ГБк. – Прим. авт.]” [17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. NEWSru.com, 24 ноября 2006 г. (<http://newsru.com/world/24nov2006/litvinenko.html>)
2. NEWSru.com, 22 января 2007 г. <http://newsru.com/world/22jan2007/litvinenko.html>
3. NEWSru.com, 13 ноября 2006 г. (<http://newsru.com/world/13nov2006/litvintnko.html>)
4. NEWSru.com, 24 ноября 2006 г. (<http://newsru.com/world/24nov2006/polonii.html>)
5. Несмеянов А.Н. Радиохимия. М., 1972. С. 366.
6. Радиационная защита. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите (вторая публикация). Отчет Комитета II о допустимых дозах внутреннего облучения. (1959 г.). М., 1961.
7. Гозенбук В.Л., Кеурим-Маркус И.Б. Дозиметрические критерии тяжести острого облучения человека. М., 1988.
8. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества. Справочник. Л., 1990. С. 309.
9. Гуськова А.К. Атомная отрасль страны глазами врача. М., 2004.
10. Ярмоненко С.П. Радиобиология человека и животных. М., 1988. С. 185.
11. Тюбиана М., Дютрекс Ж., Дютрекс А., Жоке П. Физические основы лучевой терапии и радиобиологии. М., 1969. С.558.
12. Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. М., 1982.
13. Кимель Л.Р., Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. М., 1972.
14. Бэгнал К. Химия редких радиоактивных элементов. Полоний - актиний. М., 1960.
15. Круглов А.К., Рудик А.П. Реакторное производство радиоактивных нуклидов. М., 1985.
16. Признанный лидер. К столетию со дня рождения Зинаиды Васильевны Ершовой. (<http://www.minatom.ru/News/Main/viewPrintVersion?id=6091&idChannel=170>)
17. NEWSru.com, 27 января 2007 г. (<http://newsru.com/world/27jan2007/yad.html>)

Поступила в редакцию 19.04.07

THE EXAMPLE OF THE SITUATIONAL RADIOLOGICAL ANALYSIS (INCIDENT WITH POLONIUM-210)

V.K. Vlasov, T.B. Petrova, A.M. Afinogenov

(Division of Radiochemistry)

In the paper the data about nuclear, physical, chemical and radiobiological properties of polonium - 210 are summarized, the features of incorporation, transport and deposition of a radionuclide in different human organs are reviewed. The formation of a dose of α -radiation using RBE=3 for the determined effects from the position of formal dosimetry of incorporated radionuclides is reviewed. The radiological analysis of a situation concerning the poisoning with polonium - 210 in London is conducted. The radioactivity of a radionuclide for creation of lethal effect - from 0.012 till 0.36 GBq is estimated at the uniinstantly peroral introducing, and also the formal capability of detection of the person - carrier of polonium - 210 according to the excreta and γ -radiation using whole-body counters is reviewed.