

"DETERMINATION OF THE CONTENT AND KINETICS OF THE
BEHAVIOUR OF SOME RADIONUCLIDES IN THE BODY OF
MAN BY THE IN VIVO TECHNIQUE"

A.D. Turkin, V.P. Stolyarov, Yu.Ja. Sokolov

The Institute of Biophysics Ministry of Health USSR
Moscow, USSR

Abstract

The regularities in accumulation, distribution and elimination of krypton-85, xenon-133 and iodine-131 from the body of man have been studied on volunteers. It is shown that intake of the inert radioactive gasses and gaseous iodine into the human body is primarily through the respiratory organs. The intact skin is of little importance in this process.

Были исследованы закономерности накопления, распределения и выведения из организма человека криптона-85, ксенона-133 и йода-131. [1]

Эксперименты проводились с привлечением добровольцев-мужчин в возрасте от 27 до 50 лет. Время контакта с криптоном-85 и ксеноном-133 составляло от 0,5 до 66 часов. Концентрация этих радиоактивных изотопов в герметичной камере объемом 3,1 м³ составляла $5 \cdot 10^{-8} + 10^{-6}$ кюри/л в зависимости от цели эксперимента. Экспериментальные исследования показали, что накопление и выведение криптона-85 и ксенона-133 из отдельных органов и тканей человека достаточно точно подчиняется экспоненциальному закону.

Следовательно, для расчета дозы при внутреннем облучении радиоактивными изотопами инертных газов можно использовать уравнение (I)

$$D = 0,59 \cdot E \cdot q \cdot Q \cdot R \cdot \frac{T^P}{T^P + T_{\text{эк}}^{\sigma}} \left\{ t_{\text{эк}} - \right. \\ \left. - \left[1 - \exp - \frac{0,693(T^P + T_{\text{эк}}^{\sigma})}{T^P + T_{\text{эк}}^{\sigma}} \cdot t_{\text{эк}} \right] \left[\frac{T^P \cdot T_{\text{эк}}^{\sigma}}{0,693(T^P + T_{\text{эк}}^{\sigma})} - \frac{T^P \cdot T^{\sigma}}{0,693(T^P + T^{\sigma})} \right. \right. \\ \left. \left. \cdot \left(1 - \exp - \frac{0,693(T^P + T_{\text{эк}}^{\sigma})}{T^P + T^{\sigma}} \cdot t \right) \right] \right\} \dots \dots \dots (1)$$

где: D - доза облучения, рады;
 E - энергия излучения, Мэв;
 q - фактор, учитывающий поглощение излучения;
 Q - концентрация нуклида в воздухе, кюри/л;
 R - коэффициент распределения нуклида в органе или ткани, л/кг;
 $t_{\text{эк}}$ - время экспозиции в атмосфере нуклида;
 t - время после экспозиции;
 T^P - физический период полураспада нуклида;
 $T_{\text{эк}}^{\sigma}$ и T^{σ} - биологические периоды полувыведения соответственно при экспозиции и после экспозиции.

Параметры, характеризующие накопление, распределение и выведение криптона и ксенона из организма человека, которые входят в уравнение (I), приведены в таблице I.

Обращает на себя внимание тот факт, что скорость накопления инертных газов в организме человека превышает скорость их выведения. Это явление особенно четко прослеживается на криптоне-85, накопление которого в жировой ткани людей заканчивается практически через 4-5 часов, а выведение через 8-9 часов. Более высокие темпы накопления инертных газов в организме по сравнению с темпами выведения, по-видимому, можно объяснить неодинаковым перепадом концентраций инертных газов в крови и в насыщаемых тканях. В процессе поступления инертного газа в организм этот перепад концентраций всегда больше, чем при выведении. Объясняется это тем, что в начале контакта концентрация газа в насыщаемой ткани близка к нулю, тогда как в крови она достигает равновесного значения через несколько минут, вследствие интенсивного газового обмена в легких. В процессе же выведения, после того, как в насыщаемых тканях накопился газ, перепад между концентрациями будет незначительным из-за непрерывного перехода газа из ткани в кровь.

В таблице 2 приведены результаты расчетов по формуле (I) тканевых доз в теле человека при внутреннем облучении радиоактивными изотопами инертных газов. Было принято, что $q = 1$.

Таблица 1

Параметры, характеризующие накопление, распределение и выведение изотопа криптона и ксенона из организма человека

Органы и ткани	Изотопы криптона			Изотопы ксенона		
	$R_{д/кг}$	$T_{эк}^{\sigma}$	T^{σ}	$R_{д/кг}$	$T_{эк}^{\sigma}$	T^{σ}
Жировая ткань	0,46	1,4 часа	2,7 часа	1,4	5 часов	6,3 часа
Мышцы и другие ткани	0,047	8 мин	8 мин	0,13	0,4 часа	0,7 часа
Кровь	0,046	30 сек	30 сек	0,17	30 сек	30 сек
Легкие	2	30 сек	30 сек	2	30 сек	30 сек

Таблица 2

Тканевые дозы в теле человека, создаваемые радиоактивными изотопами криптона и ксенона при внутреннем облучении за 36 часовую рабочую неделю

	D , рад/неделя при $A = 10^{-7}$ кюри/л			
	Легкие	Кровь	Мышцы	Жировая ткань
^{89}Kr	0,27	0,006	0,007	0,6
^{85m}Kr	3,6	0,09	0,09	0,7
^{85}Kr	3,7	0,084	0,08	0,9
^{87}Kr	20	0,45	0,4	2,2
^{89}Kr	18	0,42	0,14	0,2
^{90}Kr	19	0,45	0,03	0,03
^{91}Kr	4,5	0,1	0,009	0,009
^{131m}Xe	2,0	0,17	0,13	1,4
^{133m}Xe	2,5	0,21	0,13	0,5
^{133}Xe	2,1	0,18	0,14	1,5
^{135m}Xe	1,0	0,085	0,02	0,03
^{135}Xe	4,6	0,4	0,26	2,0
^{137}Xe	18	1,5	0,12	0,16
^{138}Xe	12	1,0	0,27	0,45

В опытах по изучению поступления ксенона-133 через кожные покровы участвовали трое добровольцев.

Испытуемый, тело которого не было защищено одеждой, помещался в экспозиционную камеру. После герметизации в камеру вводили ксенон-133. Органы дыхания испытуемого были изолированы от воздуха экспозиционной камеры с помощью шлема противогаса, в

подмасочное пространство которого подавали чистый воздух для дыхания. Время экспозиции составляло 3 часа.

Установлено, что поступление ксенона-133 через кожные покровы составляет не более 0,4% по сравнению с поступлением через органы дыхания. В опытах, в которых делалась попытка определить выделение ксенона-133 из организма испытуемых через кожные покровы, количественных данных получить не удалось в силу незначительности эффекта. Проведенные опыты показывают, что поступление и выведение инертных радиоактивных газов из организма человека происходит в основном через органы дыхания. Неповрежденные кожные покровы в этом процессе играют исчезающе малую роль.

Аналогичные исследования [2] были проведены с газообразным радиоактивным йодом-131. Коэффициент F характеризует суммарную скорость поступления газообразного йода через органы дыхания (F_1) и через кожные покровы (F_2), т.е.

$$F = F_1 + F_2 \dots \dots \dots (2)$$

В свою очередь $F_1 = \gamma \cdot Q \cdot V \dots \dots \dots (3)$; $F_2 = \alpha \cdot Q \cdot S \dots \dots \dots (4)$

где: Q - концентрация йода в воздухе, кюри/л;
 V - скорость легочной вентиляции, л/час;
 S - площадь кожного покрова, м²;
 γ - доля активности, остающаяся в органах дыхания и переходящая в кровь;
 α - коэффициент, характеризующий поступление йода через кожные покровы, $\frac{\text{л}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}$

Определение параметров, входящих в уравнения (3) и (4), осуществлялось в опытах с привлечением добровольцев. Всего было проведено 23 опыта. Из них в 18 исследовалась резорбция йода неповрежденными кожными покровами и в 5 опытах изучалось поступление йода через органы дыхания.

Концентрация радиоактивного йода в экспозиционной камере поддерживалась с помощью генератора. Аэрозольная фаза и пары элементарного йода улавливались фильтрами. В воздушное пространство камеры попадали только газообразные соединения йода. Систематический контроль концентрации йода-131 в камере давал возможность при необходимости корректировать в ходе опыта ее значение путем изменения скорости подачи из генератора. Колебание концентрации йода-131 в воздухе экспозиционной камеры не превышало $\pm 20\%$ от среднего значения.

Результаты исследований представлены в таблице 3. Как видно из таблицы 3, коэффициент задержки газообразного йода в органах дыхания у разных испытуемых отличается на небольшую величину, тогда как резорбция газообразного йода кожными покровами колеблется в 5 раз (α меняется от 1,5 до 7,3). Разброс скорости поступления газообразного йода через кожные покровы нельзя объяснить неодинаковыми исходными значениями концентрации йода-131 в воздухе, так как ее колебание в 100 раз не привело к заметному изменению величины коэффициента α у испытуемого К.А.

Все остальные параметры в процессе эксперимента (температура, влажность, режим питания и др.) были также одинаковыми. По-видимому, колебания скорости поступления газообразного йода через кожные покровы можно объяснить в основном индивидуальными фи-

Таблица 3

Основные параметры, характеризующие поступление газообразного йода в организм человека через органы дыхания и неповрежденные кожные покровы

Испы- туе- мый	Эффективный пе- риод полувыве- дения йода- I_{31} из крови, T_1	Эффективный пе- риод полувыве- дения йода- I_{31} из щитовидной железы T	Коэффициент за- держки йода в органах ды- хания λ	Доля активности йода- I_{31} , пос- тупившая из крови в щитовидную же- лезу α_1	Коэффициент пос- тупления газооб- разного йода через поврежденные кожные покровы, α_2 , л/м ² , час
С.А.	6,2 часа	6,2 дня	0,75	9,1%	5,1 4,8
П.С.	-	-	-	-	2,5 ^x 4,5
К.А.	5,3 часа	6,4 дня	0,65	5,0%	2,1 2,1 2,6
К.В.	-	-	-	-	2,1 ^x 2,7 ^x 2,9
А.В.	4,7 часа	6,0 дня	0,58	8,0%	2,7 2,0
Ю.М.	4,3 часа	6,0 дня	0,8	3,7%	1,5 7,3
С.Д.	-	-	-	-	5,1 ^x
Ф.В.	6,0 часа	7,3	0,67	10,6%	-

$$T_1 = 5,3 \pm 0,8 \text{ часа; } T = 6,4 \pm 0,5 \text{ дня; } \lambda = 0,7 \pm 0,08; \alpha_1 = 7,2 \pm 2,9\%; \alpha_2 = 3,8 \pm 2,1$$

ПРИМЕЧАНИЕ: х) - рассчитано при $\alpha_1 = 7,2\%$; ■ - определено с физической нагрузкой.

физиологическими особенностями испытуемых. В опытах с нагрузкой средней тяжести значения коэффициентов α практически не отличаются от значений коэффициентов при спокойном состоянии испытуемых. Для некоторых испытуемых была оценена относительная величина скорости поступления газообразного йода через органы дыхания и через неповрежденные кожные покровы

F_1/F_2	127	47	40	80
Испытуемый	К.А.	С.А.	Ю.М.	А.В.

Из приведенных данных видно, что резорбция газообразного йода кожными покровами составляет $1 \pm 2\%$ по сравнению с резорбцией органами дыхания.

Можно отметить, что резорбтивная способность кожных покровов человека по отношению к газообразному йоду выше чем к ксенону, проникновение которого через кожные покровы составляет не более 0,4%. Качественно такое различие в проницаемости кожи по отношению к газообразному йоду и ксенону можно объяснить различием механизма проникновения этих изотопов. Несмотря на то, что в настоящее время не существует единого мнения относительно механизма кожной проницаемости, но, вместе с тем, по мнению авторов [3] поступление радиоактивных веществ характеризуется следующими тремя процессами.

1. Активный физиологический процесс всасывания.
2. Процесс диффузии через кожный барьер.
3. Способность кожи, как губки, впитывать в себя и удерживать вещества, находящиеся на ее поверхности.

Можно однозначно утверждать, что инертный ксенон проникает через кожный барьер вследствие диффузии, тогда как газообразный йод вероятнее всего поступает через кожу за счет трех выше перечисленных процессов.

В связи с тем, что исследования основных параметров, характеризующих поступление газообразного йода в организм человека, проводились в лабораторных условиях на соединениях йода неизвестного физико-химического состава, представляется очень важным оценить пригодность полученных данных к реальным условиям.

В настоящее время определение физико-химического состава парообразных соединений йода представляет самостоятельную проблему, решение которой сопряжено с большими трудностями. Однако с точки зрения радиационной опасности даже при известном физико-химическом составе газообразного йода в воздухе определяющим параметром является величина радиоактивности, накопленная в организме. Эксперименты по определению коэффициента задержки газообразного йода в реальных условиях на водо-водяном реакторе и на радиохимическом заводе представлены в таблице 4 [2].

Несколько повышенное значение коэффициента задержки в реальных условиях можно объяснить присутствием в воздухе элементарного йода и йода в виде аэрозолей, которые, по-видимому, в органах дыхания задерживаются с более высокой эффективностью, чем парообразные соединения. Коэффициент задержки в органах дыхания человека газообразного йода лежит в пределах 0,7 - 0,9, что подтверждает принятое в рекомендациях МКРЗ значение этого коэффициента, равное 0,75.

Таблица 4

Значения коэффициентов задержки газообразного радиоактивного йода в органах дыхания человека

Место эксперимента	Формы йода в воздухе, %			Коэффициент задержки
	Аэрозоли	Элементарный йод	Летучие соединения	
Лаборат.исслед.	-	-	100	0,7
Водо-водяной реактор	3-2I	9-16	70-86	0,84
Радиохими- ческий завод	3	5-10	90-95	0,9

ЛИТЕРАТУРА

1. Туркия А.Д.

Дозиметрия радиоактивных газов. Атомиздат, 1973 год.

2. Городинский С.М. и др.

Поступление парообразных соединений йода в организм человека через органы дыхания.
Статья в сб. "Распределение, кинетика обмена и биологическое действие радиоактивных изотопов йода".
Из-во "Медицина", г. Москва, 1970 г. стр. 45-50.

3. Осанов Д.П., Лихтарев И.А., Радзиевский Г.Б.

Дозиметрия излучений инкорпорированных радиоактивных веществ.
Атомиздат, 1970 год.