

ЦЕЗИЙ-137 В ОРГАНИЗМЕ ЧЕЛОВЕКА

А. А. Моисеев (Москва)

Среди более чем двухсот радиоактивных изотопов, образующихся при взрыве ядерного устройства, наибольшую потенциальную опасность для человека наряду со стронцием-90 (Sr^{90}) представляет цезий-137 (Cs^{137}). Схема распада Cs^{137} приведена на рис. 1.

Выход Cs^{137} при делении меняется в зависимости от характера делящегося ядра и энергии нейтронов, вызывающих деление. Данные о выходе Cs^{137} при делении ядер урана, плутония и тория на тепловых и быстрых нейтронах приведены в табл. 1¹. Ввиду того что в ядерных устройствах могут использоваться комбинации различных делящихся материалов, фактический выход при делении в каждом конкретном

случае может несколько отличаться от величин, приведенных в табл. 1.

Согласно результатам непосредственных измерений, проведенных американскими исследователями в 1959—1962 гг., выход Cs^{137} колеблется от 5,57% (Hardy и соавторы) до 5,76% (Holland). На основании этих данных было рассчитано, что на каждые 10 Мт энергии деления образуется примерно 1,7 Мкюри Cs^{137} (Hallden и Fisenne).

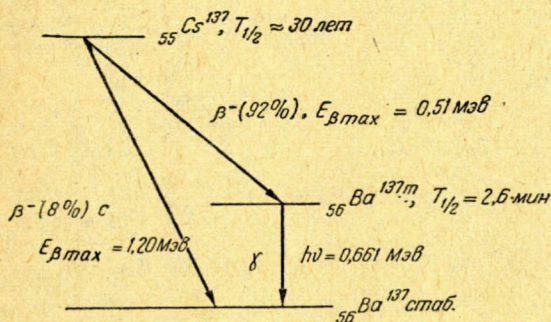


Рис. 1. Схема распада Cs^{137} .

Таблица 1

Выход Cs^{137} при делении

Делящийся изотоп	Уран-235			Уран-238		Торий-232	Плутоний-239
	тепловые нейтроны	быстрые нейтроны	нейтроны с энергией 14,6 Мэв	быстрые нейтроны	нейтроны с энергией 14,6 Мэв	быстрые нейтроны	быстрые нейтроны
Выход при делении (в %)	6,15	6,18	5,10	6,20	5,71	6,30	6,80

По своим химическим свойствам Cs напоминает калий (K). Это, а также тот факт, что современные методы γ -спектрометрии ядерных

¹ Доклад научного комитета ООН, 1962.

излучений позволяют одновременно измерять содержание в исследуемой пробе как искусственного радиоактивного изотопа Cs^{137} , так и природного изотопа K^{40} , способствовали введению, подобно стронциевой единице — sunshine unit, цезиевой единицы — moonshine unit, равной 10^{-12} юри Cs^{137} на 1 г К в исследуемом объекте.

Выпадая на почву с радиоактивными осадками, Cs^{137} включается в общий круговорот веществ в биосфере и по пищевым цепочкам может поступать в организм человека.

Попавший в почву Cs^{137} , как правило, прочно удерживается в ее поверхностном слое и очень слабо (примерно в 10 раз хуже Sr^{90}) усваивается растениями из почв, характерных для большинства районов средних широт северного полушария (Larson и Neel; Martell). Относительно низкое поглощение Cs^{137} растениями из почвы объясняется тем, что, выпадая на поверхность почвы, этот изотоп, подобно К, поступает в кристаллическую структуру минералов и образует трудно растворимые соединения.

Рядом авторов (Langham и Anderson; McNeill и Trojan) получены ориентировочные данные о коэффициенте дискриминации DF «тело человека — почва», который равен 0,03—0,045. Следовательно, только 3—4,5% всего количества Cs^{137} (отнесенного на 1 г обменного К) поступает из почвы в организм человека, а полный защитный коэффициент для этой пищевой цепочки равен 22—33. Следует, однако, отметить, что в период испытаний ядерного оружия в атмосфере, а также после него, когда происходит интенсивное выпадение Cs^{137} с радиоактивными осадками из стратосферы и тропосферы, значение первого звена рассмотренной пищевой цепочки «почва — растение» очень мало. В результате прямого оседания Cs^{137} с радиоактивными осадками на листву и соцветия растений общий DF для цепочки «растение — человек» увеличивается до 3—4,5, что приводит в этот период к значительно более интенсивному поступлению Cs^{137} в организм человека с продуктами питания растительного и животного происхождения (Н. Г. Гусев).

Радиохимические и γ -спектрометрические исследования отдельных пищевых продуктов и рационов питания населения Канады и США, проведенные в середине 1961 г., показали, что в этих странах около 60% Cs^{137} поступало в организм с молоком и 25—35% — с мясными продуктами¹. Приближенные вычисления, основанные на данных Yamagato об уровнях содержания Cs^{137} в пищевых продуктах Японии, позволяют считать, что примерно 50% Cs^{137} поступает в организм жителя этой страны с зерновыми продуктами, а остальные 50% — с овощами, молоком и мясом.

В то время как Sr и Ca (кальций) ведут себя в биологических системах сравнительно одинаково, для Cs и К не будет достаточно полной аналогии между их химическими свойствами². В некоторых работах (Wasserman; Green и соавторы; Монгое и соавторы) показано, что в различных органах и тканях организма животного Cs^{137} и К распределяются по-разному и общий DF варьирует в зависимости от ряда факторов (возраста, температуры и т. д.). Все это дает основание считать, что коэффициенты дискриминации целесообразно использовать только при качественной, а не количественной оценке механизма миграции Cs^{137} по пищевым цепочкам и накоплению его в организме человека.

Как подтвердили многочисленные эксперименты, Cs и К усваиваются из желудочно-кишечного тракта фактически целиком и распределяются в основном в мягких тканях³ (Cohn и соавторы). По наблюдениям некоторых исследователей, Cs^{137} хорошо накапливается не только

¹ Доклад научного комитета ООН, 1962 г.

² Там же.

³ Там же.

в мышцах, но и в костной ткани. Проведенные в Японии в 1958—1960 гг. измерения содержания Cs^{137} в образцах, отобранных от 114 трупов, показали, что отношение активности, содержащейся в костях (включая костный мозг) и мышечной ткани, было равно 2,2 (Yamagata). Однако дальнейшие многочисленные исследования (Harrison; Yamagata; Anderson) не подтвердили существования такой разницы; было отмечено лишь очень незначительное увеличение концентрации Cs^{137} в костях.

В других работах отмечается, что после внутреннего введения Cs^{137} в организм пациента содержание этого изотопа в костной ткани (после вскрытия) было несколько ниже, чем в мышечной ткани (Rosoff и соавторы).

При однократном поступлении Cs^{137} можно выделить по крайней мере 2 механизма выведения его из организма человека (Langham; Rundo и Newton; Richmond и соавторы; Cohn и соавторы). Небольшая доля изотопа (от 10 до 15%) выводится из организма с периодом полувыведения 1—1½ дня. Остальное количество Cs^{137} выводится более медленно, с периодом полувыведения от 25—60 до 150—180 дней. Период полувыведения Cs^{137} из организма детей колеблется от 38 до 44 дней (Miettinen и соавторы; Rundo).

Величина биологического и эффективного периода полувыведения медленно выводимой доли Cs^{137} из организма людей, по данным различных авторов, приведена в табл. 2.

Таблица 2

Период полувыведения Cs^{137} из организма человека

Критический орган	Период полувыведения (в днях)		Автор, год
	биологический	эффективный	
Все тело	110	—	Miller, 1956
» »	150	—	Powe, 1956
» »	140 — 145	—	Anderson, 1957
» »	25	—	Graul, 1957
Мышцы	—	17	Graul, 1957
Все тело	25	—	Merkler, 1957
Мышцы	17	17	Merkler, 1957
Все тело	92; 157	—	Miller, 1957
» »	143	—	Richmond, 1958
» »	180	—	Stewart, 1958
» »	70	70	МКРЗ, 1959
Мышцы	140	138	МКРЗ, 1959
Все тело	110; 115; 119	—	McNeill, 1959
» »	110 — 140	—	Lant, 1959
Мышцы	17	17	Frost, 1960
Все тело	—	63 ¹	М. Н. Фатеева, 1960
» »	110	—	Woodward, 1960
» »	81 — 143	—	Baarli, 1961
» »	74	—	Lidén, 1961
» »	76	—	Yamagata, 1962
» »	110	—	Rindo и Newton, 1962
» »	48 — 128 (87) ²	—	Rundo, 1962
» »	—	80 — 130	Taylor, 1962
» »	110 — 147 (135)	—	Richmond, 1962
» »	54 — 114 (75)	—	Cohn, 1963
» »	80	—	Hammond, 1963
» »	74	—	Miettinen, 1963
» »	68	—	Lidén, 1963

¹ Эффективный период вычислен на основании данных, приведенных в работе М. Н. Фатеевой.

² Здесь и далее в скобках приведены средние значения.

Для практических целей при расчете уровней накопления Cs^{137} в организме или тканевых доз от инкорпорированного Cs^{137} долей изотопа, быстро выводящейся из организма, практически не создавая дозы облучения, можно пренебречь. Ошибка такого приближения не превышает 1% (Rundo; Richmond и соавторы). На рис. 2 и 3 приведены

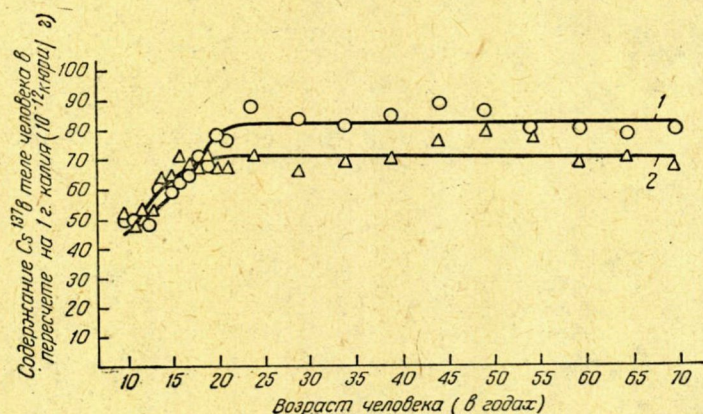


Рис. 2. Зависимость содержания Cs^{137} в теле человека от его возраста и пола (в пересчете на 1 г К).
1 — мужчины; 2 — женщины.

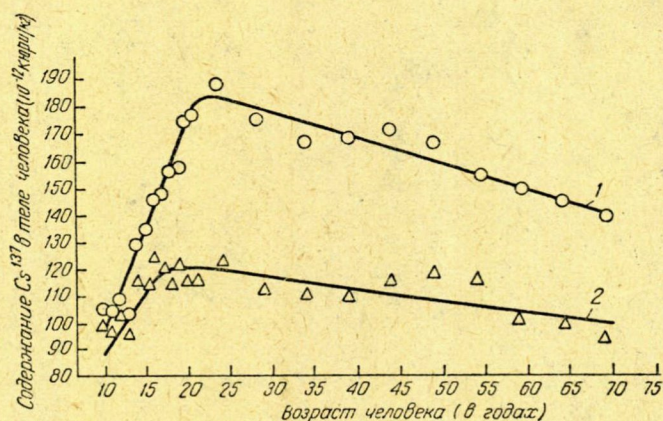


Рис. 3. Зависимость содержания Cs^{137} в теле человека от его возраста и пола (в пересчете на 1 кг веса).
1 — мужчины; 2 — женщины.

данные, характеризующие содержание Cs^{137} в организме людей в зависимости от возраста и пола обследованных (Onstead и соавторы). Из этих данных видно, что, во-первых, концентрация Cs^{137} на единицу веса тела увеличивается с возрастом, достигая максимума в возрасте 20—22 лет, и затем начинает монотонно снижаться; во-вторых, концентрация Cs^{137} на 1 г К в организме человека к 22-летнему возрасту достигает постоянной величины и в дальнейшем не изменяется; в-третьих, у женщин концентрация Cs^{137} на 1 кг веса тела примерно на 50% меньше, чем у мужчин, однако если содержание Cs^{137} выражать в цезиевых

единицах, то это различие составит всего 10—15%; в-четвертых, усвоение Cs и K организмом человека также зависит от возраста человека. Меньшая величина удельной активности (в цезиевых единицах) у детей указывает на то, что в детском организме происходит большая дискриминация Cs по сравнению с K. Более ранними работами было установлено, что у взрослых, наоборот, наблюдается дискриминация K по сравнению с Cs.

Относительно короткий период полувыведения Cs¹³⁷ из организма приводит к тому, что между концентрациями этого изотопа в пищевом рационе и организме человека быстро (фактически через несколько периодов полувыведения) устанавливается равновесие, при котором в организме не происходит дальнейшего значительного накопления Cs¹³⁷ в случае, если активность рациона остается в этот период примерно постоянной.

Изменение уровней содержания калия в рационе оказывает малый эффект на скорости выведения Cs¹³⁷ из организма человека (McNeill и соавторы; Langham и Anderson). Увеличение суточного поступления K в организм вызывает лишь кратковременное увеличение скорости выведения Cs¹³⁷ из организма с мочой, после чего она быстро возвращается к первоначальной величине (McNeill). Эффективный период полувыведения Cs¹³⁷ из человеческого организма сравнительно невелик, поэтому колебания концентраций этого изотопа в теле человека на 1 кг веса или на 1 г калия у различных возрастных групп незначительны. Это обстоятельство позволяет использовать данные о содержании Cs¹³⁷ в организме взрослых людей для вычисления дозы облучения от этого элемента для всей популяции.

Если принять при расчетах, что метаболизм Cs¹³⁷ в организме человека хорошо описывается моделью с 2 экспонентами, то можно содержание Cs¹³⁷ в любой интересующий нас период при хроническом поступлении этого изотопа в организм с диетой в течение времени t достаточно точно оценить с помощью соотношения 1 (Miettinen и соавторы):

$$A(t) = A_0 e^{-(\lambda_2 + \lambda_1)t} + \frac{Pq}{\lambda_1} \left[1 - e^{-\lambda_1 \cdot t} \right] + \frac{(1-P) \cdot q}{\lambda_2 + \lambda} \left[1 - e^{-(\lambda_2 + \lambda) \cdot t} \right] \quad (1),$$

где $A(t)$ — содержание Cs¹³⁷ в организме человека на время t (в 10^{-9} кюри); A_0 — содержание Cs¹³⁷ в организме при $t=0$; 10^{-9} кюри; q — количество Cs¹³⁷, ежедневно поступающее в организм человека (в 10^{-9} кюри); λ — постоянная физического распада Cs¹³⁷ (в день⁻¹); λ_1 — постоянная быстрого биологического выведения Cs¹³⁷ из организма (в день⁻¹); λ_2 — постоянная медленного выведения Cs¹³⁷ из организма (в день⁻¹); P — доля изотопа, которая быстро выводится из организма после однократного поступления.

Так как $\lambda_1 \approx 50\lambda_2$, а $P \approx 0,12$, то вторым членом в уравнении 1 можно пренебречь. Учитывая также, что $\lambda_2 \gg \lambda$ ($\lambda \approx 1\% \lambda_2$), соотношение 1 можно переписать в виде:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t} + \frac{1-P}{\lambda_2} \cdot q \left(1 - e^{-\lambda_2 \cdot t} \right) \quad (2).$$

Данные, характеризующие уровни среднего содержания Cs¹³⁷ в организме человека за период с 1956 по 1963 г. включительно, измеренные с помощью больших сцинтилляционных счетчиков, сведены в табл. 3¹ (Palmer, Madshus и соавторы). Все сведения в таблице при-

¹ Доклад Научного комитета ООН, 1962.

ведены в цезиевых единицах. Объясняется это, во-первых, тем, что возрастные и половые различия в этом случае минимальны. Это особенно важно, когда неизвестны соотношения между мужчинами и женщинами в обследуемой группе и их возрасте. Во-вторых, эти величины хорошо коррелируют с концентрацией Cs^{137} на единицу веса мышечной и костной ткани (без учета жировой) по сравнению с единицей веса всего тела и позволяют, следовательно, более точно рассчитать величины тканевой дозы. Отмечается совпадение полученных в различных лабораториях данных о среднем содержании Cs^{137} в организме людей, проживающих в северном полушарии.

Однако в ряде районов северного полушария (Аляска, север Канады и Скандинавского полуострова) ввиду специфических для них экологических условий наблюдаются более высокие уровни содержания Cs^{137} в организме коренных жителей, доходящие в отдельных случаях до 0,9 мкюри (Miettinen и соавторы; Madshus и соавторы; Palmer; Baarli).

В результате приблизительно гомогенного распределения в организме человека Cs^{137} создает достаточно равномерную дозу облучения различных органов и тканей. Этот изотоп является γ - и β -излучателем. Его тканевая доза на единицу удельной активности (D_1) меняется в зависимости от веса и роста человека, которые влияют на эффективность поглощения γ -излучений в его теле. Этот эффект принял во внимание Miettinen путем использования соответствующих геометрических факторов, рассчитанных Loevinger с соавторами, в виде дозовых коэффициентов на единицу удельной активности за счет β -излучения и конверсионных электронов (D_β) и за счет γ - и рентгеновского излучения (D_γ). Соответствующие сведения приведены в табл. 4.

В случае периодического изменения концентрации Cs^{137} в рационе во времени тканевая доза может быть подсчитана с помощью соотношения 3:

Таблица 3

Средние концентрации Cs^{137} в 10^{-12} юри на 1 г К в организме

Район мира	Широта	1956 г.	1957 г.	1958 г.	1959 г.	1960 г.	1961 г.	1962 г.	1963 г.
Северная Америка	30° сев.	50 (279) ¹	51 (294)	65 (1 069)	69 (1 089)	55 (949)	31 (245)	—	—
Европа	30° »	32 (18)	37 (18)	69 (83)	65 (302)	63 (1 891)	43 (963)	30 (861)	89 (867)
Ближний Восток	30° »	—	—	61 (3)	54 (1)	30 (7)	49 (2)	—	—
Дальний »	30° »	25 (1)	—	71 (18)	67 (72)	50 (146)	29 (42)	—	—
Азия	30° »	16 (4)	—	66 (3)	56 (15)	51 (2)	—	—	—
Центральная Америка	10° »	—	14 (2)	66 (3)	59 (14)	45 (10)	26 (5)	—	—
Африка	—	—	—	52 (2)	51 (3)	—	35 (1)	—	—
Океания	20° южн.	—	52 (1)	—	74 (5)	51 (2)	36 (1)	—	—

¹ Здесь и далее в скобках приведено число обследованных людей.

$$D = \frac{D_{\beta, \gamma}}{365 \cdot W \cdot \lambda_2} \sum_n \left\{ \left(1 - e^{-\lambda_2 \cdot t_n} \right) \cdot \left[A_{o,n} - \frac{1-P}{\lambda_2} \cdot q_n \right] + (1-P) \cdot q_n \cdot t_n \right\} \quad (3),$$

где $D_{\beta, \gamma}$ — мощность дозы облучения (в мбэр/год) при постоянном содержании Cs^{137} в организме человека 10^{-9} кюри/кг; q_n — постоянное суточное поступление Cs^{137} в организм в n период (в 10^{-9} кюри/день); $A_{o,n}$ — содержание Cs^{137} в организме в начале n периода (в 10^{-9} кюри); 365 — число дней в году; W — вес тела (в кг).

Таблица 4

Тканевая мощность дозы при содержании в организме человека 10^{-9} кюри Cs^{137} на 1 кг веса

Вес тела (в кг)	Рост (в см)	Мощность дозы (в мбэр/год)		
		D_{β}	D_{γ}	$D_{\beta, \gamma} = D_{\beta} + D_{\gamma}$
35	110	4,5	2,9	7,4
70	170	4,5	3,5	8,0
100	170	4,5	4,0	8,5
—	—	4,5	10,6	15,1

Научный комитет ООН по действию атомной радиации рекомендует, производя оценочные расчеты уровней внутреннего облучения, принимать, что при концентрации 10^{-12} кюри Cs^{137} на 1 г ткани мощность тканевой дозы равна 10 мбэр/год, или в случае выражения удельной концентрации Cs^{137} в цезиевых единицах — 0,02 мбэр/год 10^{-12} кюри/г калия¹.

ЛИТЕРАТУРА

- Гусев Н. Г. О предельно допустимых уровнях ионизирующих излучений. М., 1961. — Радиационная защита. М., 1961. — Фатеева М. Н. и др. Мед. радиол., 1960, № 7, стр. 14. — Anderson E. C. et al., Science, 1957, v. 125, p. 1273. — Anderson, R. W., Gustafson P. F., Ibid., 1962, v. 137, p. 668. — Baarli I. et al., Nature, 1961, v. 191, p. 436. — Cohn S. H. et al., Radiat. Res., 1963, v. 19, p. 655. — Frost D. Praktischer Strahlenschutz. Berlin, 1960, S. 47. Цит. Н. Seidler, M. Härtig, K. Siebert. Kernenergie, 1963, Bd. 6, S. 436. — Graul E. H. В кн.: Fortschritte der angewandten Radioisotopie und Grenzgebiete. Heidelberg, 1957, Bd. 1, S. 179. — Green R. M., McNeill K. G., Robinson G. A., Canad. J. Biochem., 1961, v. 39, p. 1021. — Hammond S. E. et al., Hlth Phys., 1963, v. 9, p. 523. — Land K. (1959) Цит. Н. Seidler, M. Härtig, K. Siebert. Kernenergie, 1963, Bd. 6, S. 436. — Langham W. H., Anderson E. C., Hlth Phys., 1959, v. 2, p. 30. — Langham W. H., Anderson E. C., Bull. Schweiz. Akad. med. Wiss., 1958, Bd. 14, S. 434. — Liden K., Acta radiol. (Stockh.), 1961, v. 56, p. 237. — Loevinger R. et al., Radiation Dosimetry. New York, 1958. — Madshus K. et al., Nature, 1963, v. 200, p. 278. — McNeill K. G. et al., Canad. J. Phys., 1959, v. 37, p. 528. — McNeill K. G., Trojan O. A. D., Hlth Phys., 1960, v. 4, p. 109. — McNeill K. G. et al. В кн.: Whole-body Counting. Vienna, 1962, p. 357. — Merkle H. В кн.: B. Rajewsky (hrsg.) Wissenschaftliche Grundlagen des Strahlenschutzes. Frankfurt, 1957, S. 316. — Miller C. E. Цит. S. E. Hammond et al. — Miller C. E., Steingraber C. J. Цит. S. E. Hammond et al. — Miettinen J. K. et al., Ann. Acad. Sci. fenn. A 11 Chemica, 1963, N 120. — Monroe R. A., Wasserman R. H., Comar C. L., Am. J. Physiol., 1961, v. 200, p. 535. — Onstead C. O. et al., Science, 1962, v. 137, p. 508. — Powe, Van Dilla. Цит. C. R. Richmond et al. (1962). — Richmond C. R. Цит. S. E. Hammond et al. — Richmond C. R. et al., Hlth Phys., 1962, v. 8, p. 201. — Rosoff B., Feldstein A., Stand F. et al., Radiat. Res., 1961, v. 14, p. 495. — Rundo J. В кн.: Whole-body Counting. Vienna, 1962, p. 362. — Rundo J., Newton D., Nature, 1962, v. 195, p. 851. — Rundo J. et al., Ibid., 1963, v. 200, p. 188. — Stewart C. G. et al., Proceedings of the Second International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy. New York, 1958, v. 23, p. 123. — Taylor M. P. et al., Phys. Med. and Biol., 1962, v. 7, p. 157. — Wasserman R. H., Comar C. L., Radiat. Res., 1961, v. 15, p. 70. — Woodward K. T. et al. Цит. S. E. Hammond et al. — Yamagata N., Nature, 1962, v. 196, p. 284. — Idem, Ibid., p. 83.

Поступила 4/IX 1964 г.

¹ Доклад Научного комитета ООН, 1962.