

ПРИРОДА

117049, Москва, Мароновский пер., д. 26
тел. : [095] 238-24-56; e-mail: byalko@landau.ac.ru

№ 3 - 1999 г.

И.Я. Василенко

Радиоактивный цезий - 137

© Природа

*Использование или распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск
VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!
<http://www.techno.ru/vivovoco>

Радиоактивный цезий-137

И. Я. Василенко

Иван Яковлевич Василенко, доктор медицинских наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР, ведущий научный сотрудник Государственного научного центра РФ — Института биофизики. Область научных интересов — токсикология продуктов ядерного деления, радиационная гигиена.

СРЕДИ антропогенных радионуклидов, глобально загрязняющих биосферу, особого к себе внимания требует радиоактивный цезий — один из основных источников, формирующих дозы внешнего и внутреннего облучения людей. Известно 34 изотопа цезия с массовыми числами 114—148, из них только один (^{133}Cs) стабильный, остальные — радиоактивны.

^{133}Cs относится к рассеянным элементам. В незначительных количествах он содержится практически во всех объектах внешней среды. Кларковое (среднее) содержание нуклида в земной коре — $3.7 \cdot 10^{-4} \%$, в почве — $5 \cdot 10^{-5} \%$. Цезий — постоянный микроэлемент растительных и животных организмов: в живой фитомассе содержится в количестве $6 \cdot 10^{-6} \%$, в организме человека — примерно $15 \cdot 10^{-4} \text{ г}$. Этот нуклид поступает в основном с пищей в количестве 10 мкг/сут. Выводится из организма преимущественно с мочой (в среднем 9 мкг/сут). Биологическая роль цезия до сих пор окончательно не раскрыта.

Из радиоактивных изотопов цезия наиболее интересен ^{137}Cs с периодом полураспада 30 лет. ^{137}Cs — β -излучающий нуклид со средней энергией β -частиц 170.8 кэВ. Его дочерний нуклид $^{137\text{m}}\text{Ba}$ имеет период полураспада 2.55 мин и испускает γ -кванты с энергией 661 кэВ. ^{137}Cs широко применяется в медицине (для диагностики и лечения), радиационной стерилизации, дефектоскопии и во многих других технологиях. Другие радиоизотопы цезия имеют меньшее значение.

ИСТОЧНИКИ ОБРАЗОВАНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ЦЕЗИЯ

Известно, что выброс радиоактивного цезия в окружающую среду проис-

Таблица 1

Динамика накопления ^{137}Cs (в % полной β -активности) в работающем ядерном реакторе

1 ч	1 сут	10 сут	1 мес	5 мес	1 год
4×10^{-5}	0.002	0.02	0.07	0.44	1.98

ходит в основном в результате испытаний ядерного оружия и аварий на предприятиях атомной энергетики. В реакторах выход ^{137}Cs зависит от делящегося материала и энергии нейтронов, вызывающих деление, и составляет¹ по активности 5.1—6.3%. Относительное содержание радиоцезия в продуктах деления меняется с их «возрастом» (табл.1).

Испытание ядерного оружия — один из наиболее значимых источников радиоактивного загрязнения планеты, в том числе ^{137}Cs . К началу 1981 г. суммарная активность² поступившего в окружающую среду ^{137}Cs достигла 960 ПБк. Плотность загрязнения³ в Северном и Южном полушариях и в среднем на земном шаре составляла соответственно 3.42; 0.86 и 3.14 кБк/м², а на территории бывшего СССР⁴ в среднем — 3.4 кБк/м².

В ядерных реакторах в процессе их эксплуатации накапливаются продукты деления (фиссиум) и трансурановые элементы, суммарная активность которых огромна. Среди радионуклидов фиссиума радиоизотопы цезия занимают значительное место (табл.2). На 1 МВт (эл. мощности) этого радионуклида за год образуется столько, что его активность составляет 130 ТБк (Т, тера — 10^{12}). Суммарное накопление нуклида в реакторах всего мира (в пересчете на

активность) к концу столетия достигнет 900 ЭБк (Э, экса — 10^{18}), что примерно в тысячу раз больше количества поступивших во внешнюю среду радионуклидов при ядерных взрывах.

Известно, что при нормальных условиях эксплуатации АЭС выбросы радионуклидов, в том числе радиоактивного цезия, незначительны. Подавляющее количество продуктов ядерного деления остается в топливе. По данным дозиметрического контроля, концентрация цезия в районах расположения АЭС лишь незначительно превышает концентрацию нуклида в контрольных районах, где загрязнение среды происходит за счет испытаний ядерного оружия⁵. Объем выбросов радионуклидов зависит от конструктивных особенностей реакторов, времени их эксплуатации, способа очистки и состояния оборудования. Источником загрязнения могут быть и радиохимические заводы (РХЗ) по переработке отработанных твэлов, и хранилища радиоактивных отходов. По прогнозу Научного комитета по действию атомной радиации при ООН (НКДАР), выбросы радиоцезия к 2000 г. могут достигнуть 1.5—5.2 ТБк.

Чрезвычайно сложные ситуации возникают после аварий, когда во внешнюю среду поступает огромное количество радионуклидов и загрязнению подвергаются большие территории. На-

¹ Гусев Н.Г. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. М., 1986.

² Напомним: Бк (Беккерель) — единица радиоактивности в системе СИ. Такую активность имеет источник, в котором происходит 1 радиоактивный распад за 1 с. На практике чаще пользуются старой единицей активности Ки (Кюри). В источнике с активностью 1 Ки происходит 3.7×10^{10} распадов в 1 с. Поэтому 960 ПБк ≈ 26 МКи (приставка П, пэта, означает 10^{15}).

³ Ионизирующее излучение: источники и биологические эффекты // Докл. за 1982 г. Нью-Йорк: Научный ком. по действию атомной радиации при ООН, 1982. Т.1.

⁴ Моисеев А.А. Цезий-137: Окружающая среда. Человек. М., 1980.

Таблица 2

Содержание ^{137}Cs (ПБк/т урана) в реакторе ВВЭР-1000 (после его остановки) во времени (Колобашкин В.М. и др., 1982)

1 сут	120 сут	1 год	3 года	10 лет
4.69	4.65	4.58	2.73	0.26

⁵ Гусев Н.Г. // Атомная энергия. 1976. Вып.41. № 4. С.254—260.

пример, при аварии на Южном Урале в 1957 г. произошел тепловой взрыв хранилища радиоактивных отходов, и в атмосферу поступили радионуклиды с суммарной активностью 74 ПБк, в том числе 0.2 ПБк ^{137}Cs . При пожаре на РХЗ в Уинденейле в Великобритании в 1957 г. произошел выброс 12 ПБк радионуклидов, из них 46 ТБк ^{137}Cs . Технологический сброс радиоактивных отходов предприятия «Маяк» на Южном Урале в р.Течу в 1950 г. составил 102 ПБк, в том числе ^{137}Cs 12.4 ПБк. Ветровой вынос радионуклидов из поймы оз.Карачай на Южном Урале в 1967 г. составил 30 ТБк. На долю ^{137}Cs пришлось 0.4 ТБк. Настоящей катастрофой стала в 1986 г. авария на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС): из разрушенного реактора было выброшено 1850 ПБк радионуклидов, при этом на долю радиоактивного цезия пришлось 270 ПБк. Распространение радионуклидов приняло планетарные масштабы. На Украине, в Белоруссии и Центральном экономическом районе Российской Федерации выпало более половины от общего количества радионуклидов, осевших на территории СНГ. Известны случаи загрязнения внешней среды в результате небрежного хранения источников радиоактивного цезия для медицинских и технологических целей.

МИГРАЦИЯ ВО ВНЕШНЕЙ СРЕДЕ

Цезий легко мигрирует во внешней среде, чему способствуют два обстоятельства. Во-первых, ^{137}Cs — конечный продукт цепочки распадов: $^{137}\text{I}(24.2 \text{ с}) \xrightarrow{\beta^-} ^{137}\text{Xe} (3.9 \text{ мин}) \xrightarrow{\beta^-} ^{137}\text{Cs}$, в которой йод и ксенон присутствуют в газовой фазе. При ядерных взрывах образуются мелкодисперсные частицы, адсорбирующие цезий и медленно выпадающие на поверхность земли. Процесс выпадения ускоряют атмосферные осадки и агрегация частиц с образованием более крупных. Во-вторых, при всех (кроме подземных) ядерных взрывах и аварийных выбросах предприятий

атомной энергетики выпадения содержат цезий в хорошо растворимой форме, что имеет принципиальное значение в процессах его миграции. При наземных взрывах на силикатных почво-грунтах образуются слаборастворимые частицы. Содержание радионуклида в атмосферных осадках при ядерных взрывах в слаборастворимой форме колебалось в широких пределах⁶ — 3.3–82.4% (мас).

Выпавший на поверхность земли радиоактивный цезий перемещается под воздействием природных факторов в горизонтальном и вертикальном направлениях. Горизонтальная миграция происходит при ветровой эрозии почв, смывании атмосферными осадками в низменные бессточные участки. Скорость миграции зависит от гидрометеорологических факторов (скорости ветра и интенсивности атмосферных осадков), рельефа местности, вида почв и растительности и физико-химических свойств нуклида. Вертикальный перенос цезия происходит с фильтрационными токами воды и связан с деятельностью почвенных животных и микроорганизмов, выносом из корнеобитаемого слоя почвы в наземные части растений и др. Подвижность и биологическая доступность нуклида со временем снижается в результате перехода в «слабообменное» состояние.

В первые годы после выпадения цезий в основном содержится в верхнем, 5–10-сантиметровом, слое почвы независимо от ее вида. Удержание нуклида происходит благодаря высокому содержанию в верхнем слое мелкодисперсных фракций (особенно глинистых) и органических веществ, повышающих сорбционные свойства почвы. Проникновение радиоактивного цезия на глубины 30–50 см, очевидно, занимает десятки и сотни лет, однако перераспределение его по профилю почвы может произойти и быстрее — в результате сельскохозяйственной деятельности. В этом случае нуклид относительно равно-

⁶ Павлоцкая Ф.И. Миграция продуктов глобальных выпадений в почвах. М., 1974.

мерно рассредоточивается в пределах всего пахотного слоя.

Как правило, «путешествие» ^{137}Cs по пищевым цепочкам начинается с растений, куда нуклид может попасть непосредственно в момент радиоактивных выпадений, либо косвенно — через листья, стебли и корневую систему с пылью и водой. Уровни поверхностного загрязнения растений определяются их морфологическими особенностями и физико-химическими свойствами выпадающих аэрозолей. Известно, что растения способны задерживать аэрозоли с размером частиц менее 45 мкм. Особенно высокое содержание радионуклидов отмечено у лишайников, чая и хвойных деревьев, что связано с их биологическими особенностями. Относительно аэрозольного цезия установлено, что более всего он накапливается в капусте, далее по убыванию — свекле, картофеле, пшенице и естественной травянистой растительности. Накопление цезия в растительном покрове (разнотравье) относительно содержания этого нуклида в окружающей среде в средней полосе колеблется от 0.1 до 0.36. Со временем уровни загрязнения растений снижаются в результате прямых потерь (под действием дождя и ветра) и прироста биомассы: так, примерно в течение двух недель содержание нуклидов в пастбищной растительности уменьшается вдвое.

Уровень поглощения растворимого цезия растениями с их поверхности может достигать 10%. Сначала он накапливается в листьях, зернах, клубнях и корнеплодах, а в дальнейшем поступает в основном через корневую систему. Степень его усвоения колеблется в широких пределах и зависит от вида почв и особенностей растений. Наиболее высокие показатели зафиксированы на торфянисто-болотистых почвах Украинско-Белорусского полесья⁷. После аварии на ЧАЭС коэффициент перехода цезия (т.е. отношение активности единицы массы растения, Бк/кг, к загрязнению почвы,

Бк/км²) в растения из почв полесского типа составлял⁸: для зерна — 4.8×10^{-9} , картофеля — $1-2 \times 10^{-11}$, огурцов — 6×10^{-12} , помидоров — $1-4 \times 10^{-11}$.

Основной источник поступления цезия в организм человека — загрязненные нуклидом продукты питания животного происхождения. Содержание радиоактивного цезия⁹ в литре коровьего молока достигает 0.8—1.1% от суточного поступления нуклида, козьего и овечьего — 10—20%. Однако в основном он накапливается в мышечной ткани животного происхождения. Содержание цезия в 1 кг мяса коров, овец, свиней и кур содержится 4, 8, 20 и 26% (соответственно) от суточного поступления цезия. В белок куриных яиц попадает меньше — 1.8—2.1%. Еще в больших количествах цезий накапливается в мышечных тканях гидробионтов: активность 1 кг пресноводных рыб может превышать активность 1 л воды более чем в 1000 раз (у морских — ниже).

Отметим, основной источник цезия для населения России — молочные и зерновые продукты (после аварии на ЧАЭС — молочные и мясные), в странах Европы и США цезий поступает в основном с молочными и мясными продуктами и меньше — с зерновыми и овощными.

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ

В организм животных и человека ^{137}Cs проникает в основном через органы дыхания и пищеварения. Растворимый ^{137}Cs в кишечнике и легких всасывается практически полностью, однако у жвачных животных этому препятствуют содержащиеся в корме клетчатка и калий. Хорошей защитой для человека и животных служит кожа: через неповрежденную поверхность проникает всего 0.007% нанесенного количества нуклида, а через обожженную — 20%; через рану в течение первых 10 мин всасыва-

⁷ Марей А.Н., Зыкова А.С., Сауров М.М. Радиационная коммунальная гигиена. М., 1984.

⁸ Книжников В.А., Бархударов Р.М., Брук Г.Я. и др. Медицинские аспекты аварии на Чернобыльской атомной электростанции // Материалы науч. конф. 11—13 мая 1988, Киев, 1988. С.66—76.

⁹ Василенко И.Я. // Вопр. питания. 1988. № 4. С.4—11.

ется 50%, а через три часа — более 90% нанесенного количества. Независимо от пути поступления около 80% ^{137}Cs накапливается в мышцах, 8% — в скелете и остальная часть относительно равномерно распределяется в других тканях.

Из организма матери ^{137}Cs проникает через плаценту в плод, причем, чем старше эмбрион, тем в больших количествах нуклид накапливается в его органах и тканях.

В условиях постоянного поступления цезий накапливается в органах и тканях до определенного предела. Вначале процесс протекает интенсивно, затем постепенно затухает, и наступает равновесное состояние, когда, несмотря на присутствие нуклида в окружающей среде, его содержание в организме остается постоянным. Время достижения такой стабилизации зависит от вида животных и их возраста. При этом, чем старше животное, тем в меньших количествах радиоцезий накапливается в органах и тканях. Равновесное состояние у коров наступает примерно к концу месяца, у овец и коз — через 10 дней¹⁰. У человека радиоактивный цезий накапливается в организме и в мышечной ткани, в частности, в пропорции 94:68, а равновесное состояние устанавливается через 431 сут¹¹.

Выводится ^{137}Cs в основном через почки и кишечник. В течение первого месяца после прекращения поступления организм избавляется примерно от 80% введенного количества, причем процесс выведения сопровождается повторным всасыванием значительных количеств цезия в кровь в нижних отделах кишечника.

По данным Международной комиссии по радиологической защите, биологический период выведения половины накопленного ^{137}Cs для человека принято считать равным 70 сут. Выведение нуклида зависит от многих факторов (физиологического состояния, питания и др.): у пяти случайно облученных чело-

век биологический период выведения существенно различался и составлял 124, 61, 54, 36 и 36 сут.

При равномерном распределении ^{137}Cs в организме человека с удельной активностью 1 Бк/кг мощность поглощенной дозы, по данным различных авторов, варьирует от 2.14 до 3.16 мкГр/год. Для новорожденных при одинаковой удельной концентрации нуклида значение дозы в 2.3 раза ниже, чем у взрослого человека.

^{137}Cs высоко токсичен независимо от пути поступления его в организм. Биологическая эффективность радионуклида при внешнем и внутреннем облучении в сопоставимых поглощенных дозах практически одинакова. Относительно равномерное распределение инкорпорированного нуклида в организме приводит, как и при внешнем облучении, к равномерному облучению органов и тканей. Этому способствует также большая проникающая способность γ -квантов его дочернего нуклида $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ($E\gamma=0.662$ МэВ): длина пробега их в мягких тканях человека достигает примерно 12 см.

В опытах у крыс острые, подострые и хронические поражения развивались при введении ^{137}Cs в количестве 0.8; 0.65 и 0.37 МБк/г соответственно. При острых поражениях животные погибали через две-три недели, когда организм получал дозу около 30 Гр. Наоборот, в количестве 0.08—0.13 МБк/г цезий уже не оказывал влияния на продолжительность жизни крыс. Однако на длительные сроки у животных изменялась формула крови: уменьшалось количество лейкоцитов и тромбоцитов; а в дальнейшем развивались доброкачественные и злокачественные опухоли. Интересно, что при ежедневном поступлении радионуклида в малых количествах — $3.7 \cdot 10^3$ и $3.7 \cdot 10^4$ Бк/сут, когда поглощенные дозы варьировали от 0.37 до 3.7 Гр, состояние животных существенно не менялось, за исключением кратковременных нарушений иммуните-

¹⁰ Корнеев Н.А., Сироткин А.Н. Основы радиэкологии сельскохозяйственных животных. М., 1987.
¹¹ Булдаков Л.А. Радиоактивные вещества и человек. М., 1990.

¹² Шубик В.М., Колотвин В.А. и др. Теоретические и практические аспекты малых доз радиации. Сыктывкар, 1973.

та. Еще меньше поступления цезия — 370 и 37 Бк/сут — нарушений не вызывали¹².

У собак уже пятикратное, по сравнению с крысами, уменьшение удельного поступления ¹³⁷Cs вызывало острые радиационные поражения с симптомами, во многом схожими с острой лучевой болезнью при внешнем γ -облучении: угнетенное состояние и слабость, снижение массы тела, диарея, внутренние кровоизлияния. Изменения показателей крови также типичны для острой лучевой болезни.

У человека можно ожидать развитие радиационных поражений при поступлении цезия в еще меньших удельных количествах (в два-три раза по сравнению с собаками), когда поглощенная доза превысит примерно 2 Гр. Уровням поступления в 148, 370 и 740 МБк соответствуют легкая, средняя и тяжелая степени поражения, хотя лучевая реакция отмечается уже при единицах МБк. Эти выводы сделаны в результате клинических наблюдений за людьми, пострадавшими в различных ситуациях. Приведем несколько примеров.

У человека, случайно выпившего раствор ¹³⁷Cs с активностью 148 МБк, симптомы поражения нарастали постепенно¹³, по мере роста дозы внутреннего облучения, которая до полного выведения нуклида составила около 2,4 Гр. Болезнь протекала с умеренными функциональными нарушениями, лечение ускорило выведение радионуклида из организма и смягчило течение болезни.

В другом случае¹⁴ человек пострадал от смеси ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs с активностью около 185 МБк. Доза облучения за первые три месяца оценена в 1,3 Гр, а за три года — 3 Гр. В результате изменились показатели крови, нарушились функции печени и сердечно-сосудистой системы. Лечение смягчило эти симптомы, однако и в отдаленные сроки регистрировали нестойкую лейко- и тромбоцитопению, а также развитие дистрофи-

ческих процессов в сердечной мышце, нарушение функции печени и вегетативно-сосудистую дистонию.

В 1963 г. описан случай¹⁵, когда пять человек были облучены вследствие вдыхания воздуха с радиоактивным цезием. В результате в их легкие поступило 2—5 МБк радионуклида.

В 1987 г. в г.Гояни (Бразилия) в результате небрежного хранения источника цезия облучились 244 человека¹⁶. Острые комбинированные радиационные поражения получили 17 человек. Максимальная доза внешнего пролонгированного γ -облучения достигла 6 Гр. Тяжесть болезни усугублялась внутренним облучением инкорпорированного цезия (максимальный вклад внутреннего облучения достигал 15—50% интегральной дозы) и кожными поражениями. Развитие тяжелой стадии сопровождалось тошнотой, рвотой, частым стулом, развитием костно-мозгового синдрома, стоматитом, эзофагитом, фарингитом. Интенсивное комбинированное лечение помогло смягчить течение болезни у пациентов, однако четверо пострадавших все же скончались в результате аплазии костного мозга и инфекционных осложнений.

В настоящее время вклад испытаний ядерного оружия в загрязнение окружающей среды невелик. К 2000 г. ожидаемое превышение дозы облучения населения радиоактивным цезием над естественным фоном (~0,1 сГр/год) составит (на человека): в Северном полушарии 190, Южном — 47; в среднем на земном шаре — 170 мкГр/год.

Сложная ситуация сложилась в регионах радиоактивного загрязнения в результате взрыва на Чернобыльской АЭС. После распада радиоактивного йода, который был критическим нуклидом в начальный период, основным источником внешнего и внутреннего облучения населения стал радиоактивный цезий. Дозы облучения зависят от плотности загрязнения территорий и

¹³ Фатеева М.Н., Климов В.С., Понизовская А.И. и др. // Мед. радиология. 1969. № 7. С.14—19.

¹⁴ Кириллов С.А., Вассонов Ю.В. // Там же. 1971. № 11. С.47—51.

¹⁵ Кирюшкин В.И., Дощенко В.Н. и др. // Мед. радиология. 1963. № 11. С.33—40.

¹⁶ Селедовкин Г.Д. Докл. на Международном конгрессе по срочной хирургии. Милан, 1987.

эффективности мер защиты. У основной части населения содержание ^{137}Cs в организме, по данным дозиметрических измерений, находится в пределах тысяч Бк, что вызывает облучение с мощностью дозы в пределах долей единиц сГр/год. Облучение в таких малых дозах не вызывает ни острых, ни хронических поражений, однако в отдаленные сроки могут проявиться онкогенные и наследственные эффекты. При увеличении дозы облучения до 1 сГр, по оценкам Международной комиссии по радиологической защите¹⁷, количество онкологических заболеваний может составить 730 случаев на 1 млн человек. Это — незначительная величина по сравнению со спонтанным уровнем онкологической заболеваемости (смертность от рака достигает 125 тыс. на 1 млн человек) и наследственной патологии (каждый десятый родившийся ребенок), однако в последние годы число онкозаболеваний увеличилось на 2—3%.

Профилактика, экстренная помощь и лечение радиационных поражений ^{137}Cs , как и другими радионуклидами, должны проводиться в соответствии со специально разработанными нормативными документами¹⁸. Однако необходимо учитывать, что радиоцезий интенсивно всасывается из кишечника и легких, и эффективность первой помощи зависит от сроков ее проведения. Макси-

мальный эффект достигается, если неотложная помощь оказывается в первые часы после поступления радиоцезия в организм человека.

Неотложная помощь должна быть направлена на выведение поступившего в организм ^{137}Cs и включает промывание желудка, назначение сорбентов (сернистого бария, альгината натрия, полисурмина), рвотных, слабительных, мочегонных средств и дезактивацию кожных покровов. Наиболее эффективное средство для снижения всасывания радиоцезия в кишечнике — специфический сорбент ферроцианид, связывающий радионуклид в неусваиваемую форму. Для ускоренного выведения из организма всосавшегося ^{137}Cs используют стимуляцию естественных процессов удаления радионуклида, а также комплексообразователи (ДТПА, ЭДТА и др.).

* * *

Любая человеческая деятельность, как известно, связана с определенным риском. В районах радиоактивного загрязнения население подвергается хроническому облучению. Дозы облучения регламентируются соответствующими нормативами, учитывающими медицинские, экономические и социальные аспекты. Они должны быть приемлемы как для общества в целом, так и для каждого человека. Возможный риск последствий облучения не должен превышать риска в других отраслях производства. Сегодня, когда будущее цивилизации невозможно без использования ядерной энергии, задача специалистов — свести этот риск к возможному минимуму.

¹⁷ Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Публикация 60. Ч.1. М., 1994.

¹⁸ Подробнее см.: Василенко И.Я. Биологическая опасность продуктов ядерного деления // Природа. 1995. № 5. С.78—87.