

Радиоактивный стронций *

И. Я. Василенко

доктор медицинских наук,

Государственный научный центр — Институт биофизики

О. И. Василенко[†]

доктор физико-математических наук,

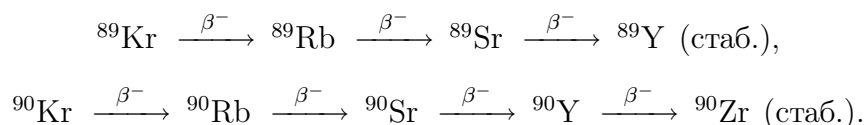
физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова

Стронций (Sr) — элемент 2 группы периодической системы. Природный стронций относится к микроэлементам и состоит из смеси четырёх стабильных изотопов ^{84}Sr (0.56 %), ^{86}Sr (9.96 %), ^{87}Sr (7.02 %), ^{88}Sr (82.0 %). По физико-химическим свойствам он является аналогом кальция и в геохимических процессах его спутником. Кларковое содержание в земной коре оценено как $340 \cdot 10^{-4}$ %. Стронций содержится во всех растительных и животных организмах в количестве $10^{-2} \div 10^{-3}$ % сухой массы. В организме взрослого человека содержится около 0.3 г стронция. Почти весь он находится в скелете. На другие органы приходится лишь 3.3 мг. Суточное поступление с пищей и водой составляет около 1.9 мг. Выводится из организма с фекалиями — 1.5 мг и мочой — 0.34 мг. Физиологическое значение стронция остаётся неясным. Однако, избыточное содержание его в организме становится реальной угрозой развития урвской болезни (болезни Кашина-Бека), проявляющейся в заболевании суставов, повышенной ломкости и уродством костей. Рахитогенное действие стронция связывают с блокированием действия витамина D и избыточным отложением в костях фосфора. Считают, что причиной болезни является также избыточное содержание бария и недостаток кальция в пище. В эндемичных по избыточному содержанию стронция в почве и воде регионах (Восточная Сибирь, Северный Китай, Северная Корея) урвская патология наблюдается не только у людей, но в основном среди животных.

*И. Я. Василенко, О. И. Василенко. “Стронций радиоактивный.” // Энергия: экономика, техника, экология. 2002, N 4, С. 26-32.

[†]E-mail address: vasilenko@depni.sinp.msu.ru

Из радиоактивных изотопов стронция известны нуклиды с массовыми числами $77 \div 83$, 85 , $89 \div 99$. Ядерно-физические характеристики основных радиоизотопов приведены в таблице 1 на с. 12. Наибольший практический интерес представляют ^{89}Sr ($T_{1/2} = 50.5$ сут.) и ^{90}Sr ($T_{1/2} = 29.1$ лет), характеризующиеся большим выходом в реакциях деления урана и плутония (таблица 2 на с. 14). При делении урана и плутония ^{89}Sr и ^{90}Sr образуются в цепочках превращений:



Содержание их в продуктах деления (ПЯД) в зависимости от возраста ПЯД приведено в таблице 3 на с. 15.

1 Источники радиоактивного стронция

Основным источником загрязнения внешней среды радиоактивным стронцием были испытания ядерного оружия и аварии на предприятиях топливно-ядерного цикла. Атмосфера — первичный резервуар ^{89}Sr и ^{90}Sr , откуда радионуклиды поступают на сушу и в гидросферу. Осаждение определяется гравитацией, адсорбцией на нейтральной пыли, постоянно присутствующей в атмосфере, и удалением атмосферными осадками (дождём, снегом). Время пребывания радиоактивных аэрозолей в атмосфере составляет 30–40 суток, в стратосфере — несколько лет. Вследствие различных периодов полураспада соотношение $^{89}\text{Sr} : ^{90}\text{Sr}$ в выпадениях постоянно меняется. В начальный период после взрыва в выпадениях преобладает ^{89}Sr , а затем ^{90}Sr , поскольку отношение активности $^{89}\text{Sr} : ^{90}\text{Sr}$ в начальный период равно 150. В начальный период ^{89}Sr является одним из компонентов загрязнения внешней среды в зонах ближних выпадений радионуклидов. Суммарное количество ^{89}Sr , поступившего в атмосферу, оценивается в 90 ЭБк, а ^{90}Sr в 600 ПБк. В эти величины не входит стронций локальных выпадений. Наблюдалась отчётливо выраженная зональность выпадений, зависящих от особенностей атмосферных течений. За период 1961–1969 гг. в умеренных широтах Северного полушария плотность выпадения ^{89}Sr составила $1.3 \cdot 10^4$ Бк/м², а ^{90}Sr за период 1951–1980 гг. примерно $2.1 \cdot 10^4$ Бк/м².

Источником загрязнения внешней среды, как было отмечено, были и остаются предприятия атомной энергетики. В условиях нормальной эксплуатации АЭС выбросы радионуклидов незначительны. В основном они

обусловлены газообразными радионуклидами (РБГ, ^{14}C , тритием и йодом). В условиях аварий, особенно крупных, выбросы радионуклидов, в том числе радиоизотопов стронция, могут быть значительными. Примером являются известные аварии на промышленном реакторе в Уиндсейле (1957 г.) и ЧАЭС (1986 г.). В Уиндсейле произошёл пожар и выброс и составил соответственно $29.6 \cdot 10^{11}$ и $33.3 \cdot 10^{10}$ Бк. На ЧАЭС в разрушенном реакторе по оценкам могло накопиться $22.6 \cdot 10^{16}$ Бк и $233.1 \cdot 10^{16}$ Бк. Выброс мог составить 4 и 3 % накопленной в реакторе активности. В 1957 г. в результате нарушения режима хранения РАО в ПО "Маяк" произошёл взрыв ёмкости, где хранились радионуклиды в количестве $74 \cdot 10^{16}$ Бк. При взрыве $74 \cdot 10^{15}$ Бк (10 %) активности в виде жидкой пульпы было поднято взрывом на высоту до 1 км. В выброшенной активности на долю ^{89}Sr и ^{90}Sr пришлось 2.2 и 2.5 %, которые обусловили длительное загрязнение больших территорий ряда областей Южного Урала. Образовался Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). В начальный период работы ПО "Маяк" в результате сброса 10^{17} Бк РАО в реку Теча произошло загрязнение её поймы. В сбросах содержались радиоизотопы цезия, стронция и редкоземельных элементов.

2 Процессы миграции

Оценивая опасность загрязнения внешней среды радиоактивным стронцием, следует кратко остановиться на его миграции в природных средах. Выпавший на поверхность Земли радиоактивный стронций включается под влиянием природных факторов в процессы миграции. После атмосферы почва становится его важнейшим депо. Радионуклиды мигрируют в горизонтальном и вертикальном направлениях. На их миграцию существенное влияние оказывают их физико-химические свойства, климатические условия, рельеф местности, вид почвы, гидрологический режим, характер растительности, агрохимические особенности ведения сельского хозяйства и др. ^{90}Sr В глобальных выпадениях ^{90}Sr практически водорастворим и в почве находится в подвижной форме, что имеет принципиальное значение в процессах его миграции.

Кратко остановимся лишь на некоторых вопросах миграции радиостронция в биоценозах, поскольку пища растительного и животного происхождения является основным источником его поступления населению. В процессе миграции радионуклидов по пищевым цепочкам: растения → человек, растения → животные → человек, вода → гидробионты → человек обычно происходит их дискриминация, т.е. изменение содержания в звеньях.

Почва → растения — начальное звено большинства пищевых цепочек экологического цикла переноса радиостронция из внешней среды человеку. В растения радионуклиды могут поступать в результате непосредственного загрязнения наземных их частей в момент выпадения, пылеобразования и поглощения из почвы через корневую систему. Задержка радиоаэрозолей определяется их дисперсностью и видовыми особенностями растений. Коэффициент задержки глобального радиостронция может достигать 25 %. Радиоактивные частицы с растений смываются дождём, сдуваются ветром и т.д. Время их удержания зависит от размера и вида растений. Для умеренного пояса оно составляет 1–5 недель, в среднем 2 недели. Осевший на растения радиостронций всасывается в результате активных биологических процессов. Интенсивность всасывания зависит от растворимости частиц и вида растений и может достигать нескольких процентов.

Усвоение радиостронция из почвы определяется его биологической доступностью и прежде всего растворимостью, агрохимическими свойствами почвы, видом растений. Особое значение имеет содержание в почве обменного кальция. При оценке уровней загрязнения используют отношение $^{90}\text{Sr} : \text{Ca}$, выраженное в стронциевых единицах (1 СЕ = $10 \div 12$ Ки ^{90}Sr на 1 г Ca). Накопление достигает $300 \div 1000$ пКи на 1 мКи/м^2 . В больших количествах стронций накапливается в бобовых, корнеплодах, и в меньшей мере (в 3–7 раз) в злаковых.

Животным радиоактивный стронций в основном поступает с кормом и в меньшей степени с водой (около 2 %). Переход нуклида зависит от его биологической доступности, видовых и возрастных особенностей животных и их физиологического состояния. У молодых животных всасываемость стронция выше. В возрасте нескольких дней она практически достигает 100 %, что связано с высокой проницаемостью стенок кишечника. С увеличением возраста всасываемость снижается. Так у взрослых животных крупного рогатого скота, овец, коз, свиней, кур всасываемость оценивается в $6 \div 16$; $7 \div 10$; $3 \div 14$; 14 ; $50 \div 80$ % соответственно. Максимальная концентрация нуклида в крови регистрировалась у коров, коз и свиней через 12–24; 12 и 6–12 ч. соответственно после поступления стронция в организм. В крови стронций циркулирует в некомплексной форме и лабильно связан с белками.

Стронций относится к типичным остеотропным радионуклидам. По величине отложения нуклида в скелете сельскохозяйственных животных можно расположить в ряд: крупный рогатый скот < козы < овцы < свиньи < куры. Из костной ткани стронций выводится медленно. У молодых животных нуклид выводится значительно быстрее, чем у взрослых. Увеличение содержания кальция в корме ускоряет выведение. Помимо

скелета наибольшая концентрация отмечена в печени и почках, минимальная — в мышцах и особенно в жире, где концентрация в 4–6 раз меньшая, чем в других мягких тканях.

В условиях хронического поступления стронция животным, что имеет практическое значение, кратность накопления (содержание нуклида в организме по сравнению с ежедневным поступлением) зависит от возраста животных и равна $10 \div 20$. Содержание стронция в период равновесного состояния в 1 кг мышц коров, овец, коз, свиней и кур достигает 4, 8, 20, 26 и 45 % суточного поступления. Содержание стронция при хроническом поступлении у взрослых коров, овец, коз, свиней и кур составляло в скелете: 6; 950; 770; 220 и 16; мышцах: 3; 0.2; 0.4; 0.2 и 0.3; других органах: $0.4 \div 0.6$; $0.3 \div 0.6$; $0.2 \div 0.6$; $0.2 \div 0.3$ и $0.2 \div 0.8$ % суточного поступления.

У лактирующих животных стронций в значительных количествах выводится с молоком. Суточное выведение у коров разной продуктивности достигает $0.2 \div 5$ %, у коз 1.3 %, овец $1 \div 6$ % в 1 литре от суточного поступления. Из глобальных выпадений содержание ^{90}Sr в молоке колеблется от $0.3 \div 0.8$ % в 1 л суточного поступления. Переход ^{90}Sr из корма в молоко коров оценивается в 0.1 % на 1 л удоя, а при хроническом поступлении нуклида в $0.2 \div 0.3$ % в 1 литре. Переход ^{90}Sr из рациона в яйцо не превышает 40 % суточного поступления радионуклида, а у низкопродуктивных кур может достигать 60 %. Содержание стронция в скорлупе достигает 96 %, в желтке и белке содержится соответственно 3.5 и 0.2 %.

Содержание стронция в гидробионтах зависит от концентрации нуклида в воде и степени её минерализации. Так у рыб Балтийского моря содержание стронция в 5 раз больше, чем у рыб Атлантического океана. Коэффициент накопления достигает $10 \div 100$, в основном стронций депонируется в скелете.

3 Биологическое действие (кинетика обмена, токсичность, клиника поражений, отдаленные последствия)

Биологическому действию радиоактивного стронция посвящены многочисленные публикации отечественных и зарубежных авторов. Однако, многие вопросы, особенно биологической опасности малых количеств стронция в условиях хронического его поступления человеку остаются недостаточно исследованными. Об опасности малых доз ионизирующих излучений имеются противоречивые суждения и эта проблема была и

остаётся одной из наиболее сложных в радиобиологии и радиационной медицине.

Радиоактивный стронций относится к остеотропным биологически опасным радионуклидам. Как чистый бета-излучатель основную опасность он представляет при поступлении в организм. В таблице 4 на с. 15 для сравнения приведена токсичность ^{89}Sr , ^{90}Sr и других биологически значимых α - и β -излучающих радионуклидов. Населению нуклид в основном поступает с загрязнёнными продуктами. Ингаляционный путь имеет меньшее значение. Не исключается поступление нуклида через раневые и ожоговые поверхности. Растворимые соединения стронция хорошо всасываются в кишечнике. Резорбция зависит от возраста человека, физиологического состояния, характера питания и особенно содержания в рационе кальция. Она колеблется от 10 до 60 %. В больших количествах стронций всасывается у детей. Для взрослого человека МКРЗ рекомендует величину всасывания равной 30 %. Радиостронций избирательно откладывается в костях, особенно у детей, подвергая кости и заключённый в них костный мозг постоянному облучению. В костях стронций накапливается неравномерно. В эпифизе и метафизе первоначальная концентрация нуклида примерно в 2.5 раза выше, чем в диафизе. В других органах и тканях стронций депонируется в значительно меньших количествах.

Выводится стронций из организма в основном через кишечник. Кинетику выведения можно описать суммой трёх экспонент: 73, 10 и 17 % с периодом соответственно 3, 44 и 4000 суток. Быстро выводящийся компонент отражает выведение нуклида из мягких тканей, медленно выводящийся — из скелета.

Биологическое действие радиоактивного стронция многообразно и связано с распределением поступившего в организм нуклида и формируемых доз. При поступлении равных количеств ^{89}Sr и ^{90}Sr величины поглощённых доз и время их формирования различны, что связано с большим периодом полураспада ^{90}Sr и высокой β -энергией его дочернего нуклида ^{90}Y ($E_{\beta} = 2.26$ МэВ). При поступлении ^{89}Sr доза формируется в течение сравнительно короткого времени, а при поступлении ^{90}Sr в течение многих лет. Дозовые коэффициенты E для ^{89}Sr и ^{90}Sr равны соответственно для быстро выводящей фракции $1.0 \div 9$ и $2.4 \div 9$ Зв/Бк и для медленно выводящей — $7.5 \div 9$ и $1.5 \div 7$ Зв/Бк. Спустя 1 год доза от стронция ^{90}Sr в десять раз большая, а через 20 лет в 150 раз, чем от ^{89}Sr .

Биологическое действие радиоактивного стронция исследовали на многих видах животных. Практический интерес представляют опыты на собаках, поскольку радиочувствительность их примерно такая же, как и у человека. При поступлении в организм остроэффективных количеств

развивалась картина острого лучевого поражения с типичными гематологическими нарушениями. Острые поражения у собак развивались при поступлении $3.7 \div 11.1 \cdot 10^7$ Бк/кг массы тела. При поступлении радиостронция в 100 раз меньших количествах наблюдали хроническое лучевое поражение с соответствующими гематологическими нарушениями, развитием лейкозов и костных опухолей в отдалённые сроки.

Особый практический интерес представляет хроническое поступление радиостронция животным. В опытах на собаках, получавших в течение 2–3 лет ежедневно ^{90}Sr в количествах $3.7 \cdot 10^3$ Бк/кг массы тела развивалось хроническое поражение с индукцией лейкозов и остеосарком. При введении $7.4 \cdot 10^2$ Бк/кг ежедневно в течение 2–3.5 лет регистрировали увеличение в 3–5 раз числа доброкачественных и злокачественных опухолей, в том числе в эндокринных органах и молочных железах. У потомства отмечена пониженная жизнеспособность. Следует отметить трудоёмкие исследования на крысах. Животные в течение всей жизни ежедневно получали ^{90}Sr в количестве 5, 4, 2, 1, 0.5; 0.05, 0.005, 0.0005, 0.00005 мкКи на крысу. Начальные изменения костных структур к концу их жизни выявлены у животных, получавших ежедневно по 0.05 мкКи стронция. Минимальное ежедневно вводимое количество, которое способствовало развитию сосудистых, воспалительных, дистрофических, новообразовательных процессов и снижало продолжительность жизни животных, составляло 0.5 мкКи ^{90}Sr . Максимальная величина поглощённой дозы, приводящая к снижению числа ядросодержащих клеток в костном мозге, соответствовала 10 Гр, а минимальная бластомогенная доза — 40 Гр. Продолжительность жизни снижается при дозах свыше 40 Гр.

Из приведённых данных следует, что у собак и крыс патологические нарушения регистрировались при достаточно больших дозах.

4 Облучение населения

Техногенное радиоактивное загрязнение внешней среды стало источником хронического внешнего и внутреннего облучения населения. Облучение, как правило, носит комбинированный характер — сочетание внешнего и внутреннего сложными смесями радионуклидов. Свой вклад в облучение вносят и радиоизотопы стронция (таблица 5 на с. 16). Дозы облучения за счёт глобального ^{90}Sr невелики (таблица 6 на с. 18). Ожидаемые дозы облучения за счёт ингаляционного поступления радионуклида в легкие также небольшие. Они составляют для всего Земного шара, умеренных широт Северного и Южного полушарий соответствен-

но $4.7 \cdot 10^{-5}$; $1.2 \cdot 10^{-4}$ и $3.4 \cdot 10^{-5}$ Гр. Пикового значения 150 мкЗв эффективная доза достигла в 1963 году. К 2000 году доза снизилась до ≈ 5 мкЗв и обусловлена находящимися в окружающей среде ^{14}C , ^{90}Sr , ^{137}Cs . Годовые дозы в период из максимального значения не превышали 7 % фонового уровня. Облучение в таких дозах не могло вызвать острых хронических поражений. О токсичности радиоактивного стронция по данным экспериментальных исследований было сказано выше. Отметим, что предел годового поступления ПГП ^{89}Sr и ^{90}Sr составляет $2.7 \cdot 10^6$ и $8.9 \cdot 10^5$ Бк/год и допустимая объёмная концентрация ДОА — $1.1 \cdot 10^3$ и $33 \cdot 10^2$ Бк/м³.

Более высокие дозы облучения населения были в районах ближних выпадений радионуклидов при наземных ядерных взрывах. В СССР проведено 32 наземных взрыва, из них 30 на Семипалатинском полигоне, из них при четырёх за пределами полигона в ближней зоне сформировались локальные радиоактивные следы. В зоне выпадений радионуклидов оказался 41 населённый пункт. Дозы облучения населения характеризовались широким диапазоном. В одиннадцати пунктах они превысили 15 мГр и в пяти — 100 мГр. Максимальные дозы достигали $1.5 \div 1.9$ Гр. Дозы формировались в основном за счёт короткоживущих радионуклидов, среди них особое значение имели радиоизотопы йода. Облучение в таких дозах могло вызвать лучевую реакцию, а при максимальных дозах не исключается развитие острого лучевого поражения лёгкой степени. Жители подверглись и внутреннему облучению радионуклидами, поступившими в организм с молоком, овощами, мясом. Дозы облучения щитовидной железы радиоизотопами йода у взрослых могли быть в пределах $100 \div 250$ мГр, а у детей $0.4 \div 3.4$ Гр.

В подавляющем большинстве населённых пунктов дозы облучения были на уровне доз от глобальных выпадений, которые по оценкам НК-ДАР в среднем составляли 4.5 мЗв. Вклад внутреннего облучения за счёт перорального и ингаляционного поступлений радионуклидов и внешнего облучения составил соответственно 72, 5 и 24 %. Основное значение в длительном формировании доз имели ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Загрязнение при радиационных авариях обычно носит локальный характер, за исключением аварии на ЧАЭС. При аварии в Кыштыме, благодаря принятым мерам защиты, включая отселение населения с наиболее загрязнённых территорий, случаев острых радиационных поражений не было зарегистрировано. Дозы внешнего облучения могли составить $0 \div 17$ сГр, ЖКТ — $0.7 \div 150$ сГр, красного костного мозга — $0.5 \div 0.7$ сГр, лёгких — $0.1 \div 2.7$ сГр, эффективная доза — $0.4 \div 52$ сГр. При аварии на ЧАЭС распространение выброшенных радионуклидов приняло практически глобальный характер. Дозы внешнего облучения населения в

районах радиоактивного загрязнения не превышали десятков мГр. Основную опасность в начальный период представляло поступление радиоактивного йода с пищей. Тиреоидная патология, особенно у детей, стала определяющей. Дозы облучения щитовидной железы в отдельных случаях достигали единиц грей. В подавляющем большинстве случаев они были ниже. После распада радиоактивных изотопов йода основным источником внешнего и внутреннего облучения стал радиоактивный цезий. Доля стронция в облучении значительно меньше.

5 Профилактика. Неотложная помощь

1. В регионах радиоактивного загрязнения меры защиты населения должны быть направлены
 - на снижение содержания радионуклидов в растительных и животных продуктах питания с помощью агромелиоративных и зооветеринарных мер. У животных, получавших сорбенты стронция (сульфат бария, бентонит и на их основе модифицированные препараты), при аварии на ЧАЭС с помощью указанных мер удавалось добиться 3–5 кратного снижения депонирования радионуклидов в костной ткани животных;
 - на технологическую переработку загрязнённого сырья;
 - на кулинарную обработку пищевых продуктов, замену загрязнённых пищевых продуктов на чистые.
2. При работе с радиоактивным стронцием необходимо соблюдать санитарные правила и нормы радиоактивной безопасности с применением специальных мер защиты в соответствии с классом работ.
3. Неотложная помощь при загрязнении кожных покровов: обработка 5 % раствором пентамина, 5 % раствором $\text{Na}_2\text{-ЭДТА}$, раствором лимонной или соляной кислоты, препаратом "Защита", пастой НЭДЭ, моющими порошками, мылом.
4. При пероральном поступлении радиостронция назначают адсорбент или сернокислый барий 25.0:200.0, альгинат натрия 15.0:200.0, полисурмин 4.0:200.0. Обильное промывание желудка, рвотные средства, мочегонные, клизмы. При поступлении радиостронция в органы дыхания — обильное промывание носоглотки и полости рта, отхаркивающие и те же средства, что и пероральном поступлении нуклида.

5. В условиях хронического поступления радиостронция для снижения его всасывания назначают альгисорб — модифицированный альгинат кальция: взрослым и детям старше 14 лет по 5.0 г 3 раза в день, детям от 6 до 14 лет по 3.0 г 3 раза в день, детям от 1 года до 6 лет по 1.5 г 4 раза в день.
6. Все защитные мероприятия следует проводить под постоянным дозиметрическим контролем внешней среды, оценки внешнего загрязнения и поступления радионуклидов в организм.
7. В профилактике последствий облучения большое внимание следует уделять повышению резистентности организма пострадавших (рациональное питание, здоровый образ жизни, спорт и др.)

6 Заключение

Радиоактивный стронций (^{89}Sr и ^{90}Sr) относится к биологически значимым радионуклидам и характеризуется высокой токсичностью. Его доля в глобальном радиоактивном загрязнении внешней среды и облучении населения значительна. Облучение носит хронический комбинированный характер. Дозы облучения в подавляющем большинстве случаев можно отнести к категории малых с низкой мощностью дозы. Об опасности облучения в таких дозах существуют противоречивые суждения. МКРЗ, НКДАР при ООН, НКРЗ РФ считают, что облучение в любой дозе отличной от нуля (даже при повреждении всего одной клетки) может в отдалённые сроки проявиться в форме стохастических эффектов — злокачественных новообразований и генетических нарушений. Численное значение их крайне мало. По мере увеличения тканевых доз повреждается всё больше клеток и увеличивается вероятность появления стохастических эффектов. Такой подход к оценке малых доз ионизирующих излучений остаётся лишь гипотезой. Прямые доказательства её отсутствуют. Напротив, имеются данные, что и для стохастических эффектов существует порог, что соответствует общебиологическим законам природы. В организме в процессе эволюции выработались и генетически закрепились системы защиты, обеспечивающие гомеостаз организма. Вредное действие различных агентов, в том числе ионизирующих излучений, начинает проявляться после превышения порога. Для детерминированных эффектов порог установлен. Установление величины порога для стохастических эффектов имеет важное практическое значение, было и остаётся одной из наиболее актуальных проблем радиобиологии.

Таблица 1

**Ядерно-физические свойства
основных радиоактивных изотопов стронция**

Радио- нуклид	T _{1/2}	Тип распада	Средняя энергия излучения, МэВ/(Бк·с)		Дочерний радио- нуклид (выход)
			характери- стическое, γ- и аннигиля- ционное излучение	β-излучение, конвер- сионные электроны и электроны Оже	
⁸⁰ Sr	100 мин.	3Э	8.00 · 10 ⁻³	5.46 · 10 ⁻³	⁸⁰ Rb радиоакт.
⁸¹ Sr	25.5 мин.	3Э, β ⁺	1.38	9.96 · 10 ⁻¹	⁸¹ Rb радиоакт.
⁸² Sr	25 сут.	3Э	7.87 · 10 ⁻³	5.40 · 10 ⁻³	⁸² Rb радиоакт.

^{83}Sr	32.4 час.	$3\text{Э}, \beta^+$	$7.79 \cdot 10^{-1}$	$1.49 \cdot 10^{-1}$	^{83}Rb радиоакт.
^{85m}Sr	69.5 мин.	$3\text{Э}, \text{ИП}$	$2.19 \cdot 10^{-1}$	$1.22 \cdot 10^{-2}$	^{85}Sr радиоакт. (0.879) ^{85}Rb стаб.
^{85}Sr	64.84 сут.	3Э	$5.11 \cdot 10^{-1}$	$8.97 \cdot 10^{-3}$	^{85}Rb стаб.
^{87m}Sr	2.805 час.	$3\text{Э}, \text{ИП}$	$3.20 \cdot 10^{-1}$	$6.69 \cdot 10^{-2}$	^{87}Rb радиоакт. ($3 \cdot 10^{-3}$) ^{87}Sr стаб. (0.997)
^{89}Sr	50.5 сут.	β^-	$8.45 \cdot 10^{-5}$	$5.83 \cdot 10^{-1}$	^{89}Y стаб.
^{90}Sr	29.12 лет	β^-	—	$1.96 \cdot 10^{-1}$	^{90}Y радиоакт.
^{91}Sr	9.5 час.	β^-	$6.93 \cdot 10^{-1}$	$6.55 \cdot 10^{-1}$	^{91m}Y радиоакт. (0.578) ^{91}Y радиоакт. (0.422)
^{92}Sr	2.71 час.	β^-	1.34	$1.96 \cdot 10^{-1}$	^{92}Y радиоакт.

Таблица 2

**Выход ^{89}Sr и ^{90}Sr (%)
в реакциях деления урана и плутония**

Ра- дио- нук- лид	$T_{1/2}$	Энергия, МэВ		^{235}U (мед- ленные нейт- роны)	^{235}U (быс- трые нейт- роны)	^{239}Pu (быс- трые нейт- роны)	Оценка по глоба- льным выпа- дениям
		β - час- тицы ($E_{\text{макс}}$)	γ - излу- чение				
^{89}Sr	50.5 сут.	1.46	—	4.79	4.15	1.44	2.6
^{90}Sr	29.12 лет	0.54	—	5.57	4.38	2.23	3.5

Таблица 3

**Содержание ^{89}Sr и ^{90}Sr в продуктах деления
в зависимости от возраста (в % β -активности)**

Радио- нуклид	Возраст продуктов									
	1 ч.	1 сут.	10. сут.	1 мес.	5 мес.	1 год	5 лет	10 лет		
^{89}Sr	0.006	0.228	2.74	6.7	8.37	1.97	—	—	—	—
^{90}Sr	3.1 ÷ 5	0.001	0.02	0.106	0.68	3.0	27.44	47.08	—	—

Таблица 4

**Количество радионуклидов,
вызывающее 50 % гибель крыс
в течение 30 суток (СД_{50/30})**

Радио- нуклид	Количество, кБк/г	Радио- нуклид	Количество, кБк/г
⁸⁹ Sr	166	¹⁴⁰ La	526
⁹⁰ Sr	55	¹⁴⁴ Ce	126
⁹⁰ Y	259	¹⁴⁷ Pm	259
⁹¹ Y	136	²³⁷ Np	0.01
⁹⁵ Nb	311	²³⁹ Pu	2.18
¹⁰⁶ Ru	136	²⁴¹ Am	4.07
¹³¹ I	148	²⁴⁴ Cm	4.07
¹³⁷ Cs	80	²⁵² Cf	0.44
¹⁴⁰ Ba	74		

Таблица 5

**Вклад важнейших радионуклидов
в облучение населения Земли
вследствие ядерных испытаний в атмосфере**

Радионуклид	Ожидаемая эффективная эквивалентная доза, мкЗв	Вклад в суммарную дозу, %
¹⁴ C	2600	69*
¹³⁷ Cs	540	14
⁹⁵ Zr	200	5.3
⁹⁰ Sr	120	3.2
¹⁰⁶ Ru	83	2.2
¹⁴⁴ Ce	54	1.4
³ H	47	1.2
¹³¹ I	33	0.9
²³⁹ Pu	27	0.7
Все прочие	86	2
Всего (округленно)	3790	100

* Ожидаемая доза за счёт ^{14}C будет формироваться в течение тысяч лет. Доля этой дозы, накопленной к 2000 году, составила 7.7 % от приведённого в таблице 5 значения.

Таблица 6

**Ожидаемые дозы за счёт
перорального поступления ^{90}Sr**

Район	Ожидаемая доза (10^{-4} Гр)		Ожидаемая коллективная доза (105 чел.·Гр)	
	Костный мозг	Клетки, высти- лающие костные поверх- ности	Костный мозг	Клетки, высти- лающие костные поверх- ности
Весь земной шар	5.7	13	23	50
Северное полушарие	6.2	14	22	49
Южное полушарие	1.6	3.4	0.7	1.5
Умеренная зона Северного полушария (40–50°)	9.4	21	5.2	11
Умеренная зона Южного полушария (40–50°)	2.6	5.7	0.01	0.02