

Т Р У Д Ы
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
МОСКОВСКОГО ОБЩЕСТВА
ИСПЫТАТЕЛЕЙ ПРИРОДЫ

Выпуск 2

СВЕРДЛОВСК,
1959

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

*Н. С. Тураев (отв. редактор), Н. К. Дексбах,
Н. В. Тимофеев-Ресовский, С. С. Шварц.*

«О ПРЕДЕЛЬНО-ДОПУСТИМЫХ НОРМАХ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДЫ И ВОЗДУХА»

1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНО-ДОПУСТИМЫХ СОДЕРЖАНИЙ РАДИОАКТИВНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ВОДЕ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЫТОВ.

*Н. В. Горбатюк, Н. В. Тимофеев-Ресовский**

1. Введение

Быстрыми темпами нарастающее расширение атомной промышленности влечет за собой значительное накопление радиоактивных продуктов работы ядерного реактора, утилизация которых, в ряде случаев, может вызвать известные загрязнения водоемов и воздуха на самом производстве или на граничащей с ним территории. Радиоактивные вещества с водой, пищевыми продуктами или с воздухом в этих условиях могут систематически попадать внутрь организмов животных или людей и, этим самым, создавать все увеличивающуюся опасность хронического или острого облучения их.

В связи с этим возникает необходимость пересмотра существующих до сих пор, в основе своей часто формальных или слабо обоснованных результатами соответствующих биологических опытов, норм предельно-допустимых радиоактивных загрязнений воды, пищевых продуктов и воздуха; такие нормы в ряде случаев могли быть чрезмерно заниженными или же завышенными.

Целью настоящей работы является попытка определения предельно-допустимых норм радиоактивного загрязнения воды и воздуха отдельными изотопами или смесью их, исходя из данных опытов относительно поведения радиоактивных веществ, введенных внутрь организма, и их действия.

В существующей литературе по предельно-допустимым нормам содержания радиоактивных изотопов в воде и воздухе рассматривается сравнительно простая общая методика определения этих норм для некоторых предельных случаев с использованием, так называемого, «биологического полупериода» радиоактивного вещества, принимаемого в качестве постоянной величины. Опыты, однако, показали, что этот, так называемый, «биологический полупериод» является функцией времени пребывания данного вещества в организме. В соответствии с этим и методика расчетов этих норм значительно усложняется.

*) В этой работе принимал большое участие А. З. Кач, за что авторы приносят ему благодарность.

Отсутствие экспериментально обоснованных данных о предельно-допустимых нормах содержания основных осколков в воде и воздухе, представляющих большой практический интерес, побудило нас уже сейчас воспользоваться нашими, хотя и недостаточно полными токсикологическими исследованиями, с одной стороны, и данными распределительных опытов, с другой стороны, для более или менее обоснованного расчета этих предельно-допустимых норм. При этом мы не стремились к теоретическому обобщению методов расчета, а преследовали чисто практическую цель определения соответствующих величин на базе экспериментальных данных. При отсутствии необходимых экспериментальных данных (напр., данных по ингаляции различных элементов) мы принимали определенные, более или менее обоснованные, предположения о возможном характере поведения этих элементов при введении их в дыхательные пути.

При определении степени биологической вредности радиоактивности, попавшей в организм перорально или при ингаляции, первой проблемой, требующей решения, является определение количества радиоактивного вещества в организме, не представляющее опасности для нормальных функций организма в целом в течение всей дальнейшей его продолжительности жизни.

Очевидно, что это количество активности следует определять по предельно-допустимому содержанию радиоактивности в том органе, который подвергается наибольшему облучению вследствие избирательных свойств этого органа относительно введенного радиоактивного вещества. Решение последующей задачи, т. е. определение предельно-допустимых норм активного загрязнения воды, пищевых продуктов и воздуха, через которые может происходить накопление в организме изотопов, помимо физических и химических свойств излучателей, зависит также и от ряда биологических факторов. Из них особую важность представляют следующие:

а) степень всасывания изотопа из желудочно-кишечного тракта при пероральном введении и из легких—при ингаляционном введении;

б) избирательная способность каждого из органов по отношению к резорбированной организмом активности;

в) скорости накопления изотопов в данном органе и выделения из него;

г) характер распределения отложенной в органе радиоактивности;

д) биологический эффект радиоактивности, при прохождении ее через желудочно-кишечный тракт при пероральном введении или через легкие при ингаляционном введении;

е) радиочувствительность организма в целом и биологическая роль органов, в которых происходит преимущественное накопление изотопа.

Предельно-допустимое содержание активности в наиболее облучаемом органе, по которому ведется расчет допустимых количеств для однократного или хронического введения, в первом приближении, можно вычислить, исходя из равномерного распределения изотопов в нем. В последующих расчетах, однако, этот факт нужно учесть и сделать, если возможно, соответствующие поправки на неравномерное распределение. Это особенно относится к распределению гамма излучателей, т. к. вызываемая ими доза излучения в сильной степени зависит от геометрического фактора.

Во второй части этой статьи приводятся методика и результаты определения предельно-допустимых норм радиоактивного загрязнения воды по экспериментальным данным токсикологических опытов и результаты определения предельно-допустимых норм радиоактивного загрязнения воздуха.

2. Предельно-допустимые содержания радиоактивных изотопов в отдельных органах человека

а) Общие основы

При расчете предельно-допустимых количеств радиоактивности отдельных изотопов при хронической интоксикации, т. е. при ежедневном или непрерывном введении в организм человека, и последующего определения предельно-допустимых норм радиоактивного загрязнения воды и воздуха мы будем исходить из содержания активности в тех органах, в которых раньше всего достигается доза излучения, равная предельно-допустимой для общего облучения, т. е. для альфа-излучателя — 0,005 ф.э.р. в день или 0,05 ф.э.р. в день для бета- и гамма-излучателя. Такой подход к разработке предельно-допустимых норм радиоактивного загрязнения воды и воздуха позволит избежать возможного переоблучения даже наиболее облучаемых органов. Интегральная доза облучения организма при инкорпорации установленных таким путем, предельно-допустимых количеств активности будет всегда меньше интегральной дозы при внешнем равномерном облучении предельно допустимой дозой.

В дальнейшем количества активности, вызывающие в данном органе дозы излучения, равные предельно-допустимой при общем внешнем облучении, мы будем называть предельно-допустимыми содержаниями в данном органе.

Опыты по введению изотопов внутрь организма животного показали, что, как правило, органами с наибольшей концентрацией радиоактивности являются скелет и печень.

При длительном пероральном введении некоторых изотопов наиболее поражаемым органом могут быть также и стенки желудочно-кишечного тракта, а при ингаляционном введении — легкие.

По данным разных авторов (см., напр., Шуберт, 1951 г.) вес этих органов для человека среднего возраста весом в 70 кг и высотой 170 см будет следующий:

Скелет	7 кг.
Печень	1,7 кг.
Легкие	0,95 кг.
Желудочно-кишечный тракт (без содержания)	2,3 кг.

Для этих органов мы и вычислим предельно-допустимые содержания изотопов и их смеси.

б) Методика расчетов для чистых альфа и бета-излучателей

Как известно, дневная доза альфа- и бета-излучения, при равномерном распределении изотопа в органе, может быть вычислена по уравнению,

$$D = \frac{A_1 3,7 \cdot 10^4 \cdot \bar{E} \cdot 10^6 \cdot 86400 T (1 - e^{-0,693/T})}{M \cdot W \cdot K \cdot 0,693} \text{ ф.э.р.} \quad (1)$$

где A_1 — количество активности в микроюри, отложенной в органе,

M — масса органа в граммах;

T — период полураспада изотопа в днях;

\bar{E} — средняя энергия излучения в мегаэлектронвольтах;

W — расход энергии излучения на образование одной пары ионов в воздухе (для альфа-частиц=35 eV и для бета-частиц=32,5 eV Грэй, 1937);

K — число пар ионов, возникающих в 1 г воздуха при поглощении излучения в 1 ф.э.р. ($K = 1,61 \cdot 10^{12}$).

Уравнение (1) можно представить в более простом виде:

$$\text{где } D_1 = \frac{A_1 \Delta_1 \cdot T (1 - e^{-0,693/T})}{M \cdot 0,693}, \quad (2)$$

$$A_1 = \frac{3,7 \cdot 10^4 \bar{E} \cdot 10^6 \cdot 86 \cdot 00}{W \cdot K}, \quad \text{ф.э.р./сутки}$$

— есть мощность дозы при концентрации изотопа в 1 микрокюри грамм ткани.

Решая уравнение (2) относительно A_1 , получим:

$$A_1 = \frac{D_1 \cdot M \cdot 0,693}{\Delta_1 \cdot T \cdot (1 - e^{-0,693/T})} \text{ микрокюри.} \quad (3)$$

Если дневную дозу D_1 положить равной 0,005 ф.э.р. для альфа-излучателей и 0,05 ф.э.р. для бета-излучателей, то A_1 в уравнении (3) будет означать предельно-допустимое содержание радиоактивности чистого альфа- или бета-излучателя в органе человека при равномерном распределении.

Для излучателей с очень большим периодом полураспада ($T \rightarrow \infty$) уравнение (3) может быть записано в следующем виде:

$$A_1 = \frac{D_1 M}{\Delta_1} \text{ микрокюри} \quad (4)$$

Так как большинство бета-излучателей являются также и гамма-излучателями, то при определении предельно-допустимых содержаний в органе таких смешанных излучателей нужно учесть, хотя бы приближенно, также и облучение данного органа гамма-лучами от активности распределенной по всему организму. Расчеты показывают, что при локальном отложении бета-гамма-излучателя доза гамма-излучения составляет лишь незначительную часть дозы бета-излучения, поэтому в ряде случаев мы не сделаем большой ошибки, если определим дозу гамма-облучения данного органа, исходя из равномерного распределения гамма-излучения по всему организму, так как строгий расчет чрезвычайно затруднен сложной геометрией излучателя.

в) Методика расчетов для гамма и бета—гамма-излучателей

Для вычисления предельно-допустимого содержания в организме человека гамма-излучателя, распределенного равномерно, мы воспользовались данными таблицы Буша (Буш, 1949), в которой приводятся интегральные дозы, создаваемые в организме человека гамма-излучением, гамма — постоянная которого равна 8,3 рентгена в час на милликюри и на 1 см расстояния. В данных этой таблицы учтены поправки на поглощение излучения и форму тела человека. По этой таблице легко вычисляется средняя мощность дозы, создаваемая любым гамма-излучателем, распределенным равномерно в организме человека. Эта средняя мощность дозы будет равна интегральной дозе, взятой из таблицы Буша для соответствующего веса и высоты человека, деленной на вес человека и умноженной на отношение гамма—постоянной данного излучателя и гамма—постоянной, равной 8,3.

Средняя мощность дозы, создаваемая каким-либо гамма-излучателем, распределенным равномерно по всему объему человека весом 70 кг и высотой 170 см, с концентрацией в 1 микроюри на грамм ткани по этой таблице будет равна:

$$\Delta\gamma = \frac{73 \cdot 4 \cdot 10^6 \cdot K \cdot 10^{-3}}{7 \cdot 10^4 \cdot 8 \cdot 3} = 0,126 \text{ К рентген/час} = 3,03 \text{ К рентген/день} \quad (5)$$

где К — гамма-постоянная данного излучателя, т. е. мощность дозы в рентгенах в час от точечного источника в 1 миллиюри на расстоянии 1 см.

Предельно-допустимое содержание в органе человека гамма-излучателя согласно уравнению (3) приближенно будет равно:

$$A_2 = \frac{0,05 \cdot M \cdot 0,693}{\Delta\gamma \cdot T \cdot (1 - e^{-0,693/T})} \quad (6)$$

Так как обычно бета-излучатель является одновременно и гамма-излучателем, то предельно-допустимое содержание такого смешанного излучателя вычисляется при помощи следующих простых рассуждений:

1 микроюри составляет $1/A_1$ предельно-допустимых содержаний по бета-излучению и $1/A_2$ предельно-допустимых содержаний по гамма-излучению, т. е. $\frac{1}{A} = \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} = \frac{A_1 + A_2}{A_1 \cdot A_2}$; отсюда предельно-допустимое содержание смешанного бета- и гамма-излучателя будет равно:

$$A = \frac{A_1 \cdot A_2}{A_1 + A_2} = \frac{0,05 \cdot M \cdot 0,693}{(\Delta_1 + \Delta\gamma) \cdot T \cdot (1 - e^{-0,693/T})} \text{ микроюри} \quad (7)$$

В таблице 1 наряду с основными физическими данными, приведены предельно-допустимые содержания основных «осколочных» изотопов в некоторых органах человека. Эти предельно-допустимые содержания активности в органе указывают, в основном, верхний предел накопления активности в данном органе при разовом или многократном введении превышение которого ведет к превышению предельно-допустимых норм облучения данного органа. Эти данные позволяют вычислить предельно-допустимые нормы для ежедневного или хронического введения изотопа внутрь организма, с учетом селективного накопления его в органе и выделения из него с течением времени. Правда, все это совершенно справедливо будет лишь для альфа- и бета-излучения, ввиду практического поглощения этих излучений вблизи места их возникновения.

Для гамма-излучателей, строго говоря, эти величины предельно-допустимых содержаний активности в органе являются лишь ориентировочными, ввиду сильной зависимости от изменения геометрии распределения, связанной с большим или меньшим преимущественным накоплением изотопа в данном органе. Поэтому для рассмотренных здесь растворов смешанных бета- и гамма-излучателей нужно будет внести соответствующие поправки, путем рассмотрения наиболее эффективной геометрии. В нашем случае это будет сделано при рассмотрении предельно-допустимых норм введения в желудочно-кишечный тракт.

Опыты по внутривенному введению животным различных элементов показали, что наибольшими избирательными способностями по отношению к основным «осколочным» изотопам обладают скелет и печень. Поэтому мы прежде всего проведем расчет предельно-допустимых норм для ежедневного введения отдельных изотопов; исходя из предельно-допустимых содержаний активности именно в этих органах. Расчеты проведем для случая перорального введения, которыми мы в дальнейшем воспользуемся для оценки предельно-допустимых норм активного загрязнения воды.

Таблица 1.

Предельно-допустимые содержания активности в органах человека

Изотоп	Тип излучения	Период полураспада Т	Максимальная энергия частиц MeV	Средняя энергия частиц MeV	Энергия гамма-излучения MeV	Гамма—постоянная (рентген в час на 1 мил. юри и 1 см расстояния)	Предельно-допустимое содержание изотопа в микроюри			
							в скелете	в печени	в легких	в стенках желудочно-кишечного тракта
Плутоний 239 . . .	α	2,411 · 10 ⁴ лет	5,15	5,15	—	—	0,12	0,029	0,016	0,04
Стронций 89 . . .	β	54,5 дня	1,463	0,574	—	—	10	2,43	1,35	3,28
Стронций 90 . . .	„	30 лет	0,61	0,211	—	—	5,1	1,24	0,7	1,68*)
Иттрий 90 . . .	„	60,5 часа	2,18	0,905	—	—	7,2	1,75	0,98	2,38
Иттрий 91 . . .	„	61 день	1,537	0,606	—	—	9,43	2,29	1,28	3,11
Цирконий 95 . . .	β, γ	65 дней	0,394 (98%) 1,0 (2%)	0,126	0,23 (93%) 0,73 (93%) 0,92 (7%)	5,5	8,62	2,2	1,17	2,85*)
Ниобий 95 . . .	„	37 дней	0,146	0,042	0,758	4,5	21,85	5,31	2,97	7,21
Рутений 106 . . .	β	290 дней	0,03	0,008	—	—	3,92	0,96	0,54	1,30*)
Родий 106 . . .	β, γ	30 сек.	2,3 (18%) 3,55 (82%)	1,37	0,51 (17%) 0,73 (17%) 1,25 (1; 5%)	1,38	—	—	—	—
Цезий 137 . . .	„	33 года	0,521 (95%) 1,2 (5%)	0,175	0,663	3,7	15,93	3,87	2,19	5,26
Барий 140 . . .	„	12,8 дня	0,34 (25%) 1,04 (75%)	0,296	0,529 (25%)	0,79	4,65	1,13	0,63	1,54*)
Лантан 140 . . .	„	40 часов	1,32 (70%) 1,67 (20%) 2,26 (10%)	0,55	0,34 (2%) 0,84 (12%) 0,49 (6%) 1,67 (75%) 2,3 (5%)	7,68	7,49	1,82	1,02	2,47
Церий 144 . . .	„	275 дней	0,348	0,103	—	—	4,23	1,03	0,58	1,4*)
Празеодим 144 . . .	„	17;5 мин.	3,03	1,242	—	0,12	По экспериментальным данным	5,87	3,29	7,97
Рутений 103 . . .	„	45 дней	0,68 (8%) 0,15 (92%)	0,097	0,52 (92%)	2,85	24,2	—	—	—
Прометий 147 . . .	β	3,7 лет	0,2232	0,062	—	—	91,85	22,32	12,5	30,31
Европий 155 . . .	β, γ	1,7 лет	0,23	0,064	0,084	0,46	65,65	17,46	8,93	21,67

*) В равновесии с дочерним продуктом.

3. Предельно-допустимые количества радиоактивных изотопов для хронического перорального введения

Опыты по пероральному введению различных изотопов, проводившиеся, главным образом, на белых крысах, показали, что всасывание из желудочно-кишечного тракта весьма различное для разных элементов. В значительной степени всасываются цезий (100%), стронций (8—60%) и барий (5—40%). Остальные «осколочные» элементы всасываются гораздо меньше (1—1,5%). Опыты по внутривенному введению показали, что наибольшие количества некоторых «осколочных» изотопов попадают в скелет или печень, создавая там максимальные концентрации активности.

Отложения в остальных органах большинства рассматриваемых элементов, сравнительно, настолько незначительны, что их можно не рассматривать.

В таблице 2 приводятся данные относительно всасывания из желудочно-кишечного тракта и накопления в скелете и печени основных изотопов при пероральном введении. Из этой таблицы видно, что наиболее сильное облучение скелета при пероральном введении вызывают строн-

Таблица 2.

Всасывание из желудочно-кишечного тракта некоторых элементов при пероральном введении и отложение их в скелете и печени.

Элемент	Всасывание из желудочно-кишечного тракта в % % введенного количества	Отложение в органе в % % резорбированного количества	
		в скелете	в печени
Плутоний (Цитрат)	0,1	65	10
Стронций	8—60	65	0
Иттрий	1,5	70	5,5
Цирконий	0,55	40	5,5
Ниобий	0,2	18	8,5
Рутений	1,0	7,5	8,0
Цезий	100	3,5	8,0
Барий	5—40	7,3	0
Лантан	<0,01	20	65
Церий	<0,01	25	65

ций, иттрий, плутоний, цирконий и барий, а печени, по-видимому, рутений и цезий. Лантан и церий, несмотря на очень сильное отложение их в печени, вызывают меньшее ее поражение, вследствие довольно быстрого выделения их из печени и, кроме того, очень слабой всасываемости из желудочно-кишечного тракта. Максимальное накопление вещества в скелете, а в некоторых случаях и в печени, достигается при однократном введении, в течение нескольких дней, после чего либо стабилизируется, либо постепенно выделяется с большей или меньшей скоростью.

Исходя из преимущественного отложения в скелете и печени указанных элементов и предельно-допустимых норм содержания радиоактивных изотопов этих элементов в скелете и печени, приведенных в таблице 1, мы попытаемся вычислить предельно-допустимые количества этих изотопов для ежедневного перорального введения, что позволит сделать

определенные заключения относительно предельно-допустимых норм радиоактивного загрязнения воды.

Допустим, что A означает предельно-допустимое содержание активности данного изотопа в органе, A_1 — предельно-допустимое количество изотопа для хронического перорального введения в организм, α — коэффициент резорбции из желудочно-кишечного тракта и δ_t — относительное содержание резорбированного вещества в органе через t дней после введения.

Если принять, что каждая порция хронически вводимого радиоактивного вещества резорбируется, распределяется и выделяется также, как и при однократном введении, для которого поведение вещества в организме изучено экспериментально, то, очевидно, будет иметь место следующее равенство:

$$A = A_1 \alpha (\delta_0 + \delta_1 e^{-\lambda} + \delta_2 e^{-2\lambda} + \delta_3 e^{-3\lambda} + \dots + \delta_t e^{-\lambda t}), \quad (8)$$

где δ_t — есть некоторая функция времени, вид которой нужно определить на основании экспериментальных данных относительно скорости накопления или выделения вещества из органа.

После суммирования правой части уравнения (8), мы получим, что предельно-допустимое количество активности данного изотопа для ежедневного перорального введения в течение известного времени t будет равно:

$$A_1 = \frac{A}{\alpha \sum_0^t \delta_t e^{-\lambda t}} \quad (9)$$

Необходимо подчеркнуть, что предельно-допустимое количество активности для ежедневного перорального введения здесь означает то количество, при котором нарастающая доза излучения в органе не превышает предельного значения в 0,05 ф.э.р. в сутки для бета- и гамма-излучателей и 0,005 ф.э.р. в сутки для альфа-излучателей, в отличие от средней предельно-допустимой дозы излучения в течение определенного времени введения, как это, обычно, принято. В нашем случае легко установить зависимость ежедневно вводимых количеств активности от длительности введения и тем самым в общем виде решить вопрос относительно допустимого срока работы человека в производственных условиях с известным радиоактивным загрязнением пищевых или питьевых продуктов.

а) Расчеты на основании экспериментальных данных о содержании и поведении различных элементов в скелете и печени

В отличие от принятого разными авторами (Гамильтон, Морган, Кон) простого экспоненциального характера выделения из органа накопленного в нем вещества, с определенным биологическим полупериодом, нами было установлено, что выделение нестабилизирующихся в скелете и печени веществ ближе всего подходит к логарифмическому закону, причем, начиная с некоторого момента логарифмическая кривая наличия вещества в органе приближается к прямой.

На рис. 1 и 2 показано в полном логарифмическом масштабе изменение относительного содержания введенных элементов в скелете и печени с течением времени. Как видно из этих рисунков, содержание в скелете иттрия, церия и лантана стабилизируется по истечении 2—10 дней после введения. Изменения содержаний в печени и остальных элементов в ске-

лете, начиная с некоторого времени, разного для разных элементов, могут быть представлены прямыми в полном логарифмическом масштабе. Для этих участков логарифмических прямых относительные содер-

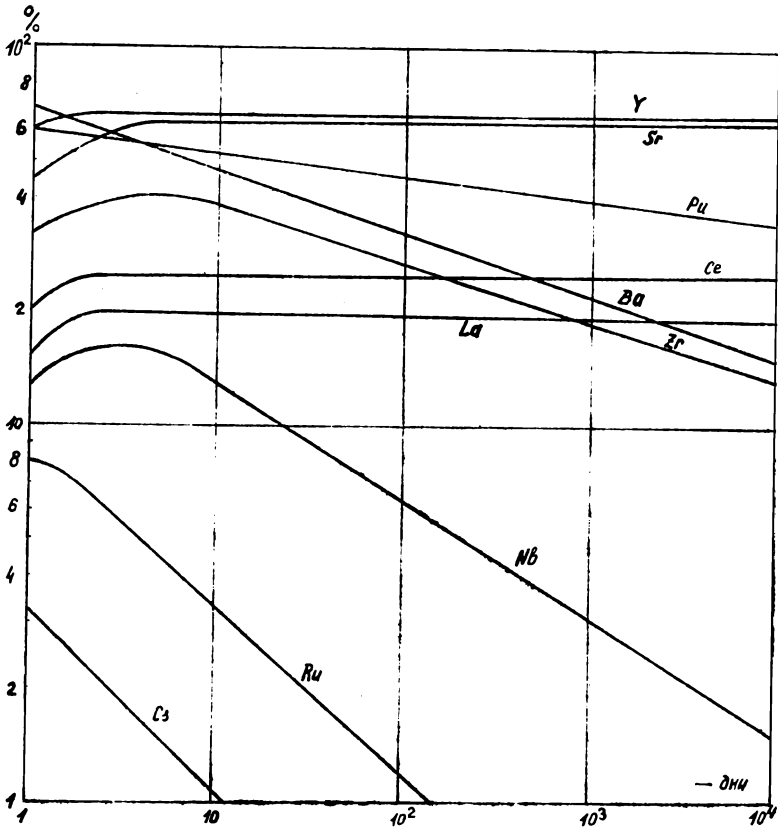


Рис. 1. Кривые изменения относительного содержания элементов в скелете с течением времени (в % от резорбированного количества).

жания резорбированного вещества в скелете могут быть выражены уравнением:

$$\delta_t = \delta_1 e^{\beta (\ln t - \ln t_1)} \quad (10)$$

где δ_t и δ_1 означают относительные количества резорбированного вещества в органе к моменту времени t и t_1 соответственно.

Постоянные величины β , характеризующие наклон кривых рис. 1 и 2, т. е. скорости выделения соответствующих веществ из органа, определяются с помощью этих рисунков для каждого элемента в отдельности по уравнению (10). Их числовые значения приведены в таблицах 3 и 4.

Ввиду наличия прямолинейных и криволинейных участков кривых рис. 1 и 2, уравнение будет иметь следующий вид:

$$A_1 = \frac{A}{\alpha \cdot \delta_m \left[\sum_0^{t_m} \frac{\delta_t}{\delta_m} e^{-\lambda t} + \sum_{t+1}^t e^{-\{\lambda t + \beta (\ln t - \ln t_m)\}} \right]} \quad (11)$$

где δ_m — означает относительное количество резорбированного вещества в органе к моменту начала прямолинейной части кривой, t_m — время

Таблица № 3.

Предельно-допустимые нормы для ежедневного перорального введения в организм человека весом 70 кг плутония и основных «осколочных» изотопов для некоторых сроков введения (по данным отложения в скелете)

Элемент	Атом- ный вес	Постоян- ная вы- деления из скеле- та β	δ_m	t_m дней	A ₁ микрокюри в день для сроков введения			
					10 дней	1 год	3 года	40 лет
Плутоний	239	0	0,65	10	19,5	0,5	0,18	0,012
Стронций	89	0,072	0,65	0	3,1	0,42	0,4	0,4
„	90*)	„	„	„	1,35	0,05	0,018	0,0023
Иттрий	90	0	0,70	3	2,10 ²	1,7 · 10 ²	1,7 · 10 ²	1,7 · 10 ²
„	91	„	„	„	75	7,45	7,45	7,45
Цирконий	95*)	0,1074	0,40	6	5,5 · 10 ³	6,0 · 10 ²	5,75 · 10 ²	5,75 · 10 ²
Ниобий	95	0,315	0,18	5	9,0 · 10 ³	1,85 · 10 ³	1,85 · 10 ³	1,85 · 10 ³
Рутений	106*)	0,446	0,070	2	7,0 · 10 ²	0,8 · 10 ²	0,68 · 10 ²	0,65 · 10 ²
Цезий	137	0,509	0,035	0	80	9,75	5,55	1,75
Барий	140*)	0,176	0,73	0	2,5	1,15	1,15	1,15
Лантан	140	0	0,20	2,5	6,75 · 10 ⁴	6,5 · 10 ⁴	6,5 · 10 ⁴	6,5 · 10 ⁴
Церий	144*)	0	0,25	2	1,75 · 10 ⁴	7,0 · 10 ²	4,4 · 10 ²	4,10 ²

*) В равновесии со своим дочерним продуктом распада.

Таблица № 4.

Предельно-допустимые нормы для ежедневного перорального введения в организм человека весом 70 кг плутония и основных «осколочных» изотопов для некоторых сроков введения (по данным отложения в печени)

Элемент	Атом- ный вес	Постоян- ная вы- деления из печени β	δ_m	t_m дней	A ₁ микрокюри в день для сроков введения			
					10 дней	1 год	3 года	40 лет
Плутоний	239	0,658	0,06	6	39,2	1,2	0,43	0,15
Стронций	89	—	—	—	—	—	—	—
„	90*)	—	—	—	—	—	—	—
Иттрий	90	0,675	0,055	0	9,0 · 10 ²	8,5 · 10 ²	8,5 · 10 ²	8,5 · 10 ²
„	91	0,675	0,055	0	5,4 · 10 ²	2,2 · 10 ²	2,2 · 10 ²	2,2 · 10 ²
Цирконий	95*)	0,344	0,055	10	8,4 · 10 ³	1,25 · 10 ³	1,25 · 10 ³	1,25 · 10 ³
Ниобий	95	0,473	0,08	10	3,6 · 10 ³	1 · 10 ³	1 · 10 ³	1 · 10 ³
Рутений	106*)	1,062	0,06	8	2,7 · 10 ²	0,59 · 10 ²	0,56 · 10 ²	0,56 · 10 ²
Цезий	137	0,934	0,08	0	8,7	5,1	3,6	2,25
Барий	140	—	—	—	—	—	—	—
Лантан	140	1,375	0,4	8	1,06 · 10 ⁴	1,05 · 10 ⁴	1,05 · 10 ⁴	1,05 · 10 ⁴
Церий	144*)	1,375	0,4	8	1,8 · 10 ³	5,55 · 10 ²	5,5 · 10 ²	5,5 · 10 ²

*) В равновесии со своим дочерним продуктом распада.

с момента введения вещества в организм, после которого начинается прямолинейная часть кривой.

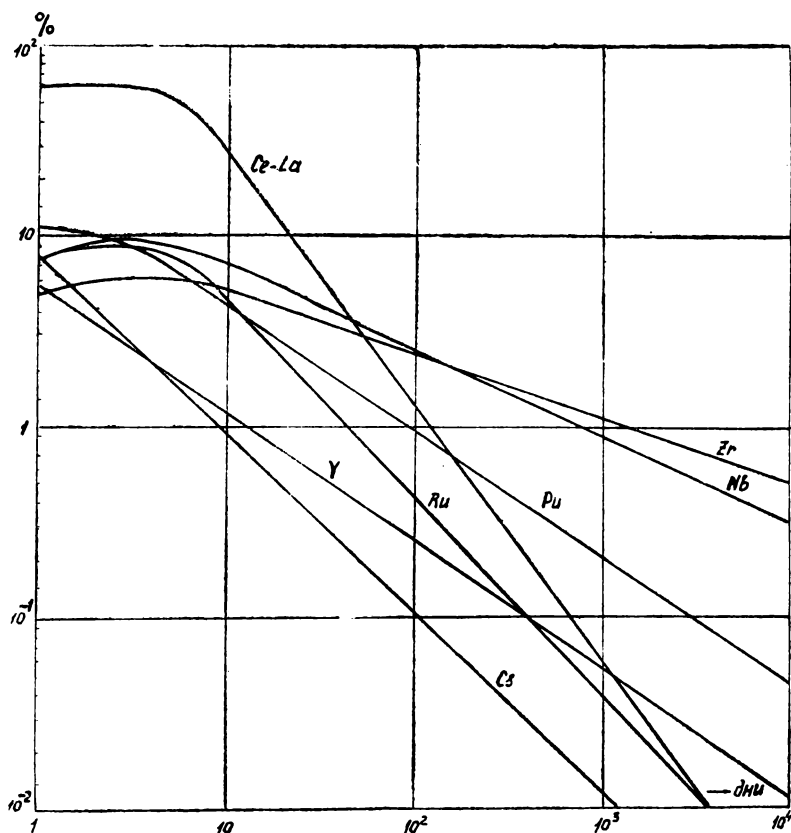


Рис. 2. Кривые изменения относительного содержания элементов в печени с течением времени (в % от резорбированного количества).

По этому уравнению, путем графического суммирования выражения в знаменателе, можно подсчитать предельно-допустимые количества радиоактивности исследованных на распределение изотопов, при ежедневном введении их в организм в течение любого срока. В таблицах 3 и 4 приводятся вычисленные по уравнению (11) предельно-допустимые нормы для ежедневного перорального введения и основных «осколочных» изотопов для сроков введения 10 дней, 1 год, 3 года и 40 лет. Само собой разумеется, что при этом распределение и всасывание элементов из желудочно-кишечного тракта и выведение их из организма принимается таким же, как и в исследованных животных, с учетом только веса человека. В этой связи необходимо указать на то, что при всех данных расчетах мы исходили из предположения тождественности величины резорбции и характера распределения у человека и у крыс.

Такое предположение практически, по вполне понятным причинам, не может быть экспериментально доказано. Однако критический обзор существующей литературы по распределению элементов по органам различных видов млекопитающих показывает, что возможные видовые различия в этом отношении носят лишь количественный характер, которые, однако, не могут оказать какого-либо заметного влияния на допускаемую нами экстраполяцию.

Сравнение данных таблиц 3 и 4 показывает, что определение предельно-допустимых норм для ежедневного перорального приема человеком «осколочных» изотопов более осторожным будет по содержанию их в скелете для стронция-89, стронция-90, иттрия-90, иттрия-91, циркония-95 и бария-140. Для остальных «осколочных» радиоактивных изотопов — по содержанию в печени.

Все же на основании этих данных нельзя сделать достаточно обоснованных выводов относительно предельно-допустимых норм для ежедневного перорального введения человеку рассмотренных радиоактивных изотопов, а, следовательно, и относительно предельно-допустимых норм радиоактивного загрязнения воды по той причине, что многие из рассмотренных изотопов плохо всасываются из желудочно-кишечного тракта, вследствие чего в ряде случаев в кишечнике может сохраняться почти постоянное содержание активности и, поэтому не исключена возможность более сильного облучения стенок желудочно-кишечного тракта. Кроме того, иное в данном случае геометрическое размещение гамма-излучающих изотопов может оказать сильное влияние на величину общей дозы излучения.

б) Расчеты по дозе излучения, возникающей в желудочно-кишечном тракте

Чтобы сделать более определенное заключение относительно предельно-допустимых норм для ежедневного перорального введения радиоактивных «осколочных» изотопов, нужно, кроме вышеуказанных расчетов, учесть также, хотя бы приближенно, возможное облучение желудочно-кишечного тракта при данных количествах радиоактивности, вводимых ежедневно. В этом случае задача может быть сведена к определению активности различных изотопов в желудочно-кишечном тракте, вызывающей облучение его стенок предельно-допустимой дозой излучения (0,005 ф.э.р. для альфа-излучателей и 0,05 ф.э.р. для бета- и гамма-излучателей).

При ежедневном пероральном введении радиоактивных изотопов можно принять, что для плохо всасывающихся элементов содержание введенного вещества в желудочно-кишечном тракте будет постоянное, равное введенному количеству, и распределение его в содержимом — равномерное. Для хорошо всасывающихся элементов (как, напр., стронций, барий и цезий) в качестве предельного случая можно принять равномерное распределение вещества как в содержимом, так и в стенках желудочно-кишечного тракта.

Для определения ежедневных предельно-допустимых норм введения мы принимаем следующие усредненные габариты желудочно-кишечного тракта (см. Лысенков и Бушкович, 1940; Шуберт, 1951 г.):

длина	7 метров
вес без содержимого	2,3 кг
вес содержимого	2,0 кг
толщина стенок	0,4 см

Принимая при этих данных цилиндрическую форму желудочно-кишечного тракта, получим, что внешний диаметр его, вместе с содержимым, будет 5,2 см, а внутренний — 4,4 см.

Для хорошо всасывающихся элементов (стронций, барий, цезий), содержания их в желудочно-кишечном тракте, вызывающие при указанных условиях дозу бета-излучения в 0,05 ф.э.р., могут быть вычислены по уравнению (3) для массы в 4,3 кг. Для остальных, слабо всасывающихся элементов, оценку дозы альфа- или бета-излучения в стенках желу-

дочно-кишечного тракта можно получить по уравнению внешних потерь энергии излучения (см. Рубин и Ричардсон, 1950), которое в нашем случае имеет следующий вид:

$$F = \frac{R \cdot S}{6 \cdot V} \quad (12)$$

где F — доля потерь от всей энергии излучения;

R — длина пробега альфа-, бета-частиц;

$R \cdot S$ — объем той части органа, из которой происходят внешние потери;

V — весь излучающий объем;

S — плоская поверхность излучающего объема.

Если толщина кишечника больше длины пробега ионизирующей частицы, то очевидно, что потерянная содержимым энергия на внешнее излучение полностью поглощается лишь в слое стенки, толщина которого равна длине пробега частицы, т. е. в расчетах интегральной дозы нужно брать не всю массу желудочно-кишечного тракта, а лишь массу той части, в которой поглощается излучение.

Если толщина кишечника меньше пробега частицы, то расчет дозы излучения нужно производить для соответственно большей массы ткани.

В нашем случае доля общей энергии альфа- или бета-излучения, поглощенная вне содержимого желудочно-кишечного тракта, будет равна:

$$F = \frac{\pi r^2 h - \pi h (r - R)^2}{6\pi r^2 h} = R \frac{2r - R}{6r^2} \quad (13)$$

где r — внутренний радиус кишечника.

При плотности ткани, равной единице, доза излучения в сутки, возникающая в желудочно-кишечном тракте, будет равна:

$$D = \frac{A_1 \cdot 3.7 \cdot 10^4 \bar{E} \cdot 10^6 \cdot 86400 \cdot R (2r - R) \cdot T (1 - e^{-0.693/T})}{M_1 \cdot W \cdot 1.6 \cdot 10^{12} \cdot 6r^2 \cdot 0.693} \text{ ф.э.р./сутки} \quad (14)$$

где A_1 — вводимое ежедневно количество радиоактивности в микроюри;

M_1 — масса в граммах той части ткани, в которой поглощается альфа- или бета-излучение.

W — энергия образования одной пары ионов (32,5 eV для бета-частиц и 35 eV для альфа-частиц);

\bar{E} — средняя энергия частицы в MeV.

Принимая D , равным 0,005 для альфа-излучения и 0,05 для бета-излучения, получим предельно допустимое содержание радиоактивности в желудочно-кишечном тракте:

$$A_1 = \frac{3,38 \cdot 10^{-3} \cdot M_1 \cdot r^2}{\bar{E} \cdot T \cdot R (2r - R) (1 - e^{-0.693/T})} \quad (\text{микроюри}) \quad (15)$$

для бета-излучателя и

$$A_1 = \frac{3,65 \cdot 10^{-4} \cdot M_1 \cdot r^2}{\bar{E} \cdot T \cdot R (2r - R) (1 - e^{-0.693/T})} \quad (\text{микроюри}) \quad (16)$$

для альфа-излучателя.

Масса той части ткани, в которой поглощается излучение из содержимого желудочно-кишечного тракта, при плотности ее, равной единице, будет равна:

$$M_1 = V \cdot 1 = \pi (r + R)^2 h - \pi r^2 h = \pi h R (R + 2r) \quad (17)$$

где h — длина желудочно-кишечного тракта.

Отсюда, после подстановки (17) в (15) и (16) получим:

$$A_1 = \frac{36 (4,4 + R)}{\bar{E} \cdot T \cdot (4,4 - R) (1 - e^{-0.693/T})} \quad (\text{микроюри}) \quad (18)$$

для бета-излучателей, и

$$A_1 = \frac{3.87 \cdot (4.4 + R)}{E.T. (4.4 - R) (1 - e^{-0.693/\tau})} \text{ (микроюри)} \quad (19)$$

для альфа-излучателей.

Подставляя в уравнения (18) и (19) соответствующие числовые значения из таблицы (1) и рис. 3, получим содержания основных осколоч-

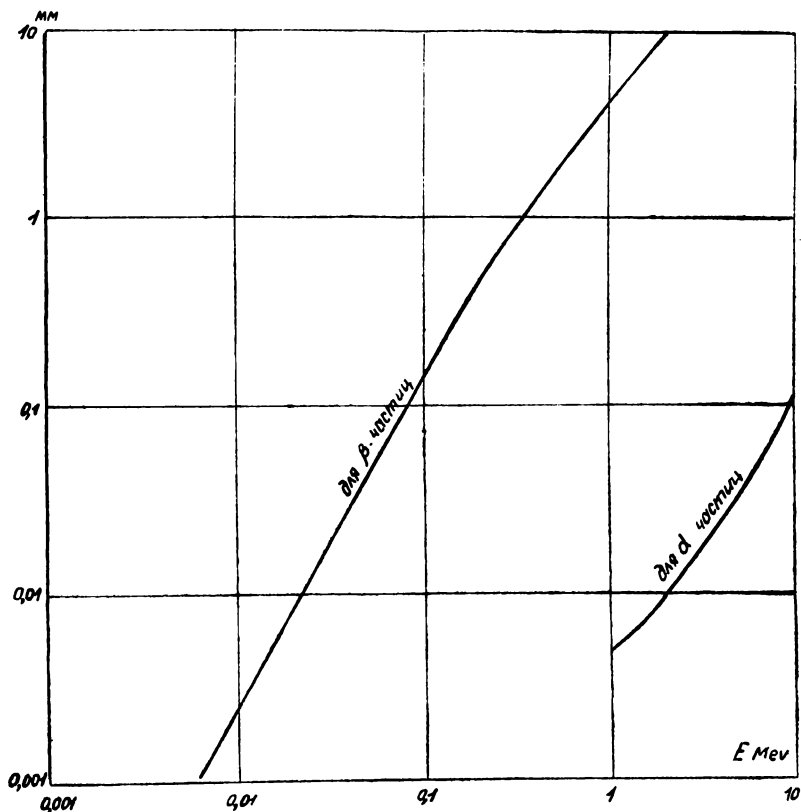


Рис. 3. Зависимость длины пробега в ткани альфа- и бета-частиц от их энергии.

ных изотопов в желудочно-кишечном тракте, которые своим альфа- или бета-излучением, при отсутствии резорбции, вызывают облучение стенок желудочно-кишечного тракта дозами, не превышающими предельно-допустимых. Результаты этих расчетов приведены в таблице 5.

Чтобы определить предельно-допустимое содержание этих радиоактивных изотопов в желудочно-кишечном тракте при ежедневном пероральном введении и, тем самым, предельно-допустимые нормы, нужно учесть еще дозу, создаваемую гамма-излучением, и после этого в данные таблицы 5 внести соответствующие поправки.

Расположение основных частей желудочно-кишечного тракта в брюшной полости приближенно можно принять в виде шара, диаметром 25 см (для среднего человека весом 70 кг), и распределение в нем — равномерным. Последнее допущение вполне оправдано, ввиду достаточной жесткости гамма-излучения.

Таблица 5

Количества радиоактивных изотопов, которые вызывают в стенках желудочно-кишечного тракта предельно-допустимые дозы альфа- или бета-излучения

Элемент	Микрокури при равномерном распределении		Элемент	Микрокури при равномерном распределении	
	в содержимом	в стенках кишечника и содержимом		в содержимом	в стенках кишечника и содержимом
Плутоний 239	1,08	—	Лантан 140	126,3	—
Стронций 89	—	6,15	Церий 144	—	—
Стронций 90	—	3,15	Прозеодим 144	51	—
Иттрий 90	78	—	Прометий 147	840	—
Иттрий 91	96	—	Европий 155	814	—
Цирконий 95	—	—			
—ниобий 95	313,5	—			
Ниобий 95	1266	—			
Рутений 103	542	—			
Рутений 106	50,15	—			
Цезий 137	—	20,05			
Барий 140	—	43			
—лантан 140	—	—			

Мощность дозы гамма-излучения в центре шара равна:

$$\Delta\gamma = \int_0^a \frac{4\pi K r^2 e^{-\mu r}}{r^2} dr = \frac{4\pi K a}{\mu} (1 - e^{-\mu a}) \text{ рентген/час} \quad (20),$$

где K — γ -постоянная излучателя;

ρ — концентрация активности в шаре при равномерном распределении;

μ — линейный коэффициент ослабления гамма-излучателя в ткани ($\mu \approx 0,028 \text{ см}^{-1}$).

Средняя мощность дозы гамма-излучения в шаре равна 0,75 мощности дозы в центре (см. Мэйнорд, 1950; Буш, 1949), т. е.

$$\Delta\gamma = \frac{3\pi K \rho}{\mu} (1 - e^{-\mu a}) \text{ рентген/час} \quad (21).$$

Если через A обозначить число микрокури ежедневно вводимой в желудочно-кишечный тракт активности, то средняя дневная доза гамма-излучения в нем будет:

$$\bar{D}_\gamma = \frac{24,3 \cdot \pi \cdot K \cdot A \cdot T \cdot (1 - e^{-\mu a}) (1 - e^{-0,693/T})}{\mu \cdot 4500 \cdot 0,693} = 0,8 \cdot K \cdot A \cdot T \cdot (1 - e^{-0,693/T}) \text{ рентген} \quad (22)$$

для изотопов с небольшим периодом полураспада.

Для изотопов с очень большим периодом полураспада уравнение (22) можно записать в следующем виде:

$$\bar{D}_\gamma = 0,555 K A \text{ рентген} \quad (23)$$

Если в уравнения (22) и (23) вместо A подставить значения из таблицы (5), то мы получим дозы гамма-излучения, создаваемые в желудочно-кишечном тракте теми количествами, гамма-излучение которых составляет 0,05 ф.э.р. в сутки.

Отсюда предельно-допустимое количество для ежедневного перорального введения смешанного бета- и гамма-излучателя будет равно:

$$A_1 = \frac{0,05A}{0,05 + D_\gamma} \quad (24)$$

Рассчитанные по этому методу предельно-допустимые количества радиоактивных изотопов для ежедневного перорального введения приведены в таблице 6.

Таблица 6.

Предельно-допустимые нормы для ежедневного перорального введения в организм человека весом 70 кг основных «осколочных» изотопов (по предельно-допустимым содержаниям в желудочно-кишечном тракте)

Элемент	A_1 микроюри в день
Плутоний 239	1,08
Стронций 89	6,15
Строний 90 — иттрий 90	3,15
Иттрий 90	78
Иттрий 91	96
Цирконий 95 — ниобий 95	8,76
Ниобий 95	20,0
Рутений 103	31,4
Рутений 106	28,4
Цезий 137	11,0
Барий 140 — лантан 140	8,5
Лантан 140	10,8
Церий 144	47,7
Прометий 147	840,0
Европий 155	158,0

Предельно-допустимые нормы неразделенного раствора осколков для ежедневного перорального поступления в организм человека, очевидно, зависят от состава раствора, который изменяется в зависимости от способа и длительности обработки как самого раствора, так и первичного сырья.

Если состав радиоактивного раствора известен и определены предельно-допустимые нормы для ежедневного введения изотопов его составляющих, то легко подсчитать предельно-допустимое количество его для ежедневного введения в организм человека. Оно будет равно:

$$A = \frac{1}{\sum_i \frac{K_i}{A_i}} \quad (25)$$

где K_i — означает относительное содержание активности данной составляющей в растворе осколков, а A_i — предельно-допустимое количество для ежедневного введения в организм человека этой составляющей.

В качестве примера мы рассчитаем предельно-допустимые нормы для ежедневного введения в организм человека радиоактивного раствора осколков трех возрастов, основной состав которых был вычислен теоретически для длительности обработки в 30 дней и последующей выдержки в 0,5 года, 1 год и 2 года. Таблица состава этих растворов приводится ниже (табл. 7).

Т а б л и ц а № 7.

Относительное содержание отдельных составляющих в неразделенном растворе осколков разного возраста при длительности обработки в 30 дней (по Борну, 1948 г., неопубликованные данные)

Э л е м е н т	А	Возраст в днях		
		180	360	720
Стронций	89	0,094	0,039	0,0012
Стронций	90	0,0075	0,032	0,1
Иттрий	91	0,137	0,067	0,0028
Цирконий	95	0,171	0,108	0,0075
Ниобий	95	0,306	0,173	0,012
Рутений	103	0,047	0,01	—
Рутений	106	0,013	0,04	0,061
Цезий	137	0,0068	0,028	0,085
Церий	141	0,023	—	—
Церий	144	0,103	0,42	0,51
Празеодим	143	0,003	—	—
Прометий	147	0,023	0,082	0,20
Европий	155	0,0026	0,009	0,02

4. Предельно-допустимые нормы радиоактивного загрязнения воды отдельными изотопами

а) Расчеты на основании данных опытов по распределению введенных внутрь организма радиоактивных изотопов

Сравнение результатов расчетов, приведенных в таблицах 3, 4, 6 показывает, что предельно-допустимые дозы излучения в скелете, печени и желудочно-кишечном тракте вызываются различными количествами ежедневно вводимого перорально радиоактивного изотопа, причем стронций-89, стронций-90, иттрий-91 и барий наибольшие дозы излучения вызывают в скелете, а иттрий-90, цирконий-95, ниобий-95, лантан-140 и це-

рий-144 — в желудочно-кишечном тракте. Доза излучения рутения-106 и цезия-137 примерно одинакова как для скелета, так и для печени и желудочно-кишечного тракта. Вполне понятно, что в качестве предельно-допустимой нормы для ежедневного перорального введения в организм человека какого-либо излучателя целесообразно принимать наименьшую из предельно-допустимых норм для различных органов для данного срока введения.

Установив таким образом предельно-допустимые нормы для ежедневного перорального введения изотопов в организм человека, легко подсчитать предельно-допустимые нормы загрязнения воды. По данным различных авторов (см., напр., Шуберт, 1951 г.), обычный средний суточный прием человеком воды составляет 2,5 литра. Следовательно, в этом количестве воды и может содержаться предельно-допустимое количество радиоактивного изотопа для ежедневного приема.

Вычисленные этим путем предельно-допустимые нормы радиоактивного загрязнения воды приведены в таблице 8 и на рис. 4, в зависимости

Таблица № 8.

Предельно-допустимые нормы радиоактивного загрязнения воды в кюри/литр.
(по данным о распределении радиоактивных изотопов)

	10 дней	1 год	3 года	40 лет	
Плутоний 239	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$2,10^{-7}$	$7,0 \cdot 10^{-8}$	$5,10^{-9}$	По скелету
Стронций 89	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	"
Стронций 90*)	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$7,0 \cdot 10^{-9}$	$9,0 \cdot 10^{-10}$	"
Иттрий 90	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	По кишечнику
Иттрий 91	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	По скелету
Цирконий 95*)	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	По кишечнику
Ниобий 95	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$	"
Рутений 106*)	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	"
Цезий 137	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-7}$	По печени
Барий 140*)	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$4,6 \cdot 10^{-7}$	$4,6 \cdot 10^{-7}$	$4,6 \cdot 10^{-7}$	По скелету и кишечнику
Лантан 140	$5,3 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$	По кишечнику
Церий 144*)	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	По кишечнику
Раствор возрастом 0,5 года	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$9,3 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	По кишечнику
Раствор возрастом 1 год	$6,1 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$2,03 \cdot 10^{-7}$	$2,78 \cdot 10^{-8}$	
Раствор возрастом 2 года	$4,12 \cdot 10^{-6}$	$1,97 \cdot 10^{-7}$	$6,95 \cdot 10^{-8}$	$9,0 \cdot 10^{-9}$	

*) В равновесии со своим дочерним веществом.

от длительности срока приема ее в организм. Интересно отметить, что по данным распределения радиотоксичность плутония и старого раствора, примерно, одинакова при пероральном введении.

5. Резюме

В работе приводится методика и результаты расчета предельно-допустимых норм радиоактивных загрязнений воды плутонием и некоторыми «осколочными» элементами. Расчеты проведены на основании данных распределительных опытов. Проведенные расчеты позволяют установить сроки работы на производстве в зависимости от степени загрязнения

воды и воздуха. Расчеты показали также, что в случае радиоактивного загрязнения воды гамма-излучателями необходимо учитывать возможное облучение желудочно-кишечного тракта.

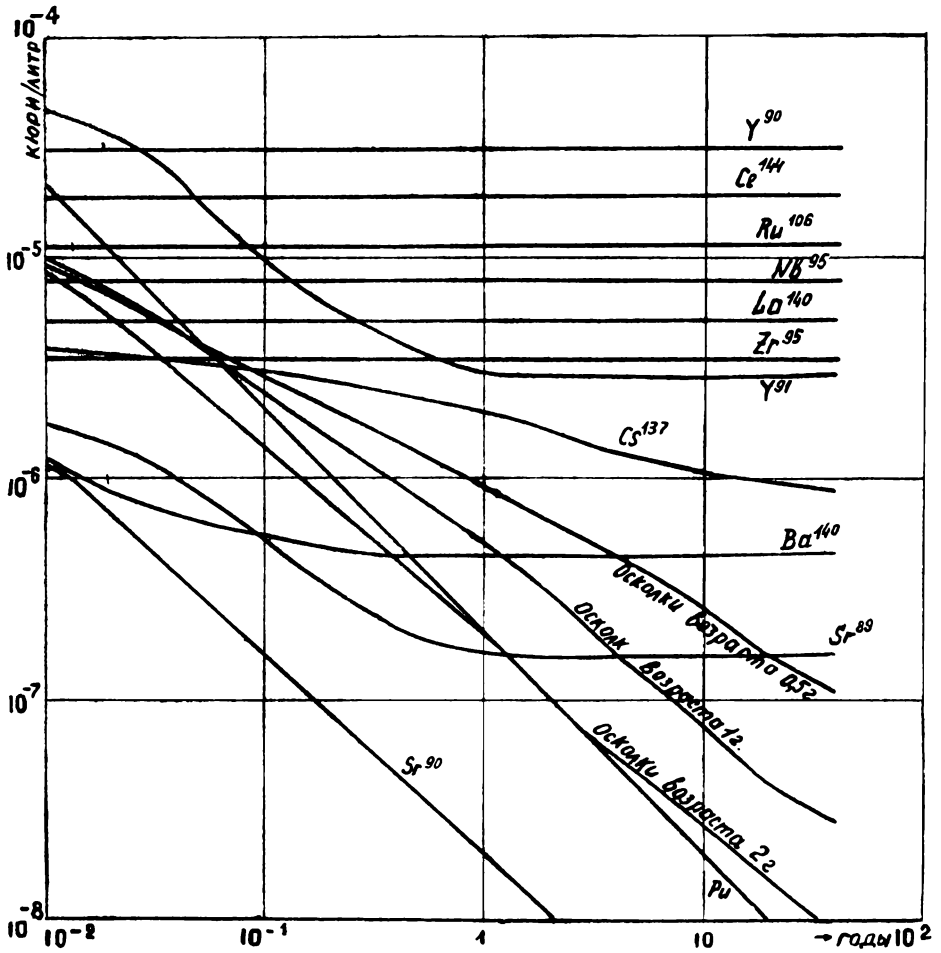


Рис. 4. Кривые зависимости предельно-допустимых норм радиоактивного загрязнения воды от срока ее потребления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лысенков и Бушкович. Нормальная анатомия человека, 1940.
2. Горбатько Н. В. Вестник рентгенологии и радиологии, № 3, 1956.
3. Bush, r. 1949. Brit. Journ. Radiol. 22.
4. Mayneord, W. V. 1950. Brit. Journ. Radiol. Supplementum 2.
5. Schubert, L. 1951. Nucleonics. 8.
6. Morgan, K. L. 1947. Journ. Phys. Coll, Chemist. 51.
7. Cohn, W. E. 1948. Nucleonics, yuly, 21.
8. Richards, P. I. and B. A. Rubin, 1950, Nucleonics, 6,