

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.*

## **II. МЕТОДИКА РАСЧЕТА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНО-ДОПУСТИМЫХ НОРМ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ВОДЕ ПО ДАННЫМ ТОКСИКОЛОГИЧЕСКИХ ОПЫТОВ И НОРМЫ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА**

### **1. Введение**

В первой части этой работы (Горбатюк и др., 1958) показаны методика и результаты определения по экспериментальным данным распределительных опытов предельно-допустимых норм содержания плутония и некоторых осколочных радиоактивных изотопов в воде.

В нашей лаборатории на ряду с изучением распределения различных «осколочных» радиоактивных изотопов, резорбции из желудочно-кишечного тракта при пероральном введении, скорости накопления изотопов в органе и выделения из него изучались также радиотоксические свойства большинства из этих же изотопов. Само собой разумеется, что чрезвычайно заманчиво было оценить предельно-допустимые нормы радиоактивного загрязнения воды не только по данным распределительных опытов, исходя из предельно-допустимых доз излучения, но и по экспериментально-установленным токсическим действиям их. Однако, при сравнении результатов, полученных этими двумя методами, нужно учесть возможность неравномерного распределения изотопов в наиболее облучаемом органе, по которому ведется расчет предельно-допустимых норм, на что совершенно явственно указывает ряд автораддиографических исследований. Кроме того, так как результаты расчетов предельно-допустимых норм по данным распределения основаны, главным образом, на усредненном распределении в скелете, средняя концентрация изотопа в котором оказывается наибольшей для преобладающего большинства элементов, то следует ожидать, что эти результаты расчетов окажутся несколько завышенными, ввиду довольно значительного различия в концентрации изотопа в отдельных частях скелета. Поэтому расчет по данным токсикологических опытов, в известной мере, может служить контролем степени точности расчета по данным распределительных опытов.

Значительно хуже обстоит дело с возможностями расчета предельно-допустимых норм радиоактивного загрязнения воздуха, так как для ингаляционного введения изотопов почти не имеется более или менее удовлетворительных опытов. По имеющимся в нашем распоряжении данным такие предварительные расчеты можно было сделать лишь на основании двух предельных предположений о дальнейшем поведении активности при ингаляционном захвате ее легкими, то есть: полной резорбции ее из легких и отсутствии резорбции. По-видимому, действительные предельно-допустимые нормы должны быть либо промежуточными, либо большими, чем вычисленные на основании этих двух крайних предположений. Для более точного расчета предельно-допустимых норм активного загрязнения воздуха необходимо проведение специальных опытов по изучению поведения радиоактивных аэрозолей в легких и дальнейшей их судьбы.

Само собой разумеется, что данная работа еще не может рассматриваться в качестве окончательной по этому вопросу и что подобные расчеты, по мере накопления дальнейшего и более точного экспериментального материала, должны периодически повторяться.

## 2. Предельно-допустимые нормы радиоактивного загрязнения воды отдельными изотопами

(Расчеты на основании данных токсикологических опытов по внутривенному введению радиоактивных изотопов)

Расчеты предельно-допустимых норм радиоактивного загрязнения воды, проведенные лишь на основе данных опытов по распределению и выделению веществ, введенных внутрь организма, не являются сами по себе достаточно убедительными, ввиду ряда упрощенных предположений. Во-первых, все еще недостаточно обосновано условное принятие в качестве предельно-допустимой дозы 0,05 ф.э.р. для бета- и гамма-излучения и 0,005 ф.э.р. для альфа-излучения. Во-вторых, расчеты проводились на основании равномерного распределения введенного вещества во всем органе; между тем для ряда элементов это распределение далеко не равномерное, как показывают автордиографические исследования. Особенно это относится к распределению в скелете, где наблюдается преимущественное концентрирование вещества в определенных структурах, образуя так называемые микродепо (Хокер и Рофе, 1951 г.; Гамильтон, 1947 г.; Блом, 1948 г.; и др.). Вполне понятно, что дозы излучения в таких микродепо должны превышать дозу излучения, рассчитанную для равномерного распределения в органе, причем это превышение может быть на целый порядок величины. До сих пор, однако, не имеется каких-либо экспериментальных данных, позволяющих провести количественную оценку влияния микрораспределения на величину предельно-допустимых норм радиоактивности.

Помимо этого, предположения о скорости выделения вещества из органа, полученные путем экстраполяции на более длительные сроки, в свою очередь вносят известный элемент неточности.

Таким образом, оценка предельно-допустимых норм радиоактивности путем использования токсикологических данных, в строгом смысле этого понятия, является весьма желательной.

Проведение соответствующих токсикологических опытов не представляло бы принципиальных трудностей. Такого рода опыты могли бы дать наиболее возможное приближение к практически существующим условиям (ежедневное введение изотопов в количествах, близких к «предельно-допустимым» в течение длительного срока), причем в качестве объектов исследования нужно было бы брать таких животных, которые по своей чувствительности к излучению и продолжительности жизни приближались бы к человеку (например, обезьяна). Однако такие опыты практически вряд ли осуществимы в настоящее время. Кроме того, для получения определенных выводов такие опыты потребовали бы длительного времени, в то время как определение предельно-допустимых норм является насущной потребностью уже сейчас, вследствие все нарастающего развития атомной промышленности. Последнее обстоятельство делает целесообразным рассмотрение уже имеющихся токсикологических данных с точки зрения возможности использования их для интересующей нас проблемы.

В так называемых «интернациональных рекомендациях» относительно предельно-допустимого содержания радиоактивности ряда изотопов

в организме человека (интернациональные рекомендации, 1951) используются некоторые положения токсикологического опыта:

а) определенное количество радия (0,1 микрокури) на основе клинических наблюдений принимается в качестве предельно-допустимого содержания в организме человека;

б) действие радия на крысу сравнивается с таковым других радиоактивных изотопов.

Существенный недостаток этого метода состоит в том, что для сравнения эффективностей пользуются показателями острого переоблучения (ЛД 50/30), тогда как сравнительные эффективности отдельных излучателей для отдельных эффектов могут существенно отличаться от таких для острых переоблучений. Так, например, для острого облучения полоний является более токсическим, чем радий, и поэтому в качестве предельно-допустимого содержания его в организме человека принимается 0,007 микрокури. Однако это количество, несомненно, является сильно заниженным, так как «отдаленная» его эффективность значительно ниже, чем радия (Финк, 1950 г.).

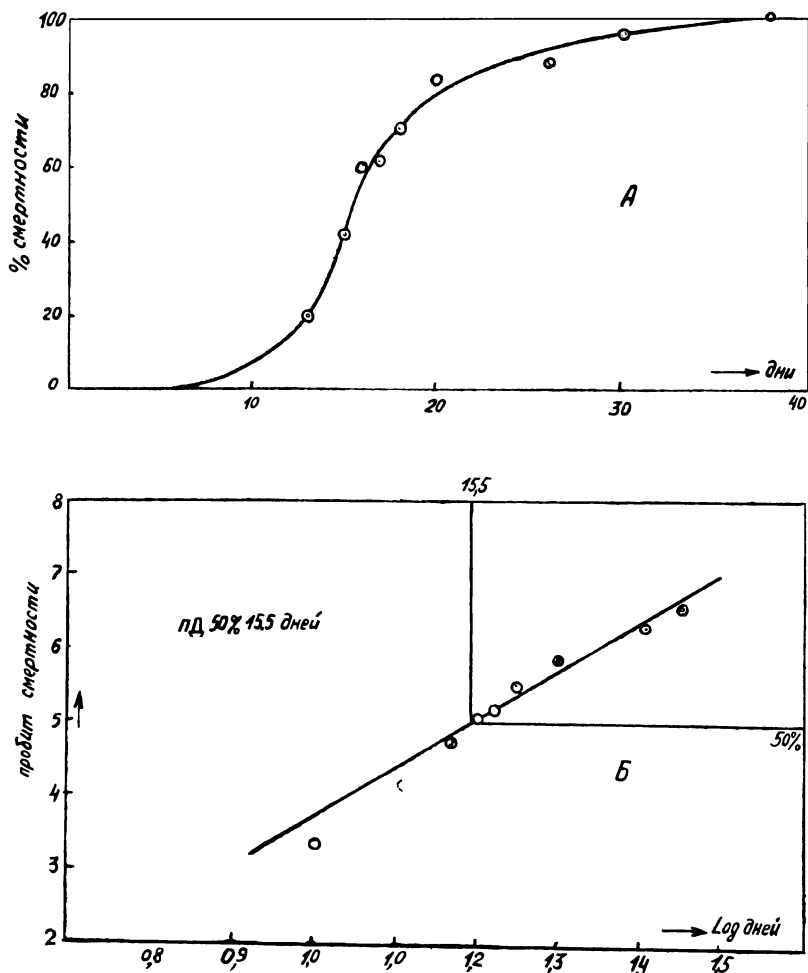


Рис. 1. Кривые зависимости эффекта от времени.

За последние годы в нашей лаборатории накоплен некоторый материал по токсическому действию основных «осколочных» изотопов. Несмотря на то, что этот материал представляет собой лишь данные для однократного внутривенного введения крысам и собакам сравнительно больших количеств изотопа, все же в известной степени его можно использовать для поставленной здесь задачи, с учетом отдельных эффектов.

Получение и обработка данных токсикологических опытов производились в следующем порядке. Соответствующий радиоактивный изотоп вводился нескольким группам крыс в разных количествах внутри интервала отношений 1:10—30. Срок наблюдений за затравленными животными составлял 500—600 дней. Для каждой отдельной группы крыс установилось распределение смертности по времени. В графическом изображении это будут, так называемые, кривые «время—эффекта». Эти кривые в обычном масштабе представляют собой кривые так называемого «сигмоидального типа», которые выпрямляются при преобразовании в координаты: пробит смертности — логарифм времени (Блис, 1937 г.). Путем интерполяции из этих прямых определяются средние продолжительности жизни ЛД — 50%, т. е. время, в течение которого погибают 50% исследуемых животных.

На рис. 1 показан пример такого рода преобразования для случая внутривенного введения чистого стронция-90 в количестве 2,67 микрокюри/г.

По данным ЛД—50%, полученным этим способом для всех исследованных количеств введенной активности, можно графически изобразить

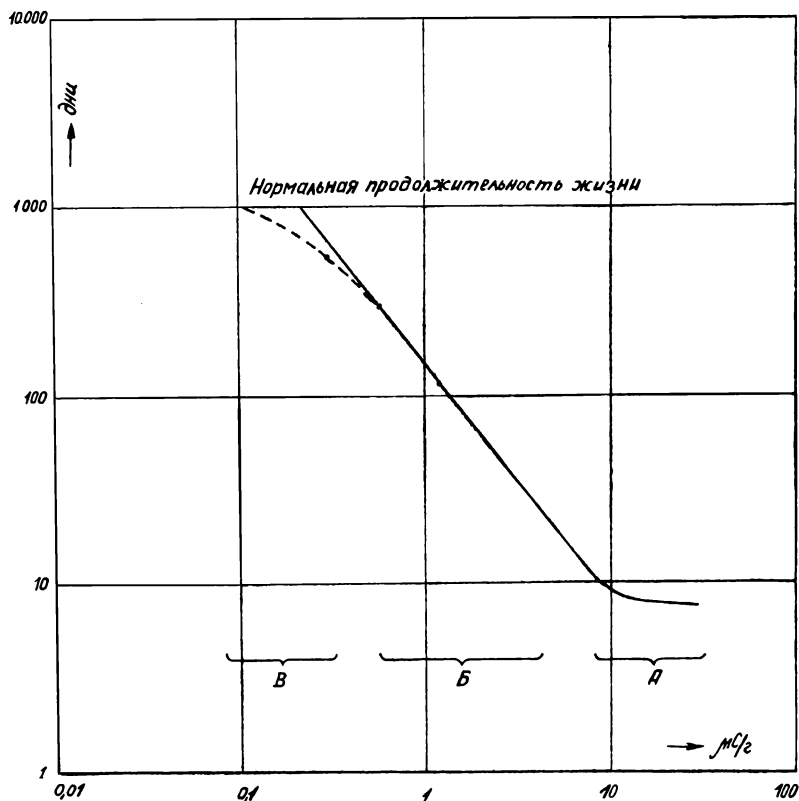


Рис. 2. Зависимость средней продолжительности жизни от введенной дозы.

зависимость средней продолжительности жизни от введенной дозы, которая показывает ЛД—50% для различных сроков.

Графическое изображение данной зависимости будет наиболее наглядно в полном логарифмическом масштабе (см. рис. 2 для церия-144). Вид кривой этого рисунка является до известной степени характерным для всех изученных изотопов, а именно: в области остролетальных доз (участок «А») кривая показывает относительную независимость средней продолжительности жизни от введенной дозы, а в области меньших доз (участок «Б») — приблизительно прямолинейное увеличение продолжительности жизни с уменьшением введенной дозы. Хотя в наших опытах срок наблюдения еще не достиг нормальной продолжительности жизни (около 1000 дней), мы все же можем утверждать, что при дальнейшем уменьшении вводимой дозы, кривая вблизи средней продолжительности жизни изгибается, как показано на рис. 2 (участок «В»).

Таким образом, экстраполированием этой кривой мы можем определить то количество вводимого изотопа, для которого ЛД—50% совпадает с нормальной продолжительностью жизни. Ввиду возможной неточности последнего участка кривой (рис. 2, в) мы экстраполировали прямолинейно, допуская при этом некоторую ошибку в смысле завышения нелетальных вводимых количеств.

Следует напомнить, что до сих пор шла речь о так называемых полuletальных дозах, в то время как нас, в конечном счете, интересуют максимальные нелетальные дозы. Как известно, непосредственное определение нелетальной вводимой дозы наталкивается на значительные трудности из-за ряда методических положений. По нашему опыту, максимальные нелетальные дозы для изученных нами изотопов примерно в четыре раза меньше ЛД — 50%.

Полученные, с учетом этой поправки, максимальные нелетальные количества радиоактивного изотопа для однократного внутривенного введения крысам нужно соответствующим образом экстраполировать для человека. Такую экстраполяцию мы провели для 40-летней рабочей продолжительности жизни человека, весом 70 кг.

Кроме того, нужно учесть большую, по-видимому, радиочувствительность человека. Наличие большей радиочувствительности человека, которая, примерно, соответствует радиочувствительности собаки, доказана пока лишь для случая острой лучевой болезни; тогда как для хронического поражения соответствующих данных еще не имеется.

По нашим данным, количества радиоактивности, вызывающие острые поражения у собаки, примерно, на один порядок величины ниже, чем для крысы. Поэтому нам кажется целесообразным в дальнейших расчетах уменьшить на один порядок эти экстраполированные величины максимальных нелетальных доз.

Данные токсикологических опытов на крысах, экстраполированные вышеуказанным способом, с учетом радиочувствительности человека, привели к следующим предельно-допустимым количествам радиоактивности различных изотопов при однократном внутривенном введении:

Плутоний . . . . .	0.07	микроюри
Стронций 89 . . . . .	420	„
Стронций 90—иттрий 90 . . . . .	28	„
Иттрий 90 . . . . .	7000	„
Цирконий 95—ниобий 95 . . . . .	490	„
Ниобий 95 . . . . .	700	„
Рутений 106 . . . . .	1050	„
Церий 144 . . . . .	56	„
Неразделенный раствор «осколков»	700	„

Неразделенный раствор (выдержан  
ный) . . . . . 3,5\*) ..

Предельно-допустимые количества радиоактивности для ежедневного перорального введения можно определить по этим данным путем вычисления кумулированной дозы излучения за весь срок работы человека (40 лет), с учетом резорбции из желудочно-кишечного тракта и соответствующего распределения по органам. Данные о резорбции, распределении и выделении различных веществ из соответствующих органов нам известны из опытов по распределению. Применение этих данных к результатам токсикологических опытов по внутривенному введению вполне законно, так как в обоих случаях вводились невесомые количества.

Как уже было сказано в первой части этой работы, введенные в организм стронций 89 и стронций 90 наибольшие дозы излучения создают в скелете, цезий 137 в печени, а остальные изотопы — в желудочно-кишечном тракте. Поэтому предельно-допустимые количества радиоактивности для ежедневного введения мы будем определять для каждого изотопа по тому органу, в котором он вызывает наибольшую дозу излучения.

Для изотопов, вызывающих наибольшую дозу излучения в скелете, кумулированная доза за 40 лет при однократном внутривенном введении предельно-допустимого количества активности будет равна:

$$D = \frac{A_0 \delta_m \Delta_1}{M_1} \left[ \sum_0^{t_m} \frac{\delta_t}{\delta_m} e^{-\lambda t} + \sum_{t_m+1}^{40 \text{ лет}} e^{-\{\lambda t + \beta (\ln t - \ln t_m)\}} \right] \frac{T (1 - e^{-0,693/T})}{0,693} \quad (1),$$

где  $A_0$  — предельно-допустимое количество активности данного изотопа для однократного внутривенного введения (по данным токсикологических опытов);

$\Delta_1$  — мощность дозы излучения при концентрации изотопа в органе в 1 микрокури;

$M_1$  — масса органа в граммах;

$\delta_m, t_m, \beta$  — величины, приведенные для соответствующих органов в таблицах 3 и 4 (часть первая этой работы);

$\sigma_t$  — относительное содержание резорбированного вещества в органе к моменту времени  $t$  (см. рис. 1 и 2 в первой части этой работы).

Средняя доза излучения в день будет равна:

$$D_1 = \frac{D}{14600} \quad (2).$$

Отсюда предельно-допустимые количества для ежедневного перорального введения будут равны:

$$A_2 = \frac{A_1 D_1}{0,05} = \frac{A_1 D}{0,05 \cdot 14600} \text{ микрокури для бета- и гамма-излучателей и}$$

$$A_2 = \frac{A_1 D}{0,005 \cdot 14600} \text{ микрокури для альфа-излучателей,}$$

где  $A_1$  — количества радиоактивности для ежедневного перорального введения в течение 40 лет, вызывающие, по данным распределения, среднюю дозу излучения в скелете к концу этого срока, равную предельно-допустимой (таблица 3, часть первая этой работы).

Для радиоактивных изотопов, вызывающих наибольшую дозу излу-

\*) Очень высокая биологическая эффективность выдержанного раствора по сравнению с обычным раствором, по-видимому, объясняется значительно большей относительной активностью плутония, примесь которого была в этом растворе.



чения в желудочно-кишечном тракте, кумулированные дозы в нем, при введении предельно-допустимых количеств радиоактивности, по данным токсикологических опытов, пересчитанных на пероральное введение по коэффициенту резорбции из желудочно-кишечного тракта, будут равны:

$$D = \frac{A_0 \cdot 0,05}{\alpha A_1} \text{ ф.э.р. для бета- и гамма-излучателей,}$$

где  $A_0$  — предельно-допустимое количество радиоактивности для однократного внутривенного введения по данным токсикологических опытов;

$A_1$  — количество радиоактивности для ежедневного перорального введения, вызывающее в стенках желудочно-кишечного тракта предельно-допустимую дозу излучения (см. таблицу 6, часть первая этой работы);

$\alpha$  — коэффициент резорбции из желудочно-кишечного тракта

Если принять, что при ежедневном пероральном введении радиоактивности введенная порция задерживается в желудочно-кишечном тракте в течение суток, то предельно-допустимое количество радиоактивности таких изотопов для ежедневного перорального введения, на основании токсикологических опытов, будет равно:

$$A_2 = \frac{DA_1}{14600 \cdot 0,05} = \frac{A_0}{\alpha \cdot 14600} \text{ микрокюри.}$$

Делением полученных таким образом предельно-допустимых норм радиоактивности для ежедневного перорального введения на средний суточный прием воды человеком (2,5 литра) получим предельно-допустимые нормы радиоактивного загрязнения воды, по данным наших токсикологических опытов. Результаты соответствующих расчетов приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1.

Предельно-допустимые нормы радиоактивного загрязнения воды  
(по данным токсикологических опытов)

Элемент	Коммули- рованная доза в органе за 40 лет (фэр)	Средняя доза в день (фэр)	Предельно- допустимое количество для ежедневного введения (микро- кюри)	Предельно- допустимые нормы загрязне- ния воды в кюри/л	Рассчитано по органу
Плутоний—239 . . . . .	28	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$	По скелету
Стронций—89 . . . . .	87	$6 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$	"
Стронций—90*) . . . . .	963	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	"
Иттрий—90 . . . . .	300	$2 \cdot 10^{-2}$	32,0	$12,8 \cdot 10^{-6}$	По желу- дочно- кишечному тракту
Цирконий—95*) . . . . .	510	$3,5 \cdot 10^{-2}$	6,1	$2,4 \cdot 10^{-6}$	"
Ниобий—95 . . . . .	875	$6 \cdot 10^{-2}$	24	$9,6 \cdot 10^{-6}$	"
Рутений—106 . . . . .	185	$1,3 \cdot 10^{-2}$	7,2	$2,88 \cdot 10^{-6}$	"
Церий—144 . . . . .	586	$4 \cdot 10^{-2}$	38,2	$15,3 \cdot 10^{-6}$	"

\*) В равновесии с дочерним продуктом.

Сравнение предельно-допустимых норм радиоактивного загрязнения воды, рассчитанных на основании распределительных опытов, с одной стороны, и токсикологических опытов, с другой стороны (табл. 8, часть первая этой работы), показывает одинаковый порядок этих величин для всех токсикологически испытанных изотопов, за исключением стронция—89, для которого предельно-допустимая норма содержания в воде по токсикологическим данным на один порядок ниже.

В качестве иллюстрации приведем сравнительную таблицу предельно-допустимых норм радиоактивного загрязнения воды для 40-летнего срока ее потребления, рассчитанного по данным распределительных опытов (табл. 2).

Таблица 2.

**Предельно-допустимые нормы загрязнения воды для 40-летнего срока ее потребления (кюри/литр)**

Элемент	По данным распределительных опытов	По данным токсикологических опытов
Плутоний—239 . . . . .	$5 \cdot 10^{-9}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$
Стронций—89 . . . . .	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$
Стронций—90*) . . . . .	$0,96 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$
Иттрий—90 . . . . .	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Иттрий—91 . . . . .	$3 \cdot 10^{-6}$	—
Цирконий—95*) . . . . .	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$
Ниобий—95 . . . . .	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$9,6 \cdot 10^{-6}$
Рутений—106*) . . . . .	$12,0 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$
Цезий—137 . . . . .	$9,0 \cdot 10^{-7}$	—
Барий—140*) . . . . .	$4,6 \cdot 10^{-7}$	—
Лантан—140 . . . . .	$5,3 \cdot 10^{-6}$	—
Церий—144*) . . . . .	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Раствор осколков возр. 0,5 года	$1,1 \cdot 10^{-7}$	—
Раствор осколков возрастом 1 год	$2,78 \cdot 10^{-8}$	—
Раствор осколков возрастом 2 г.	$9,0 \cdot 10^{-9}$	—

\*) В равновесии с дочерним продуктом.

### 3. Предельно-допустимые нормы радиоактивного загрязнения воздуха отдельными изотопами

В настоящее время еще нет достаточно данных как по распределению, так и по токсическому действию радиоактивных изотопов при попадании их в дыхательные пути. Вследствие этого, в данном случае не было возможности применить методы расчета, аналогичные использованным нами при определении предельно-допустимых норм радиоактивного загрязнения воды. Из-за этого мы вынуждены были принять ряд упрощенных предположений относительно поведения радиоактивности в дыхательных путях.

Из довольно большой литературы по ингаляционным опытам с разными веществами, в основном неактивными, можно сделать следующие выводы:

1. Основным фактором, определяющим задерживание вещества в дыхательных путях, является дисперсность аэрозоля. Частицы сравнительно

крупных размеров задерживаются, прежде всего, в верхних дыхательных путях, тогда как при отложении вдыхаемого вещества в легких главную роль играют мелкие частицы. Однако при дальнейшем уменьшении диаметра частиц (ниже 1 микрона) процент осаждающего вещества уменьшается, вследствие уменьшения скорости осаждения остальных частиц. При размерах частиц диаметром от 1 до 10 микрон, т. е. таких, с которыми чаще всего приходится встречаться на практике, количество вещества, задерживающееся в легких, составляет в среднем 25% от всего вдыхаемого количества.

2. Крупные частицы аэрозолей, задерживающиеся в верхних дыхательных путях, как правило, выводятся оттуда при помощи мерцательного эпителия и, после проглатывания, попадают в желудочно-кишечный тракт. Судьба более мелких частиц, задерживающихся в альвеолах, определяется физико-химическим состоянием аэрозоля, как например, растворимость, вид химических соединений и т. д. Этими факторами, в основном, определяется процент резорбированного вещества из легких. Нерезорбированная часть аэрозолей выводится из легких с определенной скоростью. Механизм этого выведения еще не вполне ясен. Характер распределения по органам вещества, резорбированного из легких, и выделение его из органов, в основном, аналогичны таким при других способах введения.

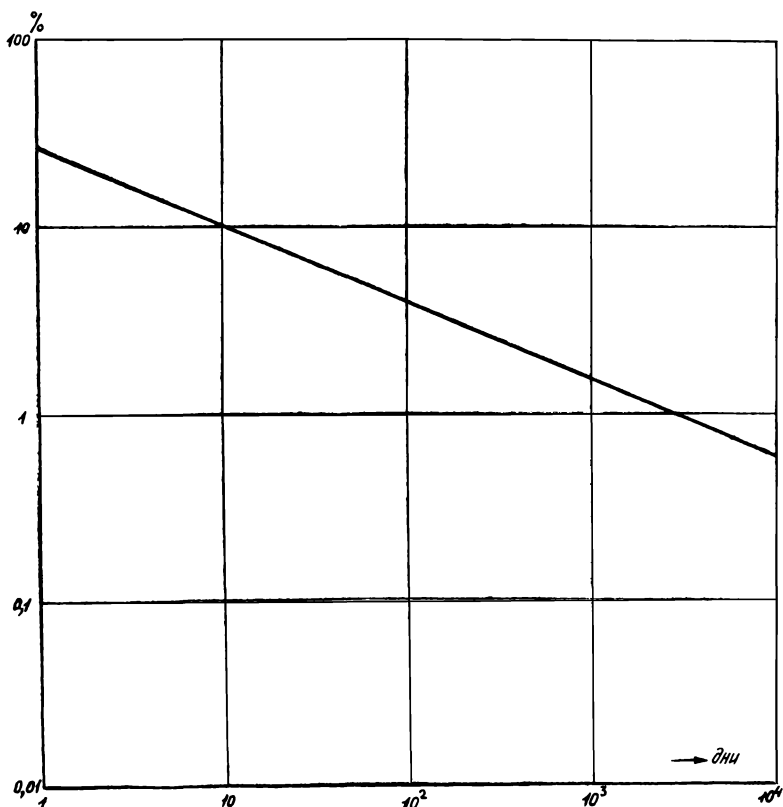


Рис. 3. Изменение содержания аэрозоля в легких с течением времени

Исходя из вышесказанного, мы при расчетах предельно-допустимых норм содержания радиоактивности в воздухе приняли следующие предположки:

1. Количество вещества, задерживаемого легкими при вдыхании радиоактивного аэрозоля, составляет 25%;

2. При учете дальнейшей судьбы радиоактивных аэрозолей, задержанных легкими, мы сознательно отказались от индивидуального рассмотрения каждого из радиоактивных изотопов с различными возможностями поведения его, в зависимости от состава и природы аэрозоля, ввиду отсутствия точных экспериментальных данных и ввиду того, что такое индивидуальное рассмотрение не дало бы возможности сделать общие выводы для всех возможных случаев состава аэрозолей, встречающихся в практике. Поэтому расчеты велись на основании двух крайних положений:

а) все количество задержанного легкими аэрозолями (25%) резорбируется и распределяется по органам так, как и при внутривенном введении;

б) задержанные легкими 25% вдыхаемого аэрозоля не резорбируются совершенно и выводятся из легких с определенной скоростью. Эта скорость выделения из легких принята нами из наиболее точных, известных нам, данных (см. Скот, Аксельрод, Кроулей, Фишер и Гамильтон, 1948), и может быть выражена соответствующей кривой, показанной на рисунке 3.

В первом случае расчет предельно-допустимых норм радиоактивного загрязнения воздуха проводится аналогично расчету предельно-допустимых норм радиоактивности для перорального введения с учетом потребления воздуха.

Предельно-допустимые количества радиоактивности изотопов для ежедневного вдыхания в этом случае будут равны предельно-допустимым количествам их для перорального введения, приведенным в таблицах 3 и 4, первой части этой работы, умноженным на отношение  $\alpha_k / \alpha_d$ , где  $\alpha_k$  — коэффициент резорбции данного вещества из желудочно-кишечного тракта при пероральном введении,  $\alpha_d$  — 0,25 задерживаемая легкими и резорбирующаяся часть вдыхаемого вещества. Так и в первом случае перорального введения. дальнейший расчет для каждого изотопа проводится по наименьшему содержанию активности в скелете или печени, вызывающему предельно-допустимую дозу излучения. Для некоторых изотопов в этом случае расчет предельно-допустимых норм можно было бы вести и по дозе излучения в легких, возникающей при прохождении через них радиоактивного вещества, однако они заведомо будут выше, чем в ниже рассматриваемом втором предельном случае, т. е. при отсутствии резорбции из легких.

Во втором случае решающим является доза облучения, возникающая в самих легких, так как дозой в желудочно-кишечном тракте, а также и в других органах, вследствие возможной резорбции из желудочно-кишечного тракта, выведенного из легких и проглоченного радиоактивного вещества, с уверенностью можно пренебречь, по сравнению с дозой в легких.

Предельно-допустимое содержание радиоактивных изотопов в легких в этом случае будет равно:

$$A = \delta A_0 \sum_{0}^t e^{-(\lambda t + \beta \int \lambda t)} \quad (3),$$

где  $A_0$  — предельно-допустимое количество изотопа для ежедневного ингаляционного введения;

$\delta$  — та часть радиоактивности, которая задерживается в легких ( $\delta = 0,25$ );

$\beta$  — коэффициент, характеризующий скорость выведения изотопа

Таблица 3.

Предельно-допустимые нормы радиоактивного загрязнения воздуха в кюри на литр для различных сроков при 8-часовом рабочем дне, вычисленных для двух предельных случаев:

Э л е м е н т	I случай: задержанный легкими аэрозоль полностью резорбируется				II случай: задержанный легкими аэрозоль не резорбируется			
	С р о к и   р а б о т ы							
	10 дней	1 год	3 года	40 лет	10 дней	1 год	3 года	40 лет
Плутоний 239 . . . . .	8,0·10 <sup>-12</sup>	2·10 <sup>-13</sup>	7,0·10 <sup>-14</sup>	5,0·10 <sup>-15</sup>	9,0·10 <sup>-13</sup>	1·10 <sup>-13</sup>	5,5 · 10 <sup>-14</sup>	10,5·10 <sup>-15</sup>
Стронций 89 . . . . .	7,5·10 <sup>-10</sup>	1·10 <sup>-10</sup>	9,5·10 <sup>-11</sup>	9,5·10 <sup>-11</sup>	8,0·10 <sup>-11</sup>	1,9·10 <sup>-11</sup>	1,2·10 <sup>-11</sup>	1,9·10 <sup>-11</sup>
Стронций 90 . . . . .								
Иттрий 90 . . . . .	3,25·10 <sup>-10</sup>	1,2·10 <sup>-11</sup>	4,3·10 <sup>-12</sup>	5,5·10 <sup>-13</sup>	3,85·10 <sup>-11</sup>	4,4·10 <sup>-12</sup>	2,45·10 <sup>-12</sup>	6,0·10 <sup>-13</sup>
Иттрий 90 . . . . .	1,2·10 <sup>-9</sup>	1·10 <sup>-9</sup>	1,10 <sup>-9</sup>	1·10 <sup>-9</sup>	0,9·10 <sup>-10</sup>	0,85·10 <sup>-10</sup>	0,85·10 <sup>-10</sup>	0,85·10 <sup>-10</sup>
Иттрий 91 . . . . .	4,5·10 <sup>-10</sup>	4,65·10 <sup>-11</sup>	4,45·10 <sup>-11</sup>	4,45·10 <sup>-11</sup>	7,5·10 <sup>-11</sup>	1,65·10 <sup>-11</sup>	1,6·10 <sup>-11</sup>	1,6·10 <sup>-11</sup>
Цирконий 95—ниобий 95 . . . . .	1,1·10 <sup>-9</sup>	1,2·10 <sup>-10</sup>	1,15·10 <sup>-10</sup>	1,15·10 <sup>-10</sup>	2,2·10 <sup>-10</sup>	2,55·10 <sup>-11</sup>	2,55·10 <sup>-11</sup>	2,55·10 <sup>-11</sup>
Ниобий 95 . . . . .	2,85·10 <sup>-9</sup>	8,0·10 <sup>-10</sup>	8,0·10 <sup>-10</sup>	8,0·10 <sup>-10</sup>	3,4·10 <sup>-10</sup>	9,5·10 <sup>-11</sup>	9,5·10 <sup>-11</sup>	9,5·10 <sup>-11</sup>
Рутений 106 . . . . .	1,1 · 10 <sup>-9</sup>	2,35·10 <sup>-10</sup>	2,25·10 <sup>-10</sup>	2,25·10 <sup>-10</sup>	3,05·10 <sup>-11</sup>	4,4·10 <sup>-12</sup>	3,35·10 <sup>-12</sup>	3,2·10 <sup>-12</sup>
Цезий 137 . . . . .	3,5·10 <sup>-9</sup>	2,05·10 <sup>-9</sup>	1,45·10 <sup>-9</sup>	9,0·10 <sup>-10</sup>	1,7·10 <sup>-10</sup>	1,95·10 <sup>-11</sup>	1,1·10 <sup>-11</sup>	2,5·10 <sup>-12</sup>
Барий 140 — лантан 140 . . . . .	4,0·10 <sup>-10</sup>	1,85·10 <sup>-10</sup>	1,85·10 <sup>-10</sup>	1,85·10 <sup>-10</sup>	5,0·10 <sup>-11</sup>	2,5·10 <sup>-11</sup>	2,5·10 <sup>-11</sup>	2,5·10 <sup>-11</sup>
Лантан 140 . . . . .	4,25·10 <sup>-10</sup>	4,2·10 <sup>-10</sup>	4,2 · 10 <sup>-10</sup>	2,2·10 <sup>-10</sup>	1,9·10 <sup>-10</sup>	1,9·10 <sup>-10</sup>	1,9·10 <sup>-10</sup>	1,9·10 <sup>-11</sup>
Церий 144 . . . . .	7,0·10 <sup>-11</sup>	2,2·10 <sup>-11</sup>	1,75·10 <sup>-11</sup>	1,6·10 <sup>-11</sup>	3,2·10 <sup>-11</sup>	4,6·10 <sup>-12</sup>	3,6·10 <sup>-12</sup>	3,4·10 <sup>-12</sup>
Неразделенный раствор осколков воз- растом 0,5 г. . . . .	3,6·10 <sup>-10</sup>	8,0·10 <sup>-11</sup>	6,6·10 <sup>-11</sup>	3,8·10 <sup>-11</sup>	1,1·10 <sup>-10</sup>	1,9·10 <sup>-11</sup>	1,6·10 <sup>-11</sup>	1,3·10 <sup>-11</sup>
Возрастом 1 год . . . . .	2,0·10 <sup>-10</sup>	5,1·10 <sup>-11</sup>	4,0·10 <sup>-11</sup>	1,7·10 <sup>-11</sup>	8,3·10 <sup>-11</sup>	1,2·10 <sup>-11</sup>	1,1·10 <sup>-11</sup>	0,7·10 <sup>-11</sup>
Возрастом 2 года . . . . .	1,7·10 <sup>-10</sup>	3,9·10 <sup>-11</sup>	2,7·10 <sup>-11</sup>	8,0·10 <sup>-12</sup>	7,7·10 <sup>-11</sup>	1,0·10 <sup>-11</sup>	7,0·10 <sup>-12</sup>	4,5·10 <sup>-12</sup>

Примечание: Для случая отсутствия резорбции, учет гамма-излучения в легких производится, исходя из сферической формы легких диаметром 12,2 см (вес 950 г).

из легких, определяемой по наклону кривой рис. 3 ( $\beta=0,41$ ). Из уравнения (3) получаем:

$$A_0 = \frac{A}{\delta \sum_{o} e^{-(\lambda t + \beta \int \lambda t)} dt} \quad (4)$$

Суточный дыхательный объем человека по литературным данным (см. Шуберт, 1951) равен  $10 \text{ м}^3$  в течение 8-часового рабочего дня и  $10 \text{ м}^3$  в течение остальных не рабочих 16 часов.

Делением предельно-допустимых норм для ежедневного ингаляционного введения на дыхательный объем в течение рабочего дня получим предельно-допустимые нормы радиоактивного загрязнения воздуха.

Ниже в таблице 3 приводятся предельно-допустимые нормы радиоактивного загрязнения воздуха, вычисленные для двух вышеуказанных предельных случаев.

Само собой разумеется, что практически все случаи будут более или менее отличаться от указанных двух крайних возможностей и займут какое-то промежуточное положение. Во всяком случае величины искомым предельно-допустимых норм радиоактивного загрязнения воздуха будут либо в этом интервале, либо выше, чем рассчитанные при этих предположениях.

Таким образом, возможно, что вычисленные предельно-допустимые нормы радиоактивного загрязнения воздуха будут несколько заниженными, что, однако, даст некоторый необходимый гарантийный запас.

Из таблицы 3 видно, что предельно-допустимые нормы радиоактивного загрязнения воздуха, рассчитанные в предположении полной резорбции из легких, т. е. по распределению в скелете и печени, в большинстве случаев несколько выше, чем при отсутствии резорбции. Если и в этом случае принять во внимание возможность неравномерного распределения в скелете и печени после резорбции из легких, то расхождение между этими результатами для большинства изотопов будет незначительным.

Опыты по ингаляции плутония, проведенные И. П. Трегубенко на белых крысах, полностью подтвердили данные теоретические расчеты.

#### 4. Резюме

В работе приводится методика и результаты расчета предельно-допустимых норм радиоактивных загрязнений воды плутонием и некоторыми «осколочными элементами». Расчеты проведены на основании данных токсикологических опытов. Результаты расчетов сопоставляются с данными, полученными на основании распределительных опытов. Рассчитаны предельно-допустимые нормы радиоактивного загрязнения воздуха.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горбатьюк Н. В., Тимофеев-Ресовский Н. В. I часть. «О предельно-допустимых нормах радиоактивного загрязнения воды и воздуха». Бюлл. Уральского отделения МОИП, 3, 1959.
2. Bliss, C. J., 1937. Ann. appl. Biology, 24.
3. Bloom, 1948 „Histopathology of Irradiation from external and internal sources., N.-V.
4. Bush, F. 1949. Brit. Journ. Radiol., 22.
5. Cohn, W. E. 1948. Nucleonics, 21.
6. Fink, R. 1950. „Biological studies with polonium, radium and plutonium“. N.-V.
7. Gray, L. H., 1937. Brit. Journ. Radiol., 10.
8. Hamilton, J. G., 1947. Radiology, 49.
9. Hoecker and Rofe, 1951. Radiology, 56.
10. Mauneord, W. V., 1950. Brit. Journ. Radiol. Supplementum 2.
11. Morgan, K. Z. 1947. Journ. Phys. Coll. Chemistr., 51.

12. Oddie, T. H. 1951. Brit. Journ. Radiol., 24.
  13. Richards P. J. and B. A. Rubin, 1950. Nucleonics, 6.
  14. Schubert. J. 1951. Nucleonics, 8.
  15. Scott K. G. Axelrod, D. J. Krowley, J. F. Ftsher H. and Hamilton, J. g. 1948. Journ Biol. Chem., 176.
  16. Handbook, 52. National Bureau of Standards, 1953. „International Recommendations on Radiological Protection“. Brit. Journ. Radiol., 24.
-