

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика С. П. КОРОЛЕВА

Г.Д. Мальчиков

Г.А. Алемаскина

**РАДИОАКТИВНОСТЬ
И ЕЕ ВЛИЯНИЕ
НА БИОСФЕРУ**

САМАРА 1997

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА

*Г.Д. Мальчиков
Г.А. Алемаскина*

*РАДИОАКТИВНОСТЬ И ЕЕ
ВЛИЯНИЕ НА БИОСФЕРУ*

Учебное пособие

САМАРА 1997

УДК 502.55: 621.039.7

Радиоактивность и ее влияние на биосферу: Учеб. пособие / Г.Д. Мальчиков, Г.А. Алемаскина. Самар. аэрокосм. ун-т. Самара, 1997. 40 с.

ISBN 5-7883-0013-4

Показано влияние радиоактивных излучений на окружающую среду и, главным образом, на человека. Рассмотрены следующие понятия: радиоактивность, виды радиоактивных излучений, единицы излучения радиоактивности и их соотношение. Приведены примеры расчетов активности, плотности потока излучения, поглощенной дозы и др., а также примеры ядерных реакций. Показано взаимодействие ионизирующего излучения с веществом и действие радиации на биосферу. Один из разделов посвящен рассмотрению источников радиоактивных загрязнений и последствий аварий на атомных станциях, в частности, Чернобыльской. Затронут вопрос об атомной энергетике.

Предназначено для студентов всех специальностей, изучающих дисциплину «Экология». Подготовлено на кафедре химии. Табл. 7. Ил. 4. Библиогр.: 18 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева

Рецензенты: *проф. П.П. Пурыгин, доц. В.Д. Измайлов*

ISBN 5-7883-0013-4

© Г.Д. Мальчиков, Г.А. Алемаскина, 1997
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 1997

* * *

Развитие ядерного оружия и энергетики, широкое внедрение радиоактивных элементов в различные области науки, техники, медицины создали потенциальную угрозу радиационной опасности для живого мира земли. Радиационные загрязнения имеют существенные и принципиальные отличия от других видов загрязнений.

В настоящее время ядерная техника и даже само явление радиоактивности приобрели печально широкую известность. Этому способствовали публикации секретных фактов массовых облучений населения (Челябинск-40, Семипалатинск, Новая Земля, Точкие военные лагеря и др.) и особенно — глобальная планетарная Чернобыльская катастрофа. Вопрос о перспективах развития ядерной энергетики касается каждого. Ответ на этот вопрос сейчас остается открытым.

1. РАДИОАКТИВНОСТЬ

Радиоактивность — это самопроизвольное превращение (распад) атомных ядер изотопов некоторых химических элементов (урана, тория, радия и др.), приводящее к изменению их атомного номера и массового числа.

Ядерные реакции сопровождаются ионизирующим излучением (частицы, рентгеновское электромагнитное излучение). В 1896г. А. Беккерель открыл проникающее излучение, которое позже было названо радиоактивным. В истории исследований радиоактивности можно выделить 4 периода. До 1913г. были заложены основы представлений о радиохимии (П. Кюри, М. Склодовская-Кюри открыли и выделили радий и полоний), открыты и систематизированы в три семейства (^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U) все естественные радионуклоны (неус-

тойчивые ядра изотопов химических элементов). До 1934г. (К. Фаянс, Ф. Панет, В.Г. Хлопин, О. Ган и др.) создали способы выделения и исследования радиоактивных препаратов. В третий период (до 1945г.) в работах Ф. и И. Жолио-Кюри, Э. Ферми, О. Гана, И.В. Курчатова, Э. Сегре, Г. Сиборга и др. были получены искусственные радионуклоны, открыты ядерные реакции, в том числе и деление урана. Современный период — это ядерное оружие, ядерная энергетика, новые технологические схемы переработки радиоактивного сырья и отходов, радиобиология и т. д.

1.1. Закон самопроизвольного радиоактивного распада

Он выражается дифференциальным уравнением

$$-\frac{dN}{d\tau} = \lambda N \quad (1)$$

В интегральной форме

$$N_{\tau} = N_0 \cdot e^{-\lambda\tau} \quad (2)$$

где N_{τ} — количество ядер, оставшихся по истечении времени τ после распада исходного количества ядер N_0 ;

λ — постоянная радиоактивного распада.

Для характеристики скорости радиоактивного процесса и устойчивости изотопа вводят понятие *периода полураспада* — T или $1/2$ — это время, за которое первоначальное количество изотопов уменьшается вдвое, т. е. при $\tau = T$ $N_{\tau} = N_0 / 2$. Тогда из уравнения (2) следует

$$N_{\tau} / N_0 = e^{-\lambda\tau} = 1 / 2 \quad \lambda T = \ln 2 = 0,693$$

и, наконец,

$$\lambda = 0,693 / T \quad (3)$$

Периоды полураспада характеризуют время жизни радиоактивного изотопа. Так, период полураспада ^{238}U равен $4,51 \cdot 10^9$ лет, ^{41}K — $6,7 \cdot 10^9$ с, ^{222}Rn — 3,85 суток.

Это означает, например, для радона массой 1 г, что через 3,85 суток останется только 0,5 г Rn, еще через 3,85 суток — 0,25 г Rn, затем — 0,125 г и т. д.

Зависимость количества нераспавшегося радона от времени показана на рис. 1.

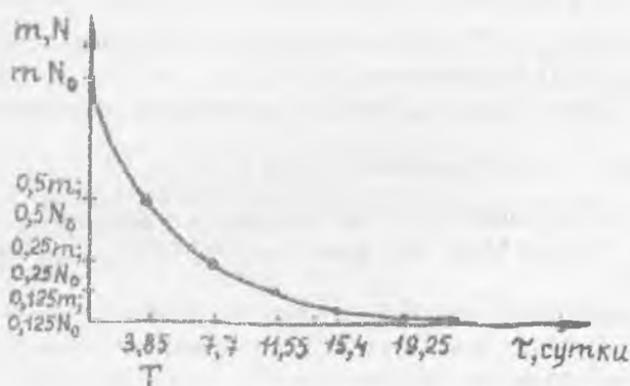


Рис. 1. Зависимость количества нераспавшегося радона от времени

Из уравнений (2) и (3) следует:

$$\frac{N_{\tau}}{N_0} = e^{-\frac{0,693\tau}{T}}, \quad (4)$$

откуда, зная период полураспада изотопа, можно найти относительное уменьшение его количества на любой момент времени. Для $\tau = 1T$ остается 50% от исходной массы изотопа, для $\tau = 2T$ — 25%, $\tau = 3T$ — 12,5%, $\tau = 4T$ — 6,25%, $\tau = 5T$ — 3%, $\tau = 6T$ — 1,5%, $\tau = 7T$ — 0,75%, $\tau = 8T$ — 0,375%, $\tau = 9T$ — 0,1875%, $\tau = 10T$ — 0,09375%.

1.2. Виды излучений

Природа радиационной опасности заключается во взаимодействиях с веществом ионизирующего радиоактивного излучения. Результатами взаимодействия являются ионизация атомов и молекул вещества и образование ионов, свободных радикалов, других изотопов элементарных частиц. Это приводит к биоповреждению цитоплазмы, мембран клетки, тканей и пр. Степень поражения пропорциональна числу образовавшихся пар ионов, превращений атомов.

Различают следующие виды ионизирующих излучений:

рентгеновское — коротковолновое электромагнитное излучение (до 20Å);

γ -излучение, жесткое с очень короткими длинами волн (менее 1Å) рентгеновское излучение;

β -излучение — поток отрицательно (электрон) или положительно (позитрон) заряженных частиц;

α -лучи — поток ядер атомов гелия с зарядом $+2$, состоящих из 2 протонов и 2 нейтронов — $({}^4_2\text{He})^{2+}$;

n-лучи — поток нейтронов, по энергии различают: холодные и тепловые — до $0,5$ МэВ, быстрые — до 10 МэВ и сверхбыстрые — > 10 МэВ;

космические лучи (частицы, электромагнитное излучение) в сочетании с естественным излучением земли создают фоновое излучение, к которому адаптировалась существующая биота земли.

Источниками излучений служат радиоактивные естественные и искусственные изотопы элементов, получаемых в ядерных реакциях. Атомная техника, боеприпасы, ускорители заряженных частиц, рентгеновские установки, космос и прочее являются источниками излучений.

Характер и результат взаимодействия ионизирующего излучения со средой определяются:

— пробегом частицы — это проникающая способность излучения;

— линейной передачей энергии — это скорость потери энергии частицы при прохождении единицы длины пробега в среде;

— энергией частицы излучения.

2. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ

Следует различать измерение количества радиоактивности радиоактивного вещества и количество поглощенной энергии, в том числе дозу энергии, вызывающую биологические поражения.

2.1. Активность

Активностью называется мера количества радиоактивного вещества, выражаемая числом радиоактивных превращений в

единицу времени. В системе СИ за единицу активности принято одно ядерное превращение в секунду (расп./с). Эта единица получила название *беккереля* (Бк). Внесистемной единицей измерения активности является *кюри* (Ки). *Кюри* — это единица активности, равная активности нуклеида (неустойчивого ядра), в котором происходит $3,7 \cdot 10^{10}$ актов распада в одну секунду. Единица активности *кюри* соответствует активности 1 г радия (Ra). Она связана с *беккерелем* следующим образом:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп./с} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}; 1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^9 \text{ Ки}.$$

Кюри представляет собой большую активность, на практике используют

$$1 \text{ мКи} = 10^{-3} \text{ Ки}; 1 \text{ мкКи} = 10^{-6} \text{ Ки}.$$

Активность препарата (A) с периодом полураспада (T) и масса (m , г) взаимосвязаны: $A = \lambda N$ или в Ки

$$A = \frac{\lambda N}{3,7 \cdot 10^{10}}.$$

Выразив постоянную распада λ через T по уравнению (3), найдем количество активных атомов:

$$N = \frac{AT \cdot 3,7 \cdot 10^{10}}{0,693} \text{ атомов} = 5,4 \cdot 10^{10} AT. \quad (5)$$

По Авогадро известно, что грамм-атом элемента содержит $6,02 \cdot 10^{23}$ атомов, следовательно, в 1 г вещества с атомной массой a содержится

$$\frac{6,02 \cdot 10^{23}}{a} \text{ атомов}.$$

Если представить, что активный препарат содержит чистый изотоп, т. е. все атомы активны, то получим массу препарата (в г)

$$m = \frac{Na}{6,02 \cdot 10^{23}}$$

Поставив в это выражение N из уравнения (5), получим уравнение для *пересчета активности в массу препарата* (в г):

$$m = 8,9 \cdot 10^{-14} A \cdot T \cdot a. \quad (6)$$

Пример: Найти количество активных атомов полония (^{210}Po) и массу, если $A = 2 \text{ Ки}$, $T = 138$ суток $= 1,1 \cdot 10^7 \text{ с}$.

Решение: $N = 5,4 \cdot 10^{10} \text{ AT} = 5,4 \cdot 10^{10} \cdot 2,0 \cdot 1,1 \cdot 10^7 =$
 $\approx 1,9 \cdot 10^{17}$ атомов;

$$m = 8,9 \cdot 10^{-14} \text{ A} \cdot T \cdot a = 8,9 \cdot 10^{-14} \cdot 2,0 \cdot 1,1 \cdot 10^7 \cdot 210 = 4,1 \cdot 10^{-4} \text{ г.}$$

Соотношение (6) является важным, т. к. для очень активных изотопов в практической работе можно использовать активность вместо массы, а в других случаях — массу. Например, активность в 1,0 Ки соответствует массе ^{238}U ($T = 4,5 \cdot 10^9$ лет) — $3 \cdot 10^5$ г; для ^{239}Pu ($2,4 \cdot 10^4$ лет) — 16,1 г; для ^{90}Sr (28 лет) — $5 \cdot 10^{-3}$ г и т. д.

Концентрация или удельная активность радиоактивного изотопа в среде, например в воздухе, воде, минералах, рудах, определяется единицей активного изотопа в единице среды, например:

$$\frac{\text{г Ra}}{\text{г руды}}; \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}; \frac{\text{Ки}}{\text{см}^3}; \frac{\text{Ки}}{\text{м}^3} \text{ и т. д.}$$

Активность точечного, плоского и других источников требует введения понятия о *потоке излучения*.

Зная полную активность источника, можно определить плотность потока излучения ϕ (рис.2).

Плотность потока излучения ϕ , $1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ — это поток

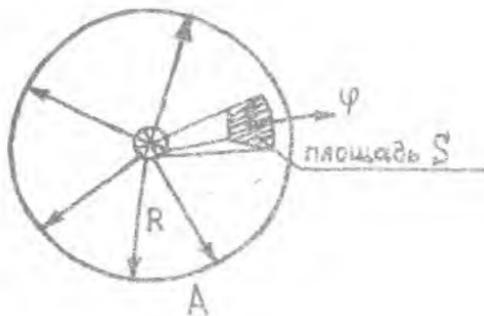


Рис.2. К расчету плотности потока излучения точечного источника

частиц (энергии), проходящий через площадку S (см^2) в единицу времени (с):

$$\Phi = \frac{N}{4\pi R^2 \tau} = \frac{3,7 \cdot 10^{10} \cdot A}{4\pi R^2 \tau}$$

или в $\text{МэВ}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$

$$\Phi' = \frac{E \cdot N}{4\pi R^2 \tau} \quad (7)$$

где E — энергия одной частицы,

N — число частиц,

A — активность источника, Ки.

Пример: Определить на расстоянии $R = 1$ м плотность потока γ и β -излучений ^{86}Rb с активностью $A = 2$ Ки, испускающего за один распад 91,5% β -частиц с энергией $E_\beta = 1,7$ МэВ и 8,5% γ -квантов с энергией $E_\gamma = 1,1$ МэВ.

Решение: По уравнению (7) и учитывая, что 1 Ки соответствует $3,7 \cdot 10^{10}$ распада/с, имеем:

$$\Phi_\beta = \frac{3,7 \cdot 10^{10} \cdot 2 \cdot 0,915}{4\pi \cdot 100^2 \cdot 1} = 0,54 \cdot 10^6 \frac{\beta\text{- частицы}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}};$$

$$\Phi_\beta = \Phi_\beta \cdot E_\beta = 0,54 \cdot 10^6 \cdot 1,7 = 0,92 \cdot 10^6 \frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}};$$

$$\Phi_\gamma = \frac{3,7 \cdot 10^{10} \cdot 2 \cdot 0,085}{4\pi \cdot 100^2 \cdot 1} = 0,46 \cdot 10^5 \frac{\gamma\text{- квантов}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}};$$

$$\Phi'_\gamma = \Phi_\gamma \cdot E_\gamma = 0,46 \cdot 10^5 \cdot 1,1 = 0,51 \cdot 10^5 \frac{\text{МэВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}.$$

Итак, активность радиоактивного источника выражается следующими единицами измерения:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк} = 1 \text{ г Ra}. \quad (8)$$

2.2. Поглощенная средней дозой излучения

Степень, глубина и форма лучевых поражений, развивающихся среди биологических объектов при воздействии на них ионизирующего излучения, в первую очередь зависят от величины *поглощенной энергии* излучения. Для характеристики этого показателя используется понятие поглощенной дозы, т. е. энергии, поглощенной единицей массы облучаемого вещества. За единицу поглощенной дозы облучения принимается джоуль на кг (Дж/кг) — грей (Гр). Грей — поглощенная доза излучения (измеряемая энергией в Дж) массой облучаемого вещества в 1 кг:

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг.}$$

В радиобиологии и радиационной гигиене широкое применение получила внесистемная единица поглощенной дозы — рад. Рад — это такая поглощенная доза, при которой количество поглощенной энергии в 1 г любого вещества составляет 100 эрг:

$$1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/г}; 1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад.}$$

Для характеристики степени ионизации воздуха под воздействием рентгеновского и γ -излучений используется *экспозиционная доза облучения*, рентген (1 р), в результате которой в 1 см³ (0,001293 г) воздуха при 760 мм рт. ст. и 0°С образуется $2,1 \cdot 10^9$ пар ионов, т. е.

$$\begin{aligned} 1 \text{ р} &= 2,1 \cdot 10^9 \text{ пар ионов / см}^3 \text{ воздуха} = \\ &= \frac{2,1 \cdot 10^9}{0,001293} = 1,61 \cdot 10^{12} \text{ пар ионов / г воздуха.} \end{aligned}$$

На образование 1 пары ионов требуется затратить 34 эВ энергии (1эВ = $1,61 \cdot 10^{-12}$ эрг), таким образом, энергетический эквивалент рентгена

$$1 \text{ р} = 1,61 \cdot 10^{12} \cdot 34 \cdot 1,61 \cdot 10^{-12} = 87,7 \text{ эрг / г воздуха.}$$

По определению единица поглощенной дозы

$$1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/г, таким образом, } 1 \text{ р} = 0,877 \text{ рад} = 87,7 \text{ Гр.}$$

Все вышесказанное справедливо только для взаимодействия рентгеновского и γ -излучений с воздушной средой. Для иных сред, в том числе биологических тканей, соотношения будут иными.

Установлено, что при одинаковом количестве энергии различных видов излучений, поглощенных живыми тканями, в одинаковых условиях возникают разные биологические эффекты.

Единицей эквивалентной дозы любого вида излучения, поглощенной 1 кг биологической ткани, создающей такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 Гр фотонного излучения, является *зиверт* (Зв). Внесистемной единицей является *бэр* — *биологический эквивалент рентгена* — энергия любого вида излучения, поглощенная 1 г ткани, при которой производится ионизирующий эффект, равный действию рентгеновского γ -излучения при дозе облучения 1 рентген.

Принято: 1 Бэр = η рад,

где η — коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ) различных видов излучений:

$\eta = 1$ для β -частиц, γ -квантов и рентгеновского излучения;

$\eta = 3$ для тепловых нейтронов;

$\eta = 10$ для α -частиц и протонов;

$\eta = 10$ для быстрых нейтронов;

$\eta = 20$ для тяжелых ядер.

Итак, для единиц поглощенной дозы можно использовать *приближенные соотношения*:

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр} = 1,1 \text{ р} = 10,03 \text{ в} = 1/\eta \text{ Бэр.} \quad (9)$$

3. ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ ОБЛУЧЕНИЯ

Определение предельно допустимых уровней излучений для живых организмов и человека связано с драматическими судьбами людей, открывших эру атомной энергии. В отдельных странах первые попытки были в 1925г. В 1931г. для работы с рентгеновскими лучами была установлена предельно допустимая доза (ПДД) — 0,2 р в день. Далее по мере изучения последствий облучения нормы снижались. Санитарные нормы устанавливают уровни для 3 категорий:

категория А — это профессионалы, непосредственно работающие с радиоактивными препаратами;

категория Б — это лица, работающие в пределах санитарно-защитной зоны;

категория В — население, находящееся за пределами санитарно-защитной зоны.

В табл. 1 приводятся предельно допустимые поглощенные дозы (ПДД), принятые в стране. ПДД — это наибольшая доза, действие которой на организм не вызывает необратимых изменений.

ПДД, поглощенные для различных категорий населения
в зависимости от видов излучения

Категория	Бэр		ПДД, мрад/неделя			
	Неделя	Год	Рентгеновские, γ -, β -лучи, ОБЭ=1	Тепловые нейтроны, ОБЭ=3	α -, быстрые нейтроны, ОБЭ=10	Тяжелые ядра, ОБЭ=20
А	0,1	5	100	33	10	5
Б	0,01	0,5	10	3	1	0,5
В	0,001	0,05	1	0,3	0,1	0,05

В табл. 2 приводятся предельно допустимые мощности (ПДМ) дозы или плотности потока (ПДПП) внешних излучений.

Таблица 2

ПДМ дозы или ПДПП внешних излучений в рабочей зоне
для категории А населения

Вид излучения	Энергия излучения	Доза за неделю, мр или частиц/см ²	ПДМ или ПДПП, мр/ч или см ⁻² ·с ⁻¹
Рентгеновские, γ -лучи	До 3 МэВ	(100)	(2,8)
β -лучи, быстрые нейтроны	До 10 МэВ	$2.6 \cdot 10^6$	20,0
Тепловые нейтроны	0,1 эВ	$7.2 \cdot 10^6$	550
	0,1 МэВ	$1.2 \cdot 10^6$	90

Данные табл. 1 — это нормы дозиметрического контроля персонала. В табл. 2 представлены нормы, которые после соответствующих радиометрических измерений на рабочем месте позволяют решить вопрос о времени работы на данном рабочем месте.

П р и м е р: Определить допустимое время работы профессионала (категория А), если радиометрические измерения рабочего места показали:

- плотность потока β -излучения $3000 \text{ частиц/см}^2 \cdot \text{мин}$,
- мощность γ -излучения $20 \text{ мк} \cdot \text{Зв/ч}$.

Р е ш е н и е: а) измеренная на рабочем месте плотность потока β -частиц $3000 \text{ частиц/см}^2 \cdot \text{мин} = 500 \text{ частиц/см}^2 \cdot \text{с}$.

Эта величина выше допустимого значения в $500/20 = 25$ раз (см. табл. 2) для β -излучений. Таким образом, допустимое

дневное время работы составляет $360 / 25 = 14,4$ мин, недельное время работы — $36/26 = 1,4$ часа.

$$б) \text{ мощность } 20 \text{ мЗв/ч} = \frac{0,02 \cdot 1,1}{10} = 2,2 \text{ мр/ч}$$

(см. соотношение (9)).

Эта величина меньше допустимой мощности дозы γ -излучения (см. табл. 2). Таким образом, на этом рабочем месте можно работать полный рабочий день (6 часов).

В практике возникает задача:

По данным радиометрических измерений активности отдельного радиоактивного препарата решить вопросы о допуске к работе или о времени работы.

Для точечного источника рентгеновского или γ -излучения с активностью A (Ки) на расстоянии R (см) от точки наблюдения по уравнению (7) можно найти плотность потока излучения Φ для наблюдателя.

Мощность дозы излучения источника для точки наблюдения находят по формуле

$$P = P_{\gamma} \frac{A}{R^2}, \quad (10)$$

где P — мощность дозы, р/ч;

A — активность рентгеновского или γ -источника, мкКи;

R — расстояние до источника, см;

P_{γ} — γ -постоянная, численно равная мощности дозы в р/ч, которую создает точечный источник активностью 1 мкКи на расстоянии 1 см, эта величина зависит от энергии γ -квантов и природы изотопов. В табл. 3 приводятся значения P_{γ} .

γ -постоянные некоторых изотопов

Изотоп	^{60}Co	^{132}I	^{134}Cs	^{226}Ra	^{40}K	^{238}U
$\frac{P \cdot \text{см}^2}{\text{ч} \cdot \text{мкКи}}$	13,2	4,28	8,9	9,53	0,86	0,091

4. ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ (ПДК)

Уровни облучения организма обусловлены предельно допустимым содержанием (ПДС) радиоактивных веществ в организме, пище, воде, воздухе.

Количество радиоактивных веществ в организме зависит от физических и химических свойств, путей поступления, распределения и накопления, а также способов и скорости выведения. Последнюю характеризуют временем полувыведения радиоактивного вещества из организма. Например, время полувыведения для изотопа ^{24}Na составляет 0,61 дня, ^{45}Ca -- 151 день, ^{131}I -- 7,7 дня, ^{90}Sr -- $2,4 \cdot 10^4$ дней. Важную роль играет место накопления радиоактивного изотопа в организме. Санитарные нормы устанавливаются, учитывая группы органов по наибольшей «чувствительности» к облучению:

I группа -- все тело, кроветворные органы, хрусталик, половые органы;

II группа -- мышцы, жировые ткани, печень, почки, легкие, желудочно-кишечный тракт;

III группа -- кожа, щитовидка, кости.

ПДД для различных групп критических органов приводятся в табл.4.

В табл. 5 приводятся ПДК радиоактивных изотопов.

Таблица 4

ПДД для критических органов и категорий населения

Категория населения	ПДД, мбэр/неделя		
	I группа	II группа	III группа
А	100	300	600
Б	10	30	60
В	1	10	20

ПДК радиоактивных изотопов в воде, воздухе

Изотоп	ПДК, мкКи/л			
	в питьевой воде	рабочее помещение	санитарно-защитная зона	населенные пункты
^{14}C	$2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^{-5}$
^{42}K	$6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$
^{60}Co	$1 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-8}$
^{90}Sr	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-9}$
^{131}I	$6 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-8}$
$^{134(137)}\text{Cs}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$
^{210}Po	$2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-10}$
^{226}Ra	$5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-10}$
^{230}Th	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-11}$
^{133}Xe	—	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$
^{135}Xe	—	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$

Пример: Рассчитать поглощенную дозу г-на Сидорова И.И., не имеющего дел с радиоактивностью, при систематическом потреблении с водой и воздухом: ^{90}Sr ($2 \cdot 10^{-5}$ мкКи/л в воде), ^{131}I ($5 \cdot 10^{-8}$ мкКи/л в воздухе), ^{60}Co ($0,5 \cdot 10^{-2}$ мкКи/л в воде).

Решение: Г-н Сидоров И.И. относится к категории В населения. Изотопы являются источниками: β -излучения ^{131}I и ^{90}Sr ; γ -излучения ^{60}Co , т. е. относительная биологическая эффективность всех загрязнителей равна 1,0.

Предельно допустимая поглощенная доза (табл.1) равна 1 мбэр/неделя. Найдем поглощенную дозу в условиях задачи.

Критическими органами для изотопов являются (см. табл.4) ^{90}Sr — кости (III группа), ПДД = 20 мбэр/неделя; ^{131}I — щитовидная железа (III группа), ПДД = 20 мбэр/неделя; ^{60}Co — кровь и кроветворные органы (I группа), ПДД = 1 мбэр/неделя.

Найдем превышение измеренных концентраций по сравнению с допустимыми концентрациями (ПДК, табл.5) для каждого изотопа:

$$^{90}\text{Sr}: \frac{2 \cdot 10^{-5}}{3 \cdot 10^{-5}} = 0,7; \quad ^{131}\text{I}: \frac{5 \cdot 10^{-7}}{9 \cdot 10^{-8}} = 0,6; \quad ^{60}\text{Co}: \frac{0,5 \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-2}} = 0,5.$$

Таким образом, для всех изотопов концентрации отдельно не превышают допустимых.

Находим суммарную поглощенную дозу по всем изотопам как долю от ППД с учетом превышений измеренных концентраций по сравнению с ПДК:

$$\text{ПДД}({}^{90}\text{Sr}) \cdot 0,7 + \text{ПДД}({}^{131}\text{I}) \cdot 0,6 + \text{ПДД}({}^{60}\text{Co}) \cdot 0,5 = 20 \cdot 0,7 + 20 \cdot 0,6 + 1 \cdot 0,5 = 26,5 \text{ мбэр/неделя.}$$

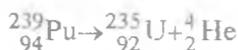
Эта величина превышает допустимую поглощенную дозу (1 мбэр/неделя) в 26,5 раз для населения и даже для работающих в санитарно-защитной зоне (10 мбэр/неделя). Такая доза допустима только для профессионалов (100 мбэр/неделя, см. табл. 1).

5. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Проходя через среду или вещество, радиоактивное излучение вступает с ними в реакцию и теряет при этом свою энергию. Обычно энергия теряется постепенно и поэтому каждый вид излучения проникает в материю лишь на определенную глубину, определяемую видом излучения, его энергией и характером материи.

5.1. Взаимодействие α – частиц с веществом

В настоящее время известно около 40 естественных и более 200 искусственных α – активных ядер, α – распад характерен для тяжелых элементов (урана, тория, полония, плутония и др.). В качестве примера α – распада можно привести распад плутония (Pu)



или распад полония (Po)



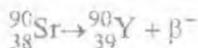
В начале пробега, когда α -частица обладает большей энергией (скоростью), удельная ионизация будет меньше, чем в конце пути. Частица, имеющая меньшую скорость, более эффективно взаимодействует с электронами оболочки атомов среды. Наибольшая удельная ионизация отмечается в последней трети длины пробега частицы.

Пробег α -частиц в воздухе не превышает 11 см, в мягких тканях человека пробег α -частиц измеряется микронами. Проходя через слой вещества, α -частицы испытывают упругое рассеяние на электронах и ядрах атомов и неупругие столкновения с орбитальными электронами.

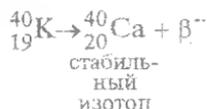
При неупругих столкновениях электрическое поле α -частицы, взаимодействуя с внешними электронами атомов и молекул, ускоряет электроны, преодолевая их взаимодействие с ядрами атомов, что приводит к процессам ионизации и возбуждения атомов и молекул, а иногда и к диссоциации молекул. При этом α -частицы теряют свою энергию.

5.2. Взаимодействие β -частиц с веществом

Примером электронного β -распада может служить распад стронция (${}_{38}^{90}\text{Sr}$)



или распад радиоактивного изотопа калия (${}_{19}^{40}\text{K}$)



При позитронном β -распаде происходит превращение протона в нейтрон, которое сопровождается образованием и выбросом из ядра позитрона. Заряд ядра и его порядковый номер уменьшаются на единицу.

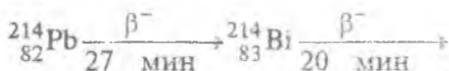
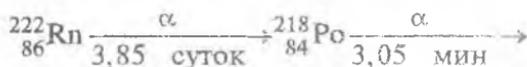
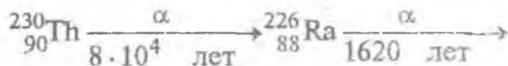
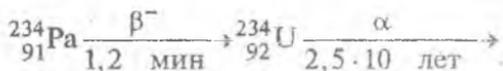
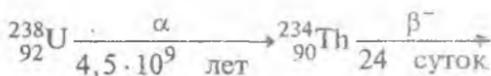
Примером позитронного β -распада может служить распад радионуклида натрия по реакции

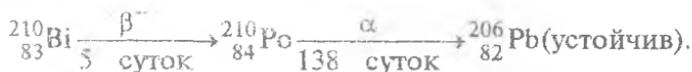
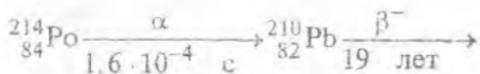


5.3. Спонтанные ядерные реакции

Спонтанным делением называется самопроизвольный распад ядер тяжелых элементов на два (иногда и три или четыре) ядра элементов середины периодической системы. Варианты такого деления очень разнообразны, чаще всего происходит распад исходного ядра на тяжелый и легкий осколки, несущие соответственно около 60 и 40% заряда и массы исходного ядра. Относительное содержание нейтронов в ядрах изотопов тяжелых элементов выше, чем в ядрах устойчивых изотопов середины периодической системы. Поэтому при спонтанном делении распадающееся ядро испускает 2-4 нейтрона, образующиеся ядра все еще содержат избыток нейтронов, оказываются неустойчивыми и поэтому претерпевают последовательный ряд β -распадов.

Элементы, расположенные в конце периодической системы (после висмута), не имеют стабильных изотопов. Подвергаясь радиоактивному распаду, они превращаются в другие элементы. Если вновь образовавшийся элемент радиоактивен, он тоже распадается, превращаясь в третий элемент, и так далее, до тех пор, пока не получаются атомы устойчивого изотопа. Ряд элементов, образующихся подобным образом один из другого, называется *радиоактивным рядом*. Примером может служить *ряд урана* — последовательность продуктов превращения изотопа ^{238}U , составляющего преобладающую часть природного урана; для каждого превращения указан тип радиоактивного распада и период полураспада:





Таким образом, конечным продуктом распада является устойчивый изотоп свинца. Откуда берется испускаемый ядром электрон или позитрон? Ведь в ядре их нет, а есть протоны и нейтроны. Оказывается, при ядерных реакциях нейтрон может превращаться в протон, при этом испускается электрон. При ядерных процессах других типов протон, испуская позитрон, теряет заряд и превращается в нейтрон. β -частицы в воздухе на своем пути создают в несколько сот раз меньше ионов, чем α -частицы. β -частицы, испускаемые атомными ядрами при радиоактивных превращениях, имеют различную энергию, поэтому и пробег их в веществе неодинаков.

Ослабление потока β -частиц веществом происходит постепенно. Слой вещества, равный длине пробега β -частиц, имеющих максимальную энергию, полностью затормозит все β -частицы, испускаемые данными радионуклидами. β -частицы при взаимодействии с атомами среды отклоняются от своего первоначального направления. Поэтому путь, проходимый β -частицей в веществе, представляет собой не прямую линию, как у α -частиц, а ломаную. Взаимодействуя с веществом среды, β -частицы часто проходят вблизи атомных ядер. Под влиянием положительного заряда ядра отрицательно заряженная β -частица резко тормозится и теряет при этом часть своей энергии. Энергия, потерянная β -частицей при торможении, излучается в виде тормозного рентгеновского излучения.

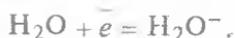
Заряженные α и β -частицы, проходя через вещество, редко сталкиваются с ядрами атомов. Весь объем ядра, несмотря на то, что в нем сосредоточена почти вся масса атома, в миллиард раз меньше объема атома. В основном заряженные частицы взаимодействуют с электронами и отрывают их от атомов и молекул. При этом выбитый со своей орбиты электрон может присоединиться к другой молекуле, превращая ее в отрицатель-

ный ион, а атом или молекула, потеряв электрон, становится положительно заряженным ионом.

Например, при ионизации молекулы воды происходит реакция



Освобожденный электрон присоединяется к другой молекуле воды:



Таким образом, под влиянием излучения вместо двух нейтральных молекул воды возникает два противоположно заряженных иона.

5.4. Взаимодействие γ -излучения с веществом

γ -излучение, испускаемое атомными ядрами при радиактивных превращениях, обладает энергией от нескольких тысяч до нескольких млн. электрон-вольт. Распространяется оно, как и рентгеновское излучение, в воздухе со скоростью света. Ионизирующая способность γ -излучения значительно меньше, чем α и β -частиц. Механизм взаимодействия излучения с веществом зависит как от свойств среды, так и от энергии излучения. С увеличением энергии излучения и уменьшением длины волн меняется и механизм взаимодействия γ -квантов с атомами и молекулами среды. γ -излучение обладает большой проникающей способностью, изменяющейся в широких пределах.

5.5. Взаимодействие нейтронов с веществом

При прохождении пучка нейтронов через вещество могут проявиться два вида их взаимодействия с ядрами вещества. Во-первых, в результате соударения нейтронов с ядрами возможно упругое и неупругое рассеяние нейтронов и, во-вторых, возникновение ядерных реакций типа (n, α) , (n, p) , $(n, 2p)$ и деление тяжелых ядер.

В зависимости от энергии нейтронов обычно преобладают те или иные виды их взаимодействия с веществом. По уровню энергии они могут быть условно разделены на следующие группы:

1) холодные нейтроны с энергией менее 0,025 эВ;

2) тепловые — с энергией от 0,0025 до 0,05 эВ. В поглощающей среде обычно наблюдается реакция захвата холодных и тепловых нейтронов;

3) промежуточные нейтроны с энергией от 0,025 до 0,5 КэВ. Для нейтронов этой группы наиболее типичным процессом взаимодействия является упругое рассеяние;

4) быстрые нейтроны с энергией от 0,2 до 20 МэВ. Эти нейтроны характеризуются как упругим, так и неупругим рассеянием и возникновением ядерных реакций;

5) сверхбыстрые нейтроны с энергией 20-300 МэВ. Отличаются ядерными реакциями с вылетом большого числа частиц.

Защитные свойства материалов от нейтронного излучения определяются их замедляющей и поглощающей способностью, степенью их активизации и захватным γ -излучением.

Быстрые нейтроны наиболее эффективно замедляются веществами с малым атомным номером. К ним относятся водородосодержащие вещества: парафин, вода, бетон, пластмассы и др. Для эффективного поглощения тепловых нейтронов используются материалы, обладающие большим сечением захвата (материалы с бором и кадмием: борная сталь, бораль, борный графит, сплав кадмия со свинцом и др.).

Проникающая способность потока нейтронов сравнима с характерной для γ -излучения способностью. Нейтроны обладают большой проникающей способностью и вызывают сильную ионизацию.

Таким образом, все виды радиоактивного излучения могут вступать в реакцию с атомными ядрами материи, в которую они проникают, могут вызвать в них большие или меньшие преобразования и освободить из этих ядер разные количества ядерной энергии. Самое важное значение для человечества имеет та ядерная реакция, при которой происходит расщепление ядра. Эта реакция сопровождается выделением наибольшего количества ядерной энергии, примерно 180 МэВ на одно расщепление.

6. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

С процесса ионизации начинается воздействие радиации на вещество облучаемого организма, воздействие, которое изменя-

ет сложнейшие процессы, происходящие в организме: состояние нервной системы, обмен веществ, деление клеток, наследственность.

В результате воздействия ионизирующего излучения на организм человека в тканях могут происходить сложные физические, химические и биологические процессы.

Известно, что 2/3 общего состава ткани человека составляет вода и углерод; вода под воздействием излучения расщепляется на водород (H) и гидроксильную группу (OH), которые либо непосредственно, либо через цепь вторичных превращений образуют продукты с высокой химической активностью: гидратный оксид HO_2 и перекись водорода H_2O_2 . Эти соединения взаимодействуют с молекулами органического вещества ткани, окисляя и разрушая ее.

Действие излучения через ионизированные молекулы воды — это косвенное действие. Но под влиянием излучения в клетках происходит ионизация и возбуждение молекул не только воды, но и различных органических веществ — это прямое действие излучения. Эти молекулы образуют свободные радикалы, вызывающие еще большее нарушение нормальных биохимических процессов, составляющих основу жизни.

Индукированные свободными радикалами химические реакции развиваются с большим выходом и вовлекают в этот процесс многие сотни и тысячи молекул, не затронутых излучением. В этом состоит специфика действия ионизирующего излучения на биологические объекты, заключающаяся в том, что производимый им эффект обусловлен не столько количеством поглощенной энергии в облучаемом объекте, сколько той формой, в которой эта энергия передается. Никакой другой вид энергии (тепловой, электрической и др.), поглощенной биологическим объектом в том же количестве, не приводит к таким изменениям, какие вызывает ионизирующее излучение. Например, смертельная доза ионизирующего излучения, которая для млекопитающих равна 5 Гр (500 рад), соответствует поглощенной энергии излучения 5 Дж/кг. Если эту энергию подвести в виде тепла, то она нагрела бы тело едва ли на $0,001^\circ\text{C}$. Это тепловая энергия, заключенная в стакане горячего чая! Именно ионизация и возбуждение атомов и молекул среды обуславливают специфику действия ионизирующего излучения.

На рис.3 приведена схема развития процесса радиационного

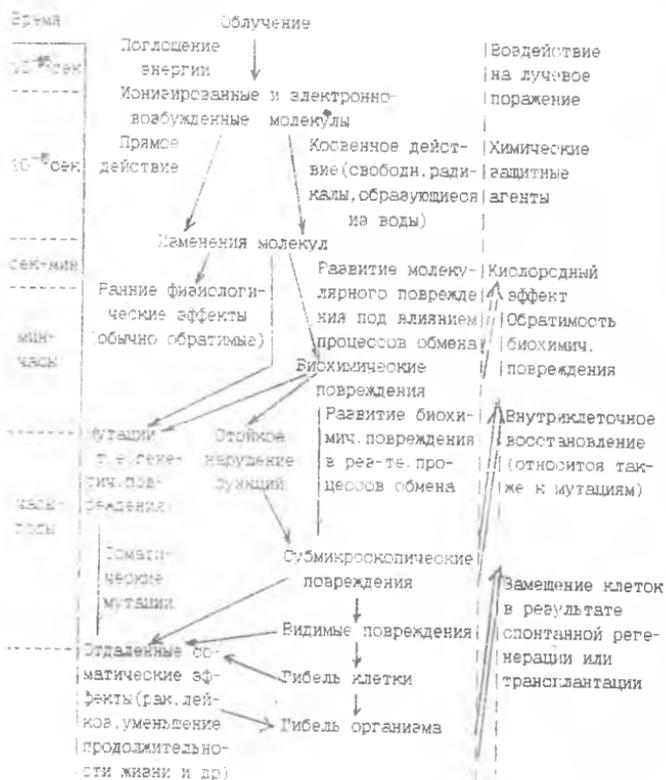


Рис.3. Общая схема биологического действия ионизирующего облучения

поражения. Поражающее действие ионизирующего излучения проявляется не сразу — лучевая болезнь развивается постепенно даже при дозе, приводящей к гибели.

В табл.6 показано развитие лучевой болезни в зависимости от дозы облучения. Наиболее терапевтически верным признаком наличия лучевого заболевания служит изменение состава крови. Нормальный состав включает следующие компоненты: плазма (55%) — жидкость, в которой во взвешенном состоянии находятся частицы кровяных элементов (45%): эритроциты (красные кровяные тельца) — 4-5 млн/мм³; лейкоциты (белые кровяные тельца) — 5-8 тыс/мм³; тромбоциты (красные пластинки) — 130-300 тыс/мм³.

При облучении дозами, в 100-1000 раз превышающими смертельную дозу, человек может погибнуть во время облучения. Следует отметить, что смертельные поглощенные дозы для разных частей тела неодинаковые, а именно: голова — 20, нижняя часть живота — 30, верхняя часть живота — 50, грудная клетка — 100, конечности — 200 Гр. Степень чувствительности различных тканей к облучению неодинакова. Если рассматривать ткани органов в порядке уменьшения их чувствительности к действию излучения, то получим следующую последовательность: лимфатическая ткань, лимфатические узлы, селезенка, зубная железа, костный мозг, зародышевые клетки.

Итак, о биологическом действии ионизирующих излучений можно сделать следующие выводы:

1. Действие ионизирующих излучений на организм неощутимо человеком. У людей отсутствует орган чувств, который воспринимал бы ионизирующие излучения. Поэтому человек может проглотить, вдохнуть радиоактивное вещество без всяких первичных ощущений.

2. Видимые поражения кожного покрова, недомогание, характерные для лучевого заболевания, появляются не сразу, а спустя некоторое время.

3. Суммирование доз происходит незаметно. Если в организм человека систематически вводятся радиоактивные вещества, то со временем дозы суммируются, что неизбежно приводит к лучевым заболеваниям.

Т а б л и ц а 6

Доза излучения, Гр	Степень осевой лучевой реакции больного	Начало проявления первичной реакции после облучения	Характер первичной реакции	Длительность (срок) реакции	Период развития острой реакции	Изменение крови в период облучения	Клиническая реакция в острый период	Последствия облучения
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-2	Легкая (I)	Через 2-3 ч. Первичная реакция развивается не всегда (в 30-50% случаев)	Сильная тошнота с однократной рвотой, слабость, головная боль, повышение температуры	До 4-5 нед.	На 5-7 нед.	Снижение числа лейкоцитов до 1,5-3,0 тыс., тромбоцитов до 40-100 тыс., увеличение СОЭ до 10-25 (норма до 8)	Могут выявляться астенические явления (физическая и психическая слабость)	Как правило, 100% полное выздоровление при отсутствии рецидивов
2-4	Средняя (II)	Через 1-2 ч. У 70-80% пострадавших развивается реакция до 1 сут.	Рвота 2-3 раза, слабость, головная боль, анорексия, снижение температуры	3-4 нед.	На 4-5 нед.	Снижение числа лейкоцитов до 0,5-11,5 тыс., тромбоцитов до 20-40 тыс., повышение СОЭ до 25-40	Возможны фебрильные реакции, кровотечения, кровоточивость, астеня	Выздоровление происходит у 100% при условии лечения
4-6	Тяжелая (III)	Через 20-40 мин. Длится до 2 сут.	Множественная рвота, анорексия, головная боль, слабость, повышение температуры тела до 38°C	До 10-20 сут. Эпизоды уже с первой недели возникают поужевающие симптомы облучения рта, эритема кожи	На 2-5 нед.	Падение тромбоцитов до 100-500 клеток, тромбоцитов до 10-30 тыс., повышение СОЭ до 40-80	Лихорадка, дисцит, выраженный жар, расстройство желудочно-кишечного тракта, фебрильные реакции	Выздоровление возможно у 50-80% при условии специального лечения
Более 6	Крайне тяжелая (IV)	Через 20-30 мин. Длится до 3-4 сут.	Эритема кожи и анорексия, жидкий стул. Температура 38°C и выше	Выражен не четко при лучевой эритеме, ухудшения состояния, 3-4 сут. сохраняется слабость, быстрая утомляемость, присутствуют признаки поражения слизистых рта и глотки.	С 8-12 сут.	Развивается картина желтого поражения органов кроветворения с истончением стенок кровеносных сосудов	Могут выявляться кишечные нарушения, расстройство пищеварения при условии раннего лечения в специализированной клинике	Выздоровление у 30-50% возможно лишь при условии раннего лечения в специализированной клинике

(6-10)
Переходная форма

Чрезвычайно редко встречающиеся случаи со 100% смертельным исходом

Примечание. Эритема — покраснение и воспаление кожи, вызванное расширением кровеносных сосудов. СОЭ — скорость оседания эритроцитов, повышение СОЭ свидетельствует о наличии воспалительных процессов. Гранулоциты, нейтрофилы — разновидности лейкоцитов.

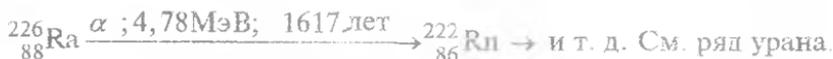
4. Излучения воздействуют не только на данный живой организм, но и на его потомство.

7. РАДИАЦИЯ И БИОСФЕРА

7.1. Естественный радиационный фон

Все живое на земле в естественных условиях извечно подвержено воздействию ионизирующего излучения, то есть естественного радиационного фона Земли.

Человек в естественных условиях облучается от источников как внешних, так и внутренних. Этот естественный фон складывается из излучений, рассеянных в земле радиоактивных веществ и содержащегося в воздухе радона, из космических лучей, а также излучений радиоактивных веществ, находящихся внутри организма. В теле человека имеется несколько радиоактивных веществ (калий — 40, углерод — 14, уран, радий и др.):



На первом месте по величине облучения стоит радиоактивный калий, затем радий и продукты его распада.

Первичное космическое излучение, то есть поток частиц, приходящих из космоса к границам земной атмосферы, состоит главным образом из протонов (они составляют 85% космических частиц), также α -частиц, ядер более тяжелых элементов и быстрых электронов и позитронов. Энергия космических частиц велика — она достигает 0^{19} эВ — это в миллиарды раз больше, чем энергия частиц, получаемая в мощных ускорителях. Частицы первичного космического излучения, попадая в атмосферу, сталкиваются с ядрами атомов атмосферных газов, что обычно приводит к разрушению космических частиц и ядер. Образовавшиеся продукты расщепления также обладают высокой энергией и, сталкиваясь с другими ядрами атомов газов, вызывают дальнейшие разрушительные ядерные процессы. В результате

этих процессов состав космического излучения при прохождении через атмосферу меняется, а энергия частиц падает. Интенсивность космического излучения меняется с географической широтой и с высотой над уровнем моря: на экваторе она примерно на 10% ниже, чем в умеренном поясе (40 – 60° северной и южной широты). В умеренном поясе на уровне моря интенсивность космических излучений 28-30 мрад в год. На высоте 1500 м она уже в 2 раза выше, чем на уровне моря, а на высоте 6000 м достигает 160-240 мрад в год. Космическое излучение связано с процессами, происходящими во Вселенной.

Кроме космического излучения на живые организмы непрерывно действует излучение естественных радиоактивных веществ, находящихся в земной коре, в ее поверхностном слое. В природе существует около 50 естественных радиоактивных изотопов различных элементов. Ядра атомов этих изотопов неустойчивы, они самопроизвольно распадаются, испуская γ -кванты и корпускулярное излучение.

Концентрация естественных радиоактивных веществ в разных местах земного шара различна. Поэтому различна и интенсивность излучения: на равнинах — более низкая, на горах — другая, более высокая, в районах залегания урановых руд и урановых рудниках — еще выше.

Исследования естественного радиационного фона показали, что доза излучения, которой подвергается человек (а также и другие живые существа), зависит от местности, в которой он живет, от воды которую он пьет, от материалов, из которых построен его дом. Так, средний уровень внешнего облучения, получаемый человеком от радиоактивности от Земли, принято считать равным 50 мрад в год. Однако во многих горных районах уровень излучения бывает больше в 10 и более раз.

Воды различных рек в зависимости от грунта их дна также могут иметь разные содержания радиоактивных веществ и, следовательно, различную радиоактивность. Стены здания тоже излучатели. Если это деревянный дом — уровень его радиоактивности в среднем такой же, как в лесу, в поле, то есть 50 мрад в год, если кирпичный, каменный, бетонный, то в зависимости от материала уровень радиоактивности колеблется от 80 до 170 мрад в год.

Естественные радиоактивные изотопы, попадая в тела растений, животных, людей, создают внутреннее облучение организ-

ма. Наибольшее значение при этом имеет радиоактивный калий, К-40, его период полураспада равен 1250 млн. лет. Хотя этот изотоп составляет в природном калии только 0,0118%, он дает облучение человека в дозе 20 мрад в год. Концентрируется в основном в мышечной ткани. Радиоактивные углерод (^{14}C) и тритий (^3H), которые образуются в атмосфере под действием космических лучей, распространены в организме равномерно, ведь углерод и водород входят во все органические молекулы. До тех пор, пока не проводились регулярные испытания ядерного оружия в широком масштабе, то есть до 1954 года, человеческое тело содержало также ^{226}Ra и продукты его распада, включая радон (^{222}Rn), калий (^{40}K), углерод (^{14}C) и торон (Тн). Торон — это изотоп радона (^{220}Rn), входит в природный радиоактивный ряд тория. Торон и радон, содержащиеся в воздухе, попадают в организм главным образом при дыхании. Облучают они в основном мягкие ткани и легкие. Кроме того, радон возникает в самом организме при превращении Ra. Что касается самого Ra, он попадает в организм человека вместе с питьевой водой и продуктами питания.

О природном радиоактивном газе радоне зарубежные газеты писали следующее: «Бесполадный убийца, незаметно проникающий в наши дома, газ-убийца, крадущийся из-под земли. .»

Радон рождается в радиоактивных семействах урана и тория, а эти тяжелые металлы присутствуют везде — в камнях, почве, воде. Но если они, в общем, пассивны, то газ радон выходит из мест своего рождения в самую активную и проникающую среду — в воздух. За одну минуту в наши легкие вместе с вдыхаемым воздухом попадает несколько миллионов радиоактивных атомов радона. Продукты его распада оседают на эпителии бронхов и могут вызвать рак легких.

В естественных условиях человек за время своей жизни облучается общей дозой порядка 5-7 р. Только в некоторых местах на земном шаре, например, в штате Керала в Южной Индии, из-за богатого содержания окиси тория в песках жители из поколения в поколение за время жизни одного человека подвергаются облучению суммарной дозой около 50-60 р.

К дозе 5-7 р человек приспособился. Ионизирующее излучение оказывает на организм только повреждающее действие, так

что идеальным решением вопроса для человечества было бы сохранение естественного уровня облучения и предупреждение всякой возможности повышения его.

7.2. Малые дозы облучения

Хотя избежание превышения естественного фона облучения есть тот идеал, к которому необходимо стремиться, проблема хронического воздействия малых доз на организм остается одной из актуальных проблем. Что считать малой дозой при хронических воздействиях? Очевидно, за «малые дозы» надо принять дозы, соизмеримые с естественным фоном, превышающие его лишь на 1-2 порядка, т. е. в десятки или сотню раз. Эффект воздействия продолжительной фоновой радиации по сравнению с радиацией высокой интенсивности имеет большое потенциальное значение. Исследования показали, что чувствительность к дозе подчиняется логарифмическому или дробно-степенному закону, т. е. чувствительность увеличивается значительно быстрее при малых дозах, чем при больших. Длительное воздействие радиации оказывает более разрушительное действие на мембраны клетки, чем на гены живых клеток.

В настоящее время принята концепция «35 бэр за жизнь», она основана на том, что такое облучение дает для первого поколения сокращение продолжительности жизни < 1% и около 0,5% наследственных аномалий. Сейчас имеется мнение о необходимости снижения доз, например, до естественного фона «7-10 бэр за жизнь (70 лет)» и в соответствии с этим должны будут пересматриваться нормы ПДД, ПДК и др.

7.3. Источники радиоактивного загрязнения (заражения) внешней среды

К этим источникам в настоящее время можно отнести следующие:

- урановая промышленность;
- ядерные реакторы разных типов;
- радиохимическая промышленность;
- места переработки и захоронения радиоактивных отходов;
- использование радионуклидов в народном хозяйстве;
- ядерные взрывы.

Рассмотрим кратко каждый из них.

Урановая промышленность занимается добычей, переработкой, обогащением урана и приготовлением ядерного топлива.

Основным сырьем для этого топлива является ^{235}U . Этот уран под действием тепловых нейтронов испытывает реакцию деления. В природном уране содержится всего 0,7% ^{235}U . На каждом из этапов производства урановой промышленности возможны загрязнения окружающей среды, на рудниках — радионуклидами семейства ^{235}U , ^{222}Rn и дочерними продуктами его распада. Жидкие отходы могут попасть в ближайшие реки и озера.

Ядерные реакторы. В активной зоне ядерных реакторов сосредоточены большие количества радиоактивных веществ, однако большинство реакторов не выделяет в окружающую среду опасных количеств радиоактивных загрязнений. Объясняется это тем, что все РВ заключены в замкнутые мощные оболочки и контуры, откуда они могут быть выброшены только при аварии. *Аварии ядерных реакторов* могут быть вызваны разрушением контура теплоносителя и оболочки твэлов (тепловыделяющих элементов), расплавлением активной зоны, избытком радиоактивности, что может привести к полному разрушению реакторов. Окружающая среда будет загрязнена продуктами деления урана.

В реакторе мощностью 100 МВт ежедневно расщепляется около 100 г тяжелых атомов и, следовательно, столько же образуется продуктов деления. В течение года работы такого реактора образуется около 160 МКи РВ, в том числе около 20 МКи изотопа йода, 12 МКи инертных газов и 0,2 МКи ^{90}Sr .

При нормальной работе реакторов в них образуется 20% газообразных и летучих веществ. Однако их утечки все же имеют место. Так, например, следует считать, что от 0,1 до 1% вырабатываемого в реакторе радиоактивного Y (иттрия) все же попадает в атмосферу. В еще большей степени это относится к ^{41}Ar и другим инертным газам. Эти выбросы обычно происходят через грубы.

Радиохимическая промышленность. Регенерация ядерного топлива. Отработанные твэлы поступают на предприятия регенерации ядерного топлива. Здесь производят выделение урана и плутония, а также продуктов деления урана, которые в дальнейшем могут быть использованы в качестве источников излучения, радиоактивных индикаторов и т. п. 6 апреля 1993г. на радиохимическом заводе г. Томск-7 произошло разрушение 30-кубового аппарата из-за резкого возрастания давления и последующего

взрыва газов. В аппарате находился Pu, U, продукты ядерных реакций. Цепных реакций не произошло. По международной классификации авария оценена в 3 балла, т. е. вторая по тяжести после Чернобыля. Облако с радиоактивными изотопами накрыло большую территорию тайги, в зону не попал ни один населенный пункт.

Несмотря на соблюдение всех мер радиационной безопасности, предприятия регенерации ядерного топлива являются источниками радиоактивного загрязнения внешней среды. Они периодически сбрасывают сточные радиоактивные воды, хотя и в пределах допустимых концентраций. Следовательно, в окружающей среде неизбежно могут накапливаться радиоактивные загрязнения.

Места переработки и захоронения радиоактивных отходов. Ядерная техника породила сложную проблему — удаление радиоактивных отходов. Но в настоящее время разработаны надежные, безопасные способы переработки и захоронения отходов. Причиной загрязнения окружающей среды в этом случае могут быть случайные аварии, связанные с разрушением хранилищ.

Использование радиоактивных нуклидов в ядерных целях. Радиоактивные нуклиды в качестве закрытых источников ионизирующих излучений широко используют в промышленности, медицине, сельском хозяйстве.

Рентгеновское γ -излучение иногда успешно используется при лечении рака. Обусловлено это тем, что злокачественные опухоли и вообще больные ткани разрушаются радиоактивным излучением легче, чем нормальные. Однако лечебное действие оказывает лишь определенные дозы излучения. Это видно из рис. 4.



Рис. 4 Влияние радиоактивного излучения на клетки

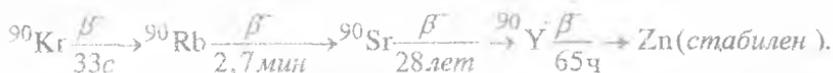
Радиоактивное излучение от этих источников может создавать опасность в окружающей среде только в результате их неудовлетворительного хранения и сбережения. В последнее время появилась серьезная опасность радиоактивного загрязнения окружающей среды в связи с использованием радиоактивных источников в космических исследованиях и астронавтике. При запуске ракет-носителей, а также при посадке спутников и космических кораблей возможны аварийные ситуации, когда радиоактивный источник может разрушиться и находящийся в нем радиоактивный нуклид ^{90}Sr , ^{238}Pu и др. стать источником радиоактивного загрязнения окружающей среды. В качестве примера можно привести заражение атмосферы над Индийским океаном изотопом ^{238}Pu в июне 1969 года, которое произошло в результате аварии американского спутника, при этом в атмосферу попали радионуклиды с активностью $7 \cdot 10^5$ Ки.

Вместе с тем наибольшее загрязнение окружающей среды все же создает сеть радионуклидных лабораторий, занимающихся использованием радионуклидов в открытом виде для научных и производственных целей. Сбросы радиоактивных отходов в сточные воды даже при концентрациях меньше допустимых с течением времени приведут к постепенному накоплению радионуклидов во внешней среде.

Локальные радиоактивные загрязнения после ядерных взрывов. Масштабы и уровни локальных радиоактивных загрязнений после ядерных взрывов зависят от многих факторов: типа ядерных боеприпасов, видов взрывов, мощности, топографических и метеорологических условий.

Выход основных долгоживущих продуктов деления при взрыве боеприпасов в 1 Мт с урановым запалом включает продукты ^{235}U и ^{239}Pu , образующиеся под действием тепловых нейтронов, и ^{238}U , образующийся под действием быстрых нейтронов. Количество долгоживущих (относительно) радионуклидов сначала нарастает, а затем, достигнув максимума, уменьшается. Это объясняется тем, что в момент взрыва первоначальная смесь

продуктов деления содержит более 200 изотопов 35 элементов, но большинство первичных продуктов деления имеет очень малый период полураспада. Почти каждый из них является родоначальником цепочки распада. Например,



Среди множества радионуклидов, образующихся в атмосфере при взрывах ядерных и термоядерных боеприпасов, основную радиационную опасность создают шесть нуклидов:



${}^{89}\text{Sr}$ и ${}^{131}\text{I}$ — сравнительно долгоживущие изотопы.

Наибольшую радиационную опасность представляют ${}^{90}\text{Sr}$ и ${}^{137}\text{Cs}$, которые легко усваиваются растениями и животными, в том числе и человеком. Стронций концентрируется в основном в костях. Время полувыведения ${}^{90}\text{Sr}$ 16 лет.

Установлено, что при наземных ядерных взрывах мощностью 1 Мт количество местных (локальных) осадков составляет 87% общего количества радиоактивности, при взрыве на поверхности воды — 20%, при взрыве в воздухе — 10%. Предполагается, что радиоактивные загрязнения не попадают в стратосферу при взрывах килотонных боеприпасов.

Разность между количеством всей радиоактивности и количеством локальных радиоактивных загрязнений есть количество радионуклидов, попавших в стратосферу.

К глобальным выпадениям относятся радиоактивные продукты, выпадающие из стратосферы. Процесс этого выпадения длится годами. Радиоактивные продукты, распределяясь в стратосфере, выпадают на поверхности всего земного шара.

Итак, увеличение радиационного фона, возникающее в результате испытания ядерного оружия и мирного применения ядерной энергии, оказывает влияние на всю биосферу.

В табл. 7 показано действие на внешнюю среду ионизирующего излучения, возникающего при различных условиях.

Действие ионизирующего излучения на внешнюю среду

Источник	Тип излучения	Продолжительность облучения	Мощность дозы для внешней среды	Наведенная активность	Территория, подверженная действию излучения
Естественная (фоновая) радиация	α, β, γ	Неск. млрд. лет	0,1-0,5Р/год	Нет	Вся Земля
Медицинское и профессиональное облучение γ -полем от ^{60}Co (до 4000 Ки)	γ	Обычно во внешнюю среду излучения не высвобождаются Хроническое несколько лет	До нескольких тыс. рад в год	Нет	Сотни гектаров
Реакторы с защитой	$\gamma, \text{нейтроны}$	Прерывистое	До значений, равных нескольким тыс. рад в год	Незначительная	Несколько га
Выбросы реакторов	α, β, γ	Непрерывное	Выше фоновой	Нет	Сотни км ²
Сброс отходов	—	—	Незначительно, выше фоновой	—	Сотни га
Аварии	—	Острое	До нескольких тыс. р/ч	—	Несколько га
Ядерные испытания	Острое	До нескольких тыс. Р/ч	До неск. млн. р/ч	Есть	Сотни км ²
Радиоактивные осадки после аварий, испытаний	—	Хроническое, тыс. лет	До значений, равных неск. фоновым	Нет	Вся Земля
Ядерная война	—	Острое	До сотен млн. р/ч	Есть	Тысячи км ²
Радиоактивные осадки в ядерной войне	—	Хроническое, тысячи лет	До нескольких р/ч	Нет	Вся Земля

8. АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЧЕРНОБЫЛЬСКАЯ КАТАСТРОФА

8.1. Преимущества и недостатки атомной энергетики

Во II половине нашего столетия начали вводить в эксплуатацию атомные электростанции, ледоколы, военные корабли с ядерными установками. В настоящее время во всем мире действует свыше 400 реакторов на атомных электростанциях общей электрической мощностью около 300 млн. кВт. Атомные электростанции — это лишь одно звено всей ядерной технологии, которая включает в себя добычу урана, его переработку, обогащение, изготовление топливных элементов, транспортировку к АЭС, затем извлечение отработанного топлива, хранение его на складах, переработку на химических производствах, выделение осколков деления, их захоронение.

На всех участках радиоактивные вещества в большей или меньшей степени воздействуют на обслуживающий персонал, на всех участках могут происходить выбросы радиоактивных нуклидов в окружающую среду и создавать дополнительную дозу для населения.

Однако оценки воздействия радиоактивных выбросов на население показали, что воздействие это очень мало и при общей мощности АЭС 240 тыс. МВт создает годовую эффективную эквивалентную дозу — 0,34 мбэр. Другими словами, увеличение облучения населения за счет использования ядерного способа получения энергии оказывается незначительным — менее 1% от облучения за счет естественных источников радиоактивности.

Имеет смысл сравнить эти цифры с эффективной годовой средой, создаваемой тепловыми угольными электростанциями. При сжигании угля в атмосферу также выбрасываются радиоактивные нуклиды, которые в небольших количествах присутствуют в топливе. При той же мощности угольных тепловых электростанций (240 тыс. МВт) эффективная эквивалентная доза составляет около 0,6 мбэр, что приблизительно вдвое больше дозы, создаваемой атомной электростанцией.

Преимущество атомной энергетики состоит в том, что она основана на применении топлива, которое не надо добывать в шахтах нескончаемым потоком, и чей беспламенный «огонь» не загрязняет атмосферу дымом и сажей. АЭС могут работать

надежно, если их проектирование шло под тщательным надзором, в их конструкции предусмотрена система высокого качественного контроля за режимом процессов и если их эксплуатация происходит все время в соответствии со строгими правилами.

Риск состоит в вероятности возникновения аварии реактора. Так, в США за 1980-90гг. зарегистрировано 169 аварий на АЭС различной степени тяжести.

В результате аварии на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 года при разрушении реактора в окружающую среду было выброшено около 5% всего топлива с общей активностью 50 млн. Ки. Выброс радиоактивности привел к облучению людей, загрязнению территории (на 20.000 км² плотность ¹³⁷Cs была выше 5 Ки / км²), переселению жителей, громадным затратам на ликвидацию последствий аварии. С точки зрения радиационной безопасности авария на Чернобыльской АЭС — глобальная катастрофа. Материальные потери от аварии оцениваются до 2000 года в 250 млрд. р., более 150 тыс. человек заболели и умерли.

Последствия Чернобыльской аварии оказались трагическими как для персонала станции, так и для жителей зараженной территории. Авария вызвала широкий разброс радиоактивности. Выпадение радионуклидов было обнаружено на Украине (Киев, Винница, Ивано-Франковск, Ровно), в Белоруссии (Мяньск, Брест, Могилев), в Прибалтике (Клайпеда, Рига) и многих других регионах. Заметные концентрации радиоактивности в дождевых осадках наблюдались в Австрии, Германии, Италии, Норвегии, Швеции, Польше, Румынии, Финляндии.

От катастрофы пострадало и несколько областей России. Так, на март 1992г. загрязнение почв радионуклидами со средней плотностью загрязнения по цезию-137 более 1 Ки/км² зарегистрировано на 15 административных территориях России: Брянская (34% территории области), Калужская (17%), Белгородская (8%), Воронежская (1,5%), Курская (4,4%), Ленинградская (1%), Липецкая (около 8%), Орловская (40%), Пензенская (3%), Рязанская (15%), Смоленская (0,5%), Тамбовская (1,7%), Тульская (47%), Ульяновская (1,6%), Мордовия (2%).

На всех других обследованных территориях средняя плотность загрязнения почв цезием-137 не превышает 1 Ки/км².

8.2. Нужны ли атомные электростанции?

Аварии на атомных электростанциях, особенно Чернобыльская катастрофа, поставили перед учеными и общественностью мира проблему: нужны ли атомные электростанции?

Атомные электростанции эксплуатируются в 25 странах, еще в 16 строятся или проектируются. Во Франции доля ядерной энергетики в производстве электроэнергии сейчас самая высокая в мире — более 70%. В Бельгии ядерная энергетика обеспечивает 66% всей электроэнергии, в Швеции — 50%, Финляндии — 37%, Великобритании и США — 18%, Японии — 29%, Южной Корее — 53%, СНГ — около 11%, Венгрии — 39%. Ориентация Франции на атомную энергетику связана с отсутствием на ее территории запасов угля, нефти, газа. Подобная ситуация в Японии, где действуют 36 АЭС и 20 строятся. В США работают 111 реакторов, 12 — строятся и 2 находятся в демонтаже. После аварии на АЭС «Тримайл-Айленд» с 1979г. фирмами США не была заказана ни одна АЭС, а заказы, сделанные между 1974 и 1979 годами, были аннулированы. В Швеции в результате опроса общественного мнения в 1988г. до 80% населения высказались против использования ядерной энергии. Шведское правительство разработало план демонтажа всех четырех АЭС к 2010 году. При этом предполагалось уже в 1995-96 годах остановить 2 блока из 12. Оценив реальную ситуацию по дефициту энергии в 1993 г. правительство отменило решение 1988 года.

К началу 1989г. в СССР действовало 16 атомных электростанций, где было установлено 45 реакторов общей мощностью 34,4 млн. кВт. Одновременно на 15 строительных площадках возводились новые или расширялись уже действующие АЭС. Так нужны ли атомные станции? Есть сторонники атомной энергетики, есть и противники. Сторонники считают, что степень риска аварии АЭС во много раз меньше по сравнению с риском на транспорте. Противники же считают, что строительство новых АЭС нецелесообразно по следующим причинам:

а) ни один из специалистов-ядерщиков не может дать полной гарантии надежности АЭС;

б) запасов урана-235 слишком мало, чтобы развивать традиционную атомную энергетику. Для АЭС попросту не хватит «горючего», чтобы обеспечить их ресурсное время эксплуатации. Реакторы на быстрых нейтронах, позволяющие использовать изотоп урана-238, пока не обладает достаточной надежностью;

в) нельзя развивать атомную энергетику до тех пор, пока не будет решена проблема надежного захоронения радиоактивных отходов.

Ответы на вопросы о перспективах атомной энергетики ждут своих решений, т. к. пока нет альтернативы АЭС.

ЗАЩИТА ОТ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ

Систематическая охрана людей, подвергающихся облучению, стала развиваться, в основном, только после 2-й мировой войны и, главнейшим образом, в связи с широким развитием использования ядерной энергии. При Международном радиологическом конгрессе перед 2-й мировой войной была основана постоянная комиссия по радиологической защите (МКРЗ), которая давала рекомендации по охране здоровья работников. В соответствии с этими международными рекомендациями отдельные государства устанавливали свои собственные нормы и правила. В настоящее время разработкой соответствующих международных правил занимается Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), которое расширило свою деятельность на разработку рекомендаций и в других областях радиационной защиты: транспортировка ядерного материала, захоронение отходов, обеспечение радиационной безопасности на АЭС, радиационная разведка, дезактивация зоны и т. д.

Большое значение в вопросах защиты от радиации имеет радиометрия, т. е. количественное измерение радиоактивности. Там, где есть вероятность облучения людей, ведется постоянный радиологический контроль.

Авария на Чернобыльской АЭС показала необходимость правильного и оперативного использования дозиметрической и радиометрической аппаратуры в экстремальных ситуациях.

Дозиметрический контроль — это система мероприятий, организуемых для контроля радиоактивного облучения населения и определения степени радиоактивного заражения техники, продовольствия, воды и прочего. Он организуется штабами гражданской обороны (ГО).

Контроль облучения проводится с целью своевременного получения данных о поглощаемых дозах облучения людьми. По данным контроля устанавливается или подтверждается факт

внешнего воздействия ионизирующих излучений, оценивается работоспособность людей и уточняются их радиационные поражения с целью определения необходимости лечения.

Контроль радиоактивного заражения проводится для определения степени заражения окружающей среды, в том числе продуктов питания, водоемов, растительности и т. п. Этот контроль также имеет целью скорейшее принятие мер по предотвращению попадания радиации в организм человека.

Что касается ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы, то она сводилась к следующему. Был сооружен 60-метровый саркофаг над разрушенным четвертым блоком. Зараженную почву срезали и вывезли. Но радиация проникла слишком глубоко, поэтому особая опасность заключается в воде. При любом дожде сточная вода, пройдя почву, выносит часть радионуклидов в систему рек. Для предотвращения радиоактивного загрязнения реки Припять были сооружены глухие дамбы и стенка в грунте, отсекающие вынос радиоактивности из ближней зоны ЧАЭС, глухие и фильтрующие дамбы (131 сооружение) на малых реках для удержания радионуклидов.

Вообще же говорить о полной ликвидации последствий Чернобыльской аварии нельзя, так как некоторые факторы очень и очень долгосрочны. Можно говорить лишь об адаптации, приспособлении человечества, всей биосферы к новому, после-чернобыльскому состоянию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гродзенский Д.Э. Радиобиология. М. : Госатомиздат, 1961.
2. Бегоуек Ф. Человек и радиоактивность. Издательство Чехословацкой Академии Наук и Артия, 1964.
3. Трифонов Д.Н. Радиоактивность вчера, сегодня, завтра. М. : Атомиздат, 1966.
4. Ландау-Тылкина С.П. Радиация и жизнь. М. : Атомиздат, 1974.
5. Химия окружающей среды / Под ред. Дж.О.М. Бокриса. М. : Химия, 1982.
6. Максимов М.Т., Оджагов Г.О. Радиоактивные загрязнения и их измерение. М. : Энергоатомиздат, 1989.
7. Холл Э.Дж. Радиация и жизнь. М. : Медицина, 1989.
8. Мамонтов Е.А. Охрана окружающей среды и основы экологии. Самара, 1992.
9. Введение в экологию / Под ред. Ю.А. Казанского. М., 1992.
10. А и Ф. 1992 (май), N16-17.
11. Израэль Ю. Чернобыль: Прошлое и прогноз на будущее / Правда 1989_N79
- 20.03. С.4.
12. Израэль Ю. Эхо Чернобыля / Наука и жизнь. N9. 1990.
13. Некрасов Б.В. Основы общей химии. Т.3. М. : Химия, 1970. С. 309-331.
14. Полинг Л. Общая химия. М. : Мир, 1974. С. 727-743.
15. Глинка Н.Л. Общая химия. Л.: Химия, 1979. С. 106-114.
16. Глинка Н.Л. Задачи и упражнения по общей химии. Л. : Химия, 1984. С 46-51.
17. А и Ф. Моржаретто И. Газ радон в нашем доме. 1993. N19.
18. Бондаренко И.П., Бударова Н.В. Основы дозиметрии и защиты от излучения. М. : Высшая школа, 1962.

Учебное издание

*Мальчиков Геннадий Данилович
Алемаскина Галина Алексеевна*

РАДИОАКТИВНОСТЬ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА БИОСФЕРУ

Учебное пособие

Редактор Т. К. К р е т н и н н а
Техн. редактор Г. А. У с а ч е в а
Корректор Т. И. Щ е л е к о в а

Лицензия ЛР N 020301 от 30.12.96.

Подписано в печать 10.03.97 Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 2,32. Усл. кр.-отт. 2,44. Уч.-изд. л. 2,5.

Тираж 100 экз. Заказ 112. Арт. С — 12/97.

Самарский государственный аэрокосмический университет им.
академика С.П. Королёва. 443086 Самара, Московское шоссе, 34.

ИПО Самарского аэрокосмического университета.
443001 Самара, ул. Молодогвардейская, 151.