

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»

**А. М. Дворник, В. С. Аверин, А. В. Гулаков**

## **Защита населения и объектов от ионизирующего излучения**

Практическое пособие

для студентов специальности 1-31 01 01 - 02  
«Биология (научно-педагогическая деятельность)»

Гомель  
ГГУ им. Ф. Скорины  
2017

УДК 351.862.2(076)  
ББК 68.9я73  
Д243

**Рецензенты:**

кандидат сельскохозяйственных наук А. Г. Подоляк,  
кандидат сельскохозяйственных наук А. Н. Никитин

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
учреждения образования «Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины»

**Дворник, А. М.**

Д243

Защита населения и объектов от ионизирующего излучения:  
практическое пособие / А. М. Дворник, В. С. Аверин, А. В.  
Гулаков ; М-во образования Республики Беларусь, Гомель-  
ский гос. ун-т им.Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скори-  
ны, 2017. – 36 с.

ISBN 978-985-577-267-6

Практическое пособие предназначено для количественной оцен-  
ки мероприятий, касающихся защиты населения в чрезвычайных ситу-  
ациях. Будущий специалист должен овладеть знаниями по основам  
жизнедеятельности в окружающей нас техносфере и оценке критериев  
самой комфортности, изучить характеристики опасных и вредных  
факторов среды обитания, физиологическое воздействие их на челове-  
ка.

Адресовано студентам специальности 1-31 01 01 - 02 «Биология  
(научно-педагогическая деятельность)».

УДК 351.862.2(076)  
ББК 68.9я73

ISBN 978-985-577-267-6

© Дворник А. М., Аверин В. С.,  
Гулаков А. В., 2017  
© Учреждение образования «Гомельский

## Оглавление

<b>Предисловие</b> .....	4
<b>Практическое занятие 1.Закон радиоактивного распада.....</b>	5
<b>Практическое занятие 2.Защита от ионизирующего излучения</b>	13
<b>Практическое занятие 3.Оценка риска проживания на радиоактивно-загрязненной территории .....</b>	22
<b>Практическое занятие 4.Прогнозирование загрязнения атмосферного воздуха .....</b>	26
<b>Практическое занятие 5.Оценка риска для здоровья человека при загрязнении продуктов питания различными токсикантами</b>	
...	31
<b>Литература.....</b>	35
<b>Приложение А. Коэффициенты для расчета категории устойчивости атмосферы и шероховатости поверхности .....</b>	36

## Предисловие

На современном этапе развития общества актуальным является обучение специалистов-экологов методам гражданской обороны и защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях, оценивать устойчивость функционирования объектов экономики в этих условиях, реализовывать мероприятия по ликвидации возникших последствий на объектах всех отраслей.

Содержание курса «Безопасность жизнедеятельности человека», представленного в структуре учебных курсов системы высшего образования, должно обеспечить подготовку молодого человека к жизни, выбору оптимальных решений в вероятных чрезвычайных ситуациях природного, антропогенного, социального происхождения; дать представление о возможных способах оценки происходящих событий при чрезвычайных ситуациях, которые позволяют адекватно отражать сложившуюся обстановку, для принятия верных решений при обеспечении безопасности жизнедеятельности.

Цель курса «Безопасность жизнедеятельности человека» направлена на формирование системного подхода студентов в понимании существующих в реальной жизни опасностях; на приобретение знания конкретных правил поведения в ситуациях, опасных для физического, психического и духовно-нравственного здоровья учащихся, а также умений и навыков их предотвращения.

Содержание курса предполагает использование материала, максимально приближенного к реальной жизни населения Республики Беларусь и возможным ситуациям, связанным с работой химических предприятий, тепловых электростанций, радиоактивным загрязнением территории. Поддерживать интерес к данному предмету преподаватель может, опираясь на многочисленные фактуры действительности, используя их в позитивных целях обучения и воспитания.

Пособие также может быть интересно всем, кто интересуется вопросами безопасности жизнедеятельности, защиты населения в условиях чрезвычайных ситуаций и радиационной безопасности населения.

# Практическое занятие 1

## Закон радиоактивного распада

### 1.1 Основные понятия и термины

**Радиоактивность** – самопроизвольное превращение неустойчивых атомных ядер в ядра других элементов, сопровождающееся испусканием частиц или  $\gamma$ -квантов.

**Радиоактивным распадом** называется процесс спонтанного превращения атомных ядер в ядра других химических элементов с выделением энергии в виде излучения.

**Радионуклид** – изотоп химического элемента, характеризующийся определенным массовым числом и зарядом и обладающий свойством радиоактивности. Мы можем говорить также о радиоактивном изотопе.

**Радиоактивный элемент** – химический элемент, все изотопы которого являются радиоактивными.

**Радиоактивные изотопы** – совокупность радиоактивных изотопов химического элемента.

**Активность** – это количество ядерных превращений в единицу времени. Чем больше превращений в единицу времени, тем активнее препарат.

Единицей измерения активности является беккерель (Бк, Вq);

1 Бк = 1 расп./с.

Внесистемная единица – кюри (Ки); 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк;

1 Бк =  $2,7 \cdot 10^{-11}$  Ки

Единица кюри сложилась исторически. Эта величина соответствует активности 1 г радия.

Между активностью 1 г радионуклида и его массой существует тесная связь (определяющую роль здесь играют массовое число и период полураспада радионуклида): чем меньше период полураспада 1 г чистого радионуклида, тем выше его активность:

$$A_c = \frac{1,16 \cdot 10^{20}}{A \cdot T}, \quad (1.1)$$

где  $A$  – массовое число радионуклида;

$T$  – период полураспада в часах;

$A_c$  – активность 1 г (Бк).

**Закон радиоактивного распада** гласит, что количество распадов в единицу времени постоянно, изменение количества ядер радионуклида во времени в результате процесса распада подчиняется экспоненциальной зависимости. Выражается соотношением:

$$Nt = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \text{ или } Nt = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln(2) \cdot t}{T_{1/2}}}, \quad (1.2)$$

где  $N_0$  – исходное количество ядер;

$Nt$  – количество нераспавшихся ядер за время  $t$ ;

$e = 2,72$  – основание натурального логарифма;

$\lambda$  – постоянная распада; характерна для каждого из радионуклидов и отражает, какая доля ядер распадается в единицу времени;

$T_{1/2}$  – период полураспада – временной промежуток, в течение которого распадается половина ядер.

Связаны соотношением

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}, T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}. \quad (1.3)$$

В формуле закона радиоактивного распада период полураспада и время необходимо применять в одинаковых временных единицах.

**Постоянная радиоактивного распада**  $\lambda$  – характерна строго для определенных изотопов и показывает, какая доля ядер распадается в единицу времени, еще ее называют вероятностью распада для конкретного ядра.

**Период полураспада** – временной промежуток, в течение которого распадается половина ядер.

Формула закона радиоактивного распада позволяет определить через какое время активность радионуклида может быть снижена в  $k$  раз:

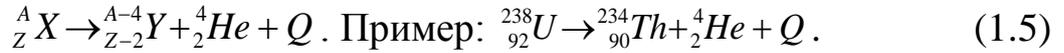
$$t = \ln(k) \cdot T_{1/2} / \ln(2). \quad (1.4)$$

## 1.2 Виды и свойства радиоактивных превращений

К радиоактивным превращениям ядер относятся  $\alpha$ -распад,  $\beta$ -превращения,  $\gamma$ -излучение, спонтанное деление, одно- и двухпротон-

ная радиоактивность. В радиологических исследованиях чаще всего рассматривают первые четыре вида превращений.

*α-распад* – это радиоактивное превращение ядер с испусканием α-частиц (ядер гелия) с изменением массового числа и заряда исходного ядра и выделением теплоты:

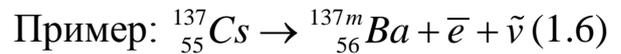
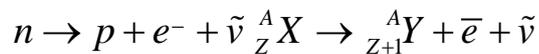


**Краткие свойства α-превращений:**

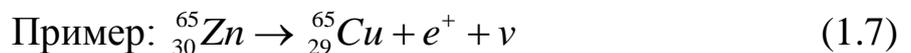
- энергия α-частиц колеблется в пределах 2÷11 МэВ (каждому α-излучающему радионуклиду свойственен свой диапазон энергии излучения);
- скорость распространения до 20000 км/с;
- относится к корпускулярному, непосредственно ионизирующему излучению;
- из-за большой массы и скорости α-частицы распространяются практически прямолинейно, обладают способностью сильной ионизации среды распространения, но малым пробегом – до 90 мкм в биологической ткани;
- свойственен тяжелым радиоактивным элементам с зарядом > 83 (расположенным после свинца), а также редкоземельным элементам с числом нейтронов  $N > 83$  (от  ${}^{142}_{58} \text{Ce}$  до  ${}^{158}_{71} \text{Lu}$ ).

*β-превращения* – это радиоактивные превращения ядер, связанные с трансформацией протонов или нейтронов при избытке соответствующих частиц. Выделяют:

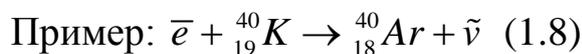
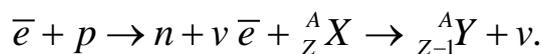
- электронный распад или β<sup>-</sup>-распад, свойственен для ядер с избытком нейтронов с превращением одного из них в протон с испусканием электрона и антинейтрино:



- позитронный, или β<sup>+</sup>-распад, свойственен для ядер с избытком протонов с превращением одного из них в нейтрон с испусканием позитрона и нейтрино:



– *электронный захват или К-захват*, свойственен ядрам с избытком протонов, один из протонов захватывает электрон К-оболочки и превращается в нейтрон:



**Краткие свойства  $\beta$ -превращений:**

– энергия между  $\beta$ -частицами и образующимися нейтрино (антинейтрино) и дочерним ядром распределяется неравномерно, поэтому спектр  $\beta$ -излучения для каждого радионуклида имеет вид одногорбой кривой. Средняя энергия бета-частиц в спектре равна примерно 1/3 их максимальной энергии (рисунок 1.1);

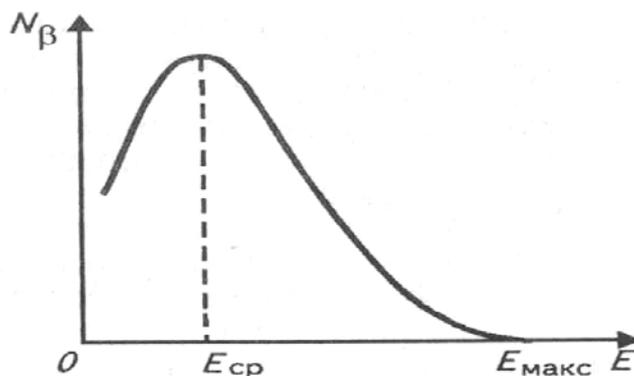


Рисунок 1.1 – Распределение  $\beta$ -частиц по энергиям (спектр  $\beta$ -излучения):  
 $N$  – число  $\beta$ -частиц;  $E$  – их энергия

– максимальная энергия бета-частиц имеет широкие пределы – от 0,015÷0,05 МэВ (мягкое излучение) до 3÷12 МэВ (жесткое излучение);

– скорость распространения достигает скорости света;

– относится к корпускулярному, непосредственно ионизирующему излучению;

– траектория  $\beta$ -частицы имеет вид изломанной кривой, пробег в биологической ткани для мягкого излучения до 0,3 см, жесткого – до 1 см;

– свойственен ядрам радиоактивных изотопов всех элементов обладающих избытком нейтронов или протонов по сравнению с оптимальным.

$\gamma$ -излучение – поток квантов электромагнитного излучения высокой частоты. Испускаются ядрами атомов при  $\alpha$ - и  $\beta$ -распаде в тех случаях, когда в дочернем ядре оказывается избыток энергии, не захваченный корпускулярным излучением ( $\alpha$ - или  $\beta$ -частицей). Этот избыток высвечивается в виде  $\gamma$ -квантов (рисунок 1.2).

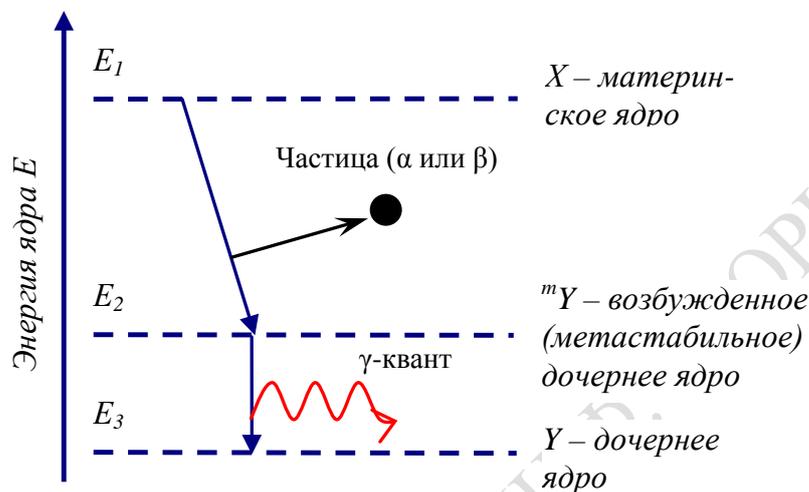
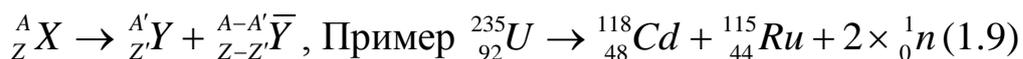


Рисунок 1.2 – Образование  $\gamma$ -квантов

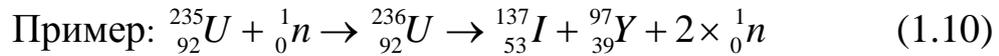
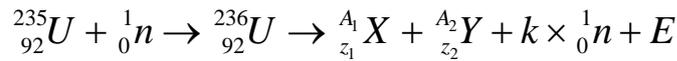
- $\gamma$ -кванты лишены массы покоя, то есть существуют только в движении;
- не имеют заряда и не отклоняются в электрическом и магнитном полях;
- скорость распространения в вакууме равняется скорости света;
- диапазон энергий до 3 МэВ;
- относится к фотонному, косвенно ионизирующему излучению;
- не имеет траектории распространения, редко взаимодействует с веществом, пробег в биологической ткани свыше 1 м;

Спонтанное деление тяжелых ядер  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  с образованием радиоактивных изотопов химических элементов из середины таблицы Менделеева:



Последние обладают избытком нейтронов и претерпевают последовательные радиоактивные распады. Спонтанное деление характеризуется очень малой вероятностью – в 1 г чистого  $^{235}\text{U}$  – происходит 40 делений, а в 1 г  $^{238}\text{U}$  – 3 деления, соответственно, концентрация вышеотмеченных радионуклидов пренебрежимо низка.

Деление тяжелых ядер с нечетным массовым числом при захвате нейтрона:



### 1.3 Задание по работе

1. Определить массу радионуклида X с периодом полураспада  $T_{1/2}$ , активностью 10 Ки и 1000 Бк.

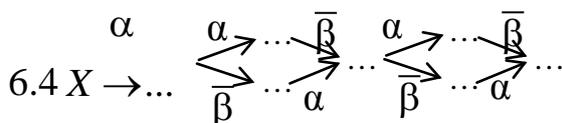
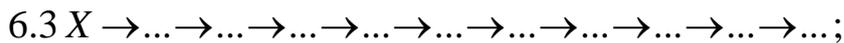
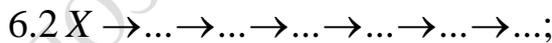
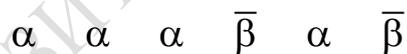
2. Определить активность 1 г и 25 г радионуклида X с периодом полураспада  $T_{1/2}$

3. 1 г  ${}^{226}\text{Ra}$  имеет активность 1 Ки. Определить, какая масса радионуклида X имеет такую же активность? (использовать данные таблицы 1.2).

4. Поверхностная активность радионуклида X в почве составляет A. Определить, через какое время активность снизится в k раз.

5. Поверхностная активность радионуклида  ${}^{137}\text{Cs}$  в почве составляет A. Определить, через какое время активность снизится до 37 кБк/м<sup>2</sup>, соответствующего незагрязненной территории.

6. Найти радионуклиды, получаемые в процессе деления:



7. Определить частицу (элемент) x в следующих ядерных реакциях:

- 7.1  ${}_Z^A X + {}_0^1 n \rightarrow {}_{Z-2}^{A-3} Y + x$ ;  
 7.2  ${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-1}^A Y + x$ ;  
 7.3  ${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z+1}^A Y + x$ ;  
 7.4  ${}_Z^A X + {}_0^1 n \rightarrow {}_{Z-k}^{A-m} Y + 2({}_0^1 n) + x$ ;  
 7.5  ${}_Z^A X + {}_1^2 H \rightarrow {}_{Z+1}^{A+1} Y + x$ .

## 1.4 Варианты заданий

Таблица 1.1 – Варианты к заданию 1

	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$X$	${}^{137}\text{Cs}$	${}^{134}\text{Cs}$	${}^{90}\text{Sr}$	${}^{144}\text{Ce}$	${}^{106}\text{Ru}$	${}^{226}\text{Ra}$	${}^{238}\text{U}$	${}^{138}\text{La}$	${}^3\text{H}$	${}^{14}\text{C}$	${}^{253}\text{Cf}$	${}^{249}\text{Cm}$
$T_{1/2}$	30,12 лет	2,06 года	28,6 года	284 сут	364 сут	1620 лет	$4,5 \cdot 10^9$ лет	$1 \cdot 10^{11}$ лет	12 лет	5760 лет	17,6 сут	64 мин

Таблица 1.2 – Варианты к заданию 2

	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$X$	${}^{89}\text{Sr}$	${}^{136}\text{Cs}$	${}^{91}\text{Sr}$	${}^{141}\text{Ce}$	${}^{95}\text{Ru}$	${}^{225}\text{Ra}$	${}^{233}\text{U}$	${}^{140}\text{La}$	${}^{85}\text{Sr}$	${}^{58}\text{Co}$	${}^{246}\text{Cf}$	${}^{242}\text{Cm}$
$T_{1/2}$	50,1 сут	13 сут	9,7 часа	33,1 сут	2,5 сут	15 сут	$1,6 \cdot 10^5$ лет	40,2 сут	65 сут	267 сут	37 час	262 сут

Таблица 1.3 – Варианты к заданию 4

	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$A$	10 Ки/км <sup>2</sup>	370 КБк/м <sup>2</sup>	370 КБк/м <sup>2</sup>	1 Ки/км <sup>2</sup>	1 Ки/км <sup>2</sup>	1 Ки/км <sup>2</sup>	1000 Ки/км <sup>2</sup>					
$k$	3	3	5	2,3	6	7	7	8	9	3	4	5
$X$	${}^{137}\text{Cs}$	${}^{137}\text{Cs}$	${}^{137}\text{Cs}$	${}^{90}\text{Sr}$	${}^{90}\text{Sr}$	${}^{90}\text{Sr}$	${}^{144}\text{Ce}$	${}^{144}\text{Ce}$	${}^{144}\text{Ce}$	${}^{106}\text{Ru}$	${}^{106}\text{Ru}$	${}^{106}\text{Ru}$
$T_{1/2}$	30,12 лет	30,12 лет	30,12 лет	28,6 года	28,6 года	28,6 года	284 сут	284 сут	284 сут	364 сут	364 сут	364 сут

Таблица 1.4 – Варианты к заданию 5

	Вариант					
	1	2	3	4	5	6
$A$	1400 Ки/км <sup>2</sup>	600 Ки/км <sup>2</sup>	200 Ки/км <sup>2</sup>	37 Ки/км <sup>2</sup>	11 Ки/км <sup>2</sup>	8 Ки/км <sup>2</sup>

	Вариант					
	7	8	9	10	11	12
A	4 Ки/км <sup>2</sup>	2,5 Ки/км <sup>2</sup>	2,3 Ки/км <sup>2</sup>	1,9 Ки/км <sup>2</sup>	1,4 Ки/км <sup>2</sup>	1,3 Ки/км <sup>2</sup>

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Таблица 1.5 – Варианты к заданию 6

	Варианты заданий					
	1	2	3	4	5	6
6.1	$^{218}_{84}\text{Po}$	$^{254}_{98}\text{Cf}$	$^{241}_{94}\text{Pu}$	$^{233}_{92}\text{U}$	$^{249}_{98}\text{Cf}$	$^{257}_{99}\text{Es}$
6.2	$^{225}_{89}\text{Ac}$	$^{241}_{95}\text{Am}$	$^{243}_{95}\text{Am}$	$^{257}_{99}\text{Es}$	$^{252}_{98}\text{Cf}$	$^{233}_{92}\text{U}$
6.3	$^{230}_{90}\text{Th}$	$^{247}_{97}\text{Bk}$	$^{249}_{98}\text{Cf}$	$^{241}_{93}\text{Np}$	$^{241}_{94}\text{Pu}$	$^{256}_{99}\text{Es}$
6.4	$^{220}_{86}\text{Rn}$	$^{214}_{83}\text{Bi}$	$^{252}_{98}\text{Cf}$	$^{256}_{99}\text{Es}$	$^{243}_{95}\text{Am}$	$^{249}_{98}\text{Cf}$
	Варианты заданий					
	7	8	9	10	11	12
6.1	$^{249}_{96}\text{Cm}$	$^{243}_{93}\text{Np}$	$^{253}_{98}\text{Cf}$	$^{257}_{99}\text{Es}$	$^{255}_{98}\text{Cf}$	$^{247}_{97}\text{Bk}$
6.2	$^{247}_{95}\text{Am}$	$^{245}_{95}\text{Am}$	$^{251}_{96}\text{Cm}$	$^{253}_{98}\text{Cf}$	$^{247}_{97}\text{Bk}$	$^{255}_{98}\text{Cf}$
6.3	$^{245}_{95}\text{Am}$	$^{247}_{95}\text{Am}$	$^{258}_{99}\text{Es}$	$^{249}_{96}\text{Cm}$	$^{249}_{97}\text{Bk}$	$^{247}_{97}\text{Bk}$
6.4	$^{243}_{93}\text{Np}$	$^{254}_{98}\text{Cf}$	$^{237}_{93}\text{Np}$	$^{239}_{93}\text{Np}$	$^{249}_{96}\text{Cm}$	$^{247}_{97}\text{Bk}$

Таблица 1.6 – Варианты к заданию 7

	Варианты заданий					
	1	2	3	4	5	6
7.1 X	$^{157}_{73}\text{Ta}$	$^{155}_{71}\text{Lu}$	$^{156}_{71}\text{Lu}$	$^{163}_{76}\text{Os}$	$^{160}_{74}\text{W}$	$^{157}_{72}\text{Hf}$
	Y	$^{154}_{71}\text{Lu}$	$^{152}_{69}\text{Tm}$	$^{153}_{69}\text{Tm}$	$^{160}_{74}\text{W}$	$^{157}_{72}\text{Hf}$
7.2 X	$^{63}_{32}\text{Ge}$	$^{63}_{31}\text{Ga}$	$^{63}_{30}\text{Zn}$	$^{62}_{28}\text{Ni}$	$^{62}_{27}\text{Co}$	$^{62}_{26}\text{Fe}$
	Y	$^{63}_{31}\text{Ga}$	$^{63}_{30}\text{Zn}$	$^{63}_{29}\text{Cu}$	$^{62}_{27}\text{Co}$	$^{62}_{25}\text{Mn}$
7.3 X	$^{90}_{35}\text{Br}$	$^{90}_{36}\text{Kr}$	$^{90}_{37}\text{Rb}$	$^{90}_{38}\text{Sr}$	$^{90}_{39}\text{Y}$	$^{131}_{49}\text{In}$
	Y	$^{90}_{36}\text{Kr}$	$^{90}_{37}\text{Rb}$	$^{90}_{38}\text{Sr}$	$^{90}_{39}\text{Y}$	$^{131}_{50}\text{Sn}$
7.4 X	$^{241}_{94}\text{Pu}$	$^{235}_{92}\text{U}$	$^{239}_{94}\text{Pu}$	$^{235}_{92}\text{U}$	$^{241}_{94}\text{Pu}$	$^{239}_{94}\text{Pu}$
	Y	$^{144}_{56}\text{Ba}$	$^{91}_{38}\text{Sr}$	$^{95}_{37}\text{Rb}$	$^{90}_{35}\text{Br}$	$^{143}_{55}\text{Cs}$
7.5 X	$^{62}_{28}\text{Ni}$	$^{62}_{27}\text{Co}$	$^{131}_{53}\text{I}$	$^{62}_{25}\text{Mn}$	$^{62}_{24}\text{Cr}$	$^{65}_{33}\text{As}$
	Y	$^{63}_{29}\text{Cu}$	$^{63}_{28}\text{Ni}$	$^{132}_{54}\text{Xe}$	$^{63}_{26}\text{Fe}$	$^{65}_{33}\text{As}$
	Варианты заданий					
	7	8	9	10	11	12
7.1 X	$^{162}_{76}\text{Os}$	$^{157}_{80}\text{Hf}$	$^{172}_{78}\text{Pt}$	$^{169}_{76}\text{Os}$	$^{181}_{82}\text{Pb}$	$^{176}_{79}\text{Au}$
	Y	$^{159}_{74}\text{W}$	$^{172}_{78}\text{Pt}$	$^{169}_{76}\text{Os}$	$^{178}_{80}\text{Hg}$	$^{173}_{77}\text{Ir}$
7.2 X	$^{62}_{25}\text{Mn}$	$^{65}_{34}\text{Se}$	$^{65}_{33}\text{As}$	$^{65}_{32}\text{Ge}$	$^{65}_{31}\text{Ga}$	$^{65}_{30}\text{Zn}$
	Y	$^{62}_{24}\text{Cr}$	$^{65}_{33}\text{As}$	$^{65}_{32}\text{Ge}$	$^{65}_{31}\text{Ga}$	$^{65}_{29}\text{Cu}$
7.3 X	$^{131}_{50}\text{Sn}$	$^{131}_{51}\text{Sb}$	$^{131}_{52}\text{Te}$	$^{131}_{53}\text{I}$	$^{137}_{54}\text{Xe}$	$^{131}_{55}\text{Cs}$
	Y	$^{131}_{51}\text{Sb}$	$^{131}_{52}\text{Te}$	$^{131}_{53}\text{I}$	$^{131}_{54}\text{Xe}$	$^{131}_{55}\text{Cs}$
7.4 X	$^{239}_{94}\text{Pu}$	$^{239}_{94}\text{Pu}$	$^{241}_{94}\text{Pu}$	$^{235}_{92}\text{U}$	$^{241}_{94}\text{Pu}$	$^{235}_{92}\text{U}$
	Y	$^{105}_{43}\text{Tc}$	$^{95}_{36}\text{Kr}$	$^{96}_{39}\text{Y}$	$^{72}_{30}\text{Zn}$	$^{93}_{37}\text{Rb}$
7.5 X	$^{134}_{53}\text{I}$	$^{65}_{33}\text{As}$	$^{65}_{32}\text{Ge}$	$^{65}_{31}\text{Ga}$	$^{65}_{30}\text{Zn}$	$^{62}_{28}\text{Ni}$
	Y	$^{134}_{54}\text{Xe}$	$^{66}_{34}\text{Se}$	$^{66}_{33}\text{As}$	$^{66}_{32}\text{Ge}$	$^{63}_{29}\text{Cu}$

# Практическое занятие 2

## Защита от ионизирующего излучения

### 2.1 Основные понятия и термины

#### 2.1.1 Радиоактивное заражение

Радиоактивное заражение – один из основных поражающих факторов ядерного взрыва. Оно возникает как результат выпадения радиоактивных веществ из облака взрыва или образования их вследствие распада возникающих при взрыве радиоактивных элементов.

*Особенности радиоактивного заражения:*

- большая площадь поражения (десятки тысяч квадратных километров);
- продолжительность сохраняющегося поражающего действия (до месяцев);
- необходимость применения специальной аппаратуры для обнаружения радиации;
- динамичный характер действия из-за постоянного распада радиоактивных веществ.

*Источники радиоактивности:*

– продукты деления вещества, составляющего ядерное горючее. Процесс радиоактивного распада сопровождается продолжительным  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучением с высоким уровнем энергии;

– наведенная радиоактивность, возникающая в результате воздействия нейтронного потока ядерного взрыва на химические элементы, входящие в грунт, сооружения и различные конструкции. В результате образуются радиоактивные изотопы кремния, натрия, марганца, алюминия, железа и других химических элементов. Эти изотопы, как правило, обладают  $\beta$ - и  $\gamma$ -радиоактивностью;

– разделившаяся часть атомов ядерного заряда (коэффициент использования ядерного заряда непосредственно для взрыва составляет не более 10 %). Эта часть заряда в основном излучает альфа-частицы и незначительную часть гамма лучей с низкой энергией.

Масштабы и степень радиоактивного заражения местности зависят от мощности и вида ядерного взрыва, особенности конструкции заряда, характера местности, где он был произведен метеорологических условий и времени, прошедшего с момента взрыва.

*При воздушном взрыве* огненный шар не касается поверхности земли. Основная масса радиоактивных продуктов уходит в стратосферу и лишь не большая часть остается в тропосфере. Поскольку радиоактивные частицы небольшие и малы по весу, то они долго «висят» в воздухе и ветром разносятся на большие расстояния, где и выпадают в виде осадков.

*При наземном взрыве* огненный шар касается поверхности земли. Окружающая среда сильно нагревается, часть грунта испаряется и захватывается огненным шаром. Образуется радиоактивное облако, высота подъема которого и скорость перемещения зависят от мощности взрыва и метеорологических условий. В среднем за 7–10 мин облако достигает своей максимальной высоты и образует грибовидную форму. Затем облако перемещается.

Основная часть вредных радиоактивных осадков, загрязняющих местность, выпадает из облака в течение 10–20 ч после взрыва. Форма следа от радиоактивного облака зависит от направления и скорости ветра.

*Виды радиоактивного воздействия источников заражения местности:*

–  $\alpha$ -излучение – поток положительно заряженных частиц (ядер атомов гелия), движущийся со скоростью 20 000 м/с. Имеет малую проникающую способность. В воздухе  $\alpha$ -частица пролетает 4–8 см, в живых тканях – 0,05 мм. Полностью поглощается индивидуальными средствами защиты.  $\alpha$ -частицы опасны при проникновении внутрь организма;

–  $\beta$ -излучение – поток отрицательно заряженных частиц (электронов), движется со скоростью 200 000–300 000 км/с. Длина пробега в воздухе достигает 20 м. На теле человека могут вызвать  $\beta$ -ожог. От  $\beta$ -излучения люди защищаются в помещении. Индивидуальные средства защиты также резко ослабляют их воздействие;

–  $\gamma$ -излучение – коротковолновое электромагнитное излучение. По своим действиям подобно рентгеновским лучам, но обладает более мощной энергией. Распространяется со скоростью света.  $\gamma$ -излучение пронизывает воздух на сотни метров и проникают через значительные толщи материалов. Индивидуальные средства защиты от  $\gamma$ -излучения не защищают, опасны при внешнем облучении.

Степень воздействия определяется дозой облучения, то есть количеством  $\gamma$ -квантов, поглощенных единицей объема облучаемой среды. За единицу дозы  $\gamma$ -излучения принят рентген.

Рентген – это такая доза  $\gamma$ -облучения, при которой в 1 см<sup>3</sup> воздуха (при  $t = 0^\circ\text{C}$  и давлении 760 мм ртутного столба) образуется

$2,08 \cdot 10^9$  пар ионов,  $P = 2,58 \cdot 10^{-4}$  Кл/кг. На создание такого количества ионов необходимо затратить количество энергии, равное 8,8 мДж/кг (88 эрг/г).

Энергетической характеристикой взрыва ядерного заряда является так называемый *тротиловый эквивалент*. Выделяемая в результате ядерного взрыва энергия условно измеряется в килотоннах (кт) или мегатоннах (Мт), что означает соответствующее количество тротила, которое при подрыве выделяет столько же энергии. Например, ядерный взрыв урана-235 при полном делении всех ядер эквивалентен по количеству выделившейся энергии взрыву 20 000 т тротила (таблица 2.1).

По величине тротилового эквивалента ядерные боеприпасы подразделяются на пять групп:

- 1) сверхмалые – до 1 кт;
- 2) малые – от 1 до 10 кт;
- 3) средние – от 10 до 100 кт;
- 4) крупные – от 100 кт до 1 Мт;
- 5) сверхкрупные – свыше 1 Мт.

Таблица 2.1 – Тротиловый эквивалент 1 кг массы ядерного материала

Ядерный материал	Тротиловый эквивалент, кт
$^{235}\text{U}$	20
$^{235}\text{U}$ , $^{239}\text{U}$ , $^{239}\text{Pu}$	20
Дейтерид лития	52
Дейтерий и тритий	84

Большая часть внутриядерной энергии выделяется в виде кинетической энергии продуктов ядерной реакции деления или синтеза, нейтронного и гамма излучения. Температура и давление в зоне реакции достигают десятков миллионов градусов и миллиарда атмосфер.

### 2.1.2 Степень радиоактивного заражения

Степень радиоактивного заражения местности и предметов оценивается уровнем радиации. Уровень радиации представляет собой мощность дозы  $\gamma$ -излучения, накапливаемой в единицу времени. Он измеряется в рентгенах в час (Р/ч), или в миллирентгенах в час (мР/ч). Местность считается зараженной радиоактивными веществами при уровне радиации 0,5 Р/ч или выше.

Уровень радиации зависит от плотности  $\gamma$ -квантов и их энергии.  $\gamma$ -активность радиоактивных веществ подчиняется закону радиоактивного распада, то есть:

$$P(t) = P_0(t:t_0)^{-1,2}, (2.1)$$

где  $P(t)$  – уровень радиации в рассматриваемый момент времени  $t$ , отсчитанного с момента взрыва;

$P_0$  – уровень радиации в момент времени  $t_0$ .

Вредное биологическое воздействие радиоактивных излучений на людей связано с ионизацией и возбуждением атомов и молекул клеток живой ткани. Мера воздействия в рентгенах называется дозой радиации.

Характер лучевого поражения организма зависит от вида излучения и дозы облучения, продолжительности воздействия радиации на организм, от площади облученной части тела, а также от общего состояния организма. Различают три степени лучевой болезни (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Характеристика степеней лучевой болезни

Степень лучевой болезни	Признаки проявления болезни
Первая (легкая)	Возникает при общей дозе облучения 100–200 Р. Скрытый период продолжается две-три недели, после чего наступают недомогание, общая слабость, тошнота, головокружение, периодическое повышение температуры. В крови уменьшается количество лейкоцитов. Болезнь в этой степени излечима. Смертельных случаев не наблюдается
Вторая (средняя)	Возникает при общей дозе облучения 200–300 Р. Скрытый период длится около недели, после чего проявляются признаки, характерные для болезни первой степени, но в более выраженной форме. При активном лечении выздоровление наступает через 1,5–5 месяцев. Смертность около 20 %
Третья (тяжелая)	Возникает при общей дозе облучения 300–500 Р. Скрытый период сокращается до нескольких часов. Болезнь протекает более интенсивно и тяжело. При активном лечении и благоприятном исходе выздоровление наступает через шесть – восемь месяцев. Смертность около 50 % (при облучении дозой 400–500 Р)

### 2.1.3 Уровни радиации и радиационная обстановка

Радиационную разведку на объектах национального хозяйства ведут разведывательные группы. Они устанавливают факт начала радиоактивного заражения местности, уровни радиации. Зависимость уровня радиации от времени, прошедшего с начала процесса заражения, можно представить формулой:

$$P(t) = P(t_0) * K(t), \quad (2.2)$$

где  $P(t)$  и  $P(t_0)$  – уровни радиации в момент времени  $t$  и  $t_0$ ;

$K(t)$  – коэффициент спада радиации, принимается  $P(t) = P_0(t:t_0)^{-1,2}$ .

В расчетах принимается  $t_0 = 1$  ч (иногда 10 ч). Затем для различных  $t$  рассчитывают значения  $K(t)$ . В таблице 2.3 представлены значения коэффициентов спада уровня радиации. Используя эти зависимости, можно достаточно просто оценить уровень радиации на время, прошедшее с момента взрыва.

Таблица 2.3 – Значения коэффициента спада уровня радиации

$T, \text{ ч}$	$K(t)$	$T, \text{ ч}$	$K(t)$	$T, \text{ ч}$	$K(t)$
1	1	9	0,072	17	0,033
2	0,435	10	0,063	18	0,031
3	0,267	11	0,056	20	0,027
4	0,189	12	0,051	24	0,022
5	0,145	13	0,046	26	0,020
6	0,116	14	0,042	28	0,018
7	0,097	15	0,039	36	0,013
8	0,082	16	0,036	48	0,001

Значение коэффициента спада уровня радиации может быть оценено с помощью функции вида:

$$K = 1,38 * t^{-1,37}, \quad (2.3)$$

где  $t, \text{ ч}$  – время, прошедшее с момента взрыва.

### 2.1.4 Прогнозирование уровня радиации

Для расчета уровня радиации используются следующие данные:

– мощность ядерного взрыва (или мощность ядерной аварии);

- момент взрыва;
- место (координаты), где произошел взрыв;
- метеорологические условия, при которых произошел взрыв (направление и скорость ветра).

Теоретические зависимости достаточно сложные, поэтому в практических оценках применяется некоторый приближенный подход. В качестве исходных сведений используется полученная на практике зависимость изменения уровня радиации при некотором принятом за «нормативный» уровне мощности наземного ядерного взрыва 1 Мт при скорости ветра 50 км/ч. Для приближенных оценок данные графических зависимостей можно представить в виде таблицы 2.4.

Таблица 2.4 – Изменение уровня радиации  $P$  на оси следа от эпицентра наземного ядерного взрыва мощностью 1 Мт при скорости ветра 50 км/ч

Расстояние $R$ , км	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
Уровень радиации, Р/ч	320	195	100	60	40	27	18	13	9,5	7,3	5,6	4,5

Используя табличные данные, можно достаточно точно спрогнозировать возможный уровень радиации для реальных условий.

### 2.1.5 Алгоритм оценки уровня радиации

1. Для некоторого расстояния  $R(x)$  определяется эталонный уровень радиации  $P_0$  (уровень радиации при мощности взрыва  $q_0 = 1$  Мт и средней скорости ветра, направленного на объект  $V_0 = 50$  км/ч).
2. Используя зависимость уровня радиации от скорости ветра, вносим корректировку в значение уровня за счет реальной скорости ветра:

$$P = \frac{V_0 P_0}{V}. \quad (2.4)$$

3. Используя зависимость уровня радиации от величины мощности взрыва, вносим корректировку в значение уровня радиации  $P$  за счет величины мощности взрыва:

$$P = \frac{q_0 P_0}{q}. \quad (2.5)$$

4. Определяя время, прошедшее после взрыва, при определенной скорости ветра рассчитываем время выпадения радиоактивных осадков на объект:

$$t = R : V. (2.6)$$

5. Учитывая спад радиоактивности по уравнению 2, рассчитываем возможный уровень радиации на время проведения в зоне выпадения осадков.

### 2.1.6 Определение зоны заражения по известному уровню радиации

Границы зоны радиоактивного заражения определяются уровнем радиации за 1 ч после взрыва (аварии), то есть дозой, полученной за 1 час после взрыва, до времени полного распада радиоактивных веществ. В таблице 2.5 представлены периоды полураспада биологически значимых продуктов взрыва.

Доза радиации за время от  $t_1$  до  $t_2$  определяется зависимостью вида:

$$D = \frac{P_{cp} \cdot T}{K_{осл}}, (2.7)$$

где  $D$  – доза радиации, Рентген;

$$P_{cp} = (P_n + P_k) : 2;$$

$P_n$  – уровень радиации в начале облучения;

$P_k$  – уровень радиации в конце облучения;

$K_{осл}$  – кратность ослабления для  $\gamma$ -излучения, принимается равной 1,5;

$T$  – время облучения.

На рисунке 2.1 схематически представлены зоны заражения, характеризующиеся конкретными значениями уровней радиации и полученной дозы.

Таблица 2.5 – Биологически значимые продукты взрыва

Элемент	$T_{1/2}$	Элемент	$T_{1/2}$	Элемент	$T_{1/2}$	Элемент	$T_{1/2}$
Kr-85	10,7 лет	I-129	$1,6 \cdot 10^7$ лет	Nb-95	35,0 сут.	Ba-140	12,7 сут.
Kr-85m	4,5 ч	I-131	8,02 сут.	Zr-95	64,0 сут.	Ce-141	32,5 сут.
Kr-87	1,3 ч	I-133	20,9 ч	Ru-103	39,2 сут.	Pr-143	13,6 сут.

Kr-88	2,8 ч	I-135	6,6 ч	Ru-106	1,0 год	Ce-144	286 лет
Xe-133	5,2 сут.	Sr-89	50,6 ч	Te-129m	33,6 сут.	Eu-55	4,7 лет
Xe-133m	2,2 сут.	Sr-90	29,2 года	Cs-134	2,1 года		
Xe-135	9,1 ч	Y-91	58,5 сут.	Cs-137	30,0 лет		

При движении людей по различным участкам зоны заражения доза вычисляется как сумма составляющих зон для каждого участка пути. Зная границы зон радиации и пути движения людей, необходимо вычислить допустимое время пребывания в зонах, используя таблицу 2.6.

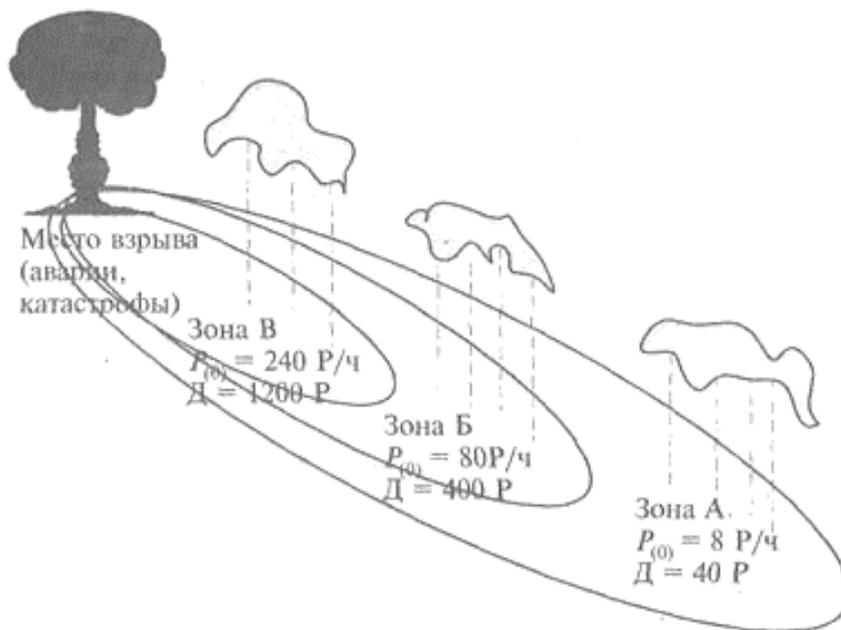


Рисунок 2.1 – Зоны радиоактивного заражения местности

Допустимое время пребывания можно рассчитать как

$$T = \left[ t_{BX}^6 : (t_{BX} - A)^5 \right] - t_{BX}, \quad (2.8)$$

где  $t_{BX}$  – время прошедшее после взрыва, ч;

$A$  – уровень радиации на входе в зону, P/ч.

Таблица 2.6 – Допустимое время пребывания в зараженном районе

A	Время, прошедшее после взрыва ( $t_{BX}$ ), ч					
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
	Допустимое время пребывания в зараженном районе, ч-мин.					
0,2	0–15	0–14	0–13	0–12	0–12	0,12
0,3	0–22	0–22	0–20	0–19	0–19	0,19
0,5	1–02	0–42	0–35	0–34	0–32	0,32

0,8	2–56	1–23	1–02	0–57	0–54	0,53
1,0	5–56	2–03	1–23	1–14	1–10	1,08
2,0	15–62	11–52	4–06	3–13	2–46	2–35
6,0	–	–	193–19	35–35	19–48	14–45

Таблица 2.7 – Шкала степени облучения человека

Доза облучения, бэр*	Последствия от полученной дозы облучения
450	Тяжелая степень лучевой болезни (погибают 50%)
100	Нижний уровень развития легкой степени лучевой болезни
75	Кратковременные изменения состава крови
30	Облучения при рентгеноскопии желудка
25	Допустимое аварийное разовое облучение персонала
10	Допустимое аварийное разовое облучение населения
5	Допустимое облучение персонала в нормальных условиях за год
3	Облучение при рентгенографии зубов
500 Мбэр или 0,06 Мбэр/ч	Допустимое облучение населения в нормальных условиях за год
100 Мбэр, 0,011 Мбэр/ч	Фоновое облучение за год
Примечание. – 1 бэр* = 10 <sup>-2</sup> Зв	

# Практическое занятие 3

## Оценка риска проживания на радиоактивно-загрязненной территории

### 3.1 Основные понятия и термины

Воздействие ионизирующего излучения на здоровье человека может быть обусловлено дозой внешнего ( $D^{\text{ext}}$ ) и внутреннего ( $D^{\text{int}}$ ) излучения:

$$D^{\Sigma} = D^{\text{int}} + D^{\text{ext}}. \quad (3.1)$$

Внешнее облучение обусловлено радионуклидами, находящимися в окружающей среде, в первую очередь, в воздухе и на поверхности почвы. Соответственно, доза внешнего облучения складывается из двух составляющих:

$$D^{\text{ext}} = D^s + D^v, \quad (3.2)$$

где  $D^s$  – доза внешнего  $\gamma$ -излучения от поверхности почвы, Зв;  
 $D^v$  – доза внешнего  $\gamma$ -излучения от радионуклидов в атмосфере, Зв.

При расчете дозы внешнего облучения следует учесть, что от 0,1 до 0,4 времени в течение суток человек проводит на улице, а жилые постройки имеют определенное свойство к экранированию излучения. Соответственно, величина дозы внутреннего облучения должна быть скорректирована:

$$D_{s'} = 0,46 \cdot D_s. \quad (3.3)$$

Доза внешнего  $\gamma$ -излучения от радионуклидов, находящихся в атмосфере:

$$D_v(t) = A_v \cdot B_{v\gamma} \cdot t, \quad (3.4)$$

где  $B_{v\gamma}$  – дозовый коэффициент, Зв·м<sup>3</sup>·час<sup>-1</sup>·Бк<sup>-1</sup> (таблица 3.1);  
 $A_v$  – объемная активность радионуклида в воздухе, Бк·м<sup>-3</sup>;  
 $t$  – время, час.

Доза внутреннего облучения определяется от алиментарного и ингаляционного поступления  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучающих радионуклидов, а роль  $\gamma$ -излучения в формирование дозы внутреннего облучения относительно мала.

Доза внутреннего облучения ( $D^{int}$ ) обусловлена ингаляционным ( $D_{ing}$ ) и алиментарным ( $D_{al}$ ) поступлением радионуклидов:

$$D^{int} = D_{ing} + D_{al}. \quad (3.5)$$

При этом ингаляционная доза будет равна:

$$D_{ing}(t) = A_v \cdot B_{v\beta\gamma} \cdot V \cdot t, \quad (3.6)$$

где  $B_{v\beta\gamma}$  – дозовый от ингаляции радионуклида (таблица 3.1), Зв·Бк<sup>-1</sup>;  
 $A_v$  – объемная активность радионуклида в воздухе, Бк·м<sup>-3</sup>;  
 $V$  – потребление воздуха в час, м<sup>3</sup>·ч<sup>-1</sup>;  
 $t$  – время, час.

Таблица 3.1 – Дозовые коэффициенты

	$T_{1/2}$	Дозовые коэффициенты,			Дозовый коэффициент при поступлении, Зв/Бк	
		$B_{\alpha\beta}$	$B_{v\gamma}$	$B_{sy}$	с воздухом, $B_{v\beta\gamma}$	с пищей и водой, $B_{al}$
		Зв·м <sup>3</sup> ·час <sup>-1</sup> ·Бк <sup>-1</sup>				
<sup>90</sup> Sr	28,2 г.	2,18E-11	1,79E-10	-	5,0E-08*	8,0E-08*
<sup>137</sup> Cs	30,1 г.	1,36E-11	4,68E-10	4,18E-13	4,6E-09	1,3E-08

Примечание. – \* – дозовый коэффициент для красного костного мозга

Доза внутреннего облучения от алиментарного поступления рассчитывается по формуле:

$$D_{al} = 365 \cdot B_{al} \cdot \sum_{i=1}^n m_i \cdot UA_i, \quad (3.7)$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -го продукта, потребляемого в сутки (таблица 3.2), кг;

$UA_i$  – удельная активность  $i$ -го продукта питания, Бк·кг<sup>-1</sup>;

$B_{al}$  – дозовый коэффициент алиментарного поступления, Зв·Бк<sup>-1</sup>.

Рассчитывается суммарная доза внешнего и внутреннего облучения:

$$D^{\Sigma} = D_S + D_V + D_{ing} + D_{al}. \quad (3.8)$$

Исходя из величины полученной дозы рассчитывается индивидуальный радиационный риск  $r$  (чел<sup>-1</sup>):

$$r = D^{\Sigma} \cdot r_e, \quad (3.9)$$

где  $r_e$  – индивидуальный радиационный риск, принимаемый для населения равным  $7,3 \cdot 10^{-2}$  чел<sup>-1</sup> · Зв<sup>-1</sup>.

Данный коэффициент характеризует сокращение длительности периода полноценной жизни в среднем на 15 лет на один стохастический (вероятностный) случай смертельного заболевания.

Применяется следующая шкала индивидуальных радиационных рисков воздействия:

- при  $r_e < 10^{-6}$  индивидуальный канцерогенный риск воздействия рассматриваемого излучения считается пренебрежимо малым;
- в диапазоне  $10^{-6} < r_e < 5,0 \cdot 10^{-5}$  индивидуальный канцерогенный риск воздействия считается приемлемым;
- при  $r_e > 5,0 \cdot 10^{-5}$  риск воздействия недопустим.

Таблица 3.2 – Примерное суточное потребление основных продуктов питания для сельских жителей

Продукты	Суточное потребление, кг
хлеб	0,4
картофель	0,474
овощи	0,2
фрукты	0,06
мясо	0,11
молоко	0,5
грибы свежие	0,02
ягоды лесные	0,009

Примечание. – Индивидуальный пищевой рацион может претерпевать значительное варьирование по сравнению с типичным, как по перечню продуктов, так и по их массе. Приведенный рацион был использован при расчете гигиенических нормативов РДУ-99

Коллективная доза  $K$  (чел·Зв) равна произведению индивидуальной дозы  $D^{\Sigma}$  (Зв) на численность облученной когорты  $N$  (чел):

$$K = D^{\Sigma} \cdot N. \quad (3.10)$$

Коллективный радиационный риск  $R$  равен произведению коллективной дозы  $K$  (чел·Зв) на коэффициент индивидуального радиационного риска  $r_e$  (чел<sup>-1</sup> · Зв<sup>-1</sup>):

$$R = K \cdot r_e. \quad (3.11)$$

Коллективный риск отражает количество случаев проявления стохастических эффектов от действия излучения, каждый из которых определяет сокращение длительности периода полноценной жизни на  $\beta=15$  лет. Перемножая величину коллективной дозы  $K$  на величину  $\beta$  получаем потерю коллективной продолжительности жизни  $\Delta$ :

$$\Delta = R \cdot \beta. \quad (3.12)$$

Данный показатель позволяет рассчитать относительную потерю коллективной продолжительности жизни  $\delta$ :

$$\delta = \frac{\Delta}{70 \cdot N}. \quad (3.13)$$

Индивидуальное сокращение жизни человека от воздействия ионизирующего излучения при этом составит  $\Delta_u$ :

$$\Delta_u = 70 \cdot \delta \quad (3.14)$$

### 3.2 Задание по лабораторной работе

Рассчитать дозу внешнего облучения при проживании на территории с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$   $37\,000 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-2}$ , внешнего облучения от  $^{137}\text{Cs}$  при объемной активности в воздухе  $10^{-4} \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ , ингаляционную дозу от  $^{137}\text{Cs}$ , годовое поступление  $^{137}\text{Cs}$  с продуктами питания, индивидуальный и коллективный риски, относительную и индивидуальную потерю жизни при облучении (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Варианты для выполнения лабораторной работы

Продукты	Суточное потребление $m_i$ , кг	Удельная активность $^{137}\text{Cs}$ $UA_i$ , Бк·кг <sup>-1</sup>											
		Вариант											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
хлеб	0,4	2	1	1	370	370	74	40	20	15	10	5	4
картофель	0,474	5	3	3	740	370	74	80	40	20	10	10	6
овощи	0,2	10	5	5	740	185	100	100	150	100	40	15	10
фрукты	0,06	10	5	5	740	185	100	40	40	20	15	10	10
мясо	0,11	20	10	10	590	600	370	180	150	100	70	50	50
молоко	0,5	40	15	5	370	111	111	100	80	40	30	30	30
грибы свежие	0,02	200	100	60	1850	370	370	370	370	370	370	300	250
ягоды лесные	0,009	60	30	30	185	185	185	185	150	150	150	100	100

Примечание – Каждый вариант задания соответствует содержанию  $^{137}\text{Cs}$  в продуктах питания для различных условий или временного промежутка: вариант 1 – в Белорусском и Украинском Полесье в конце 70-х гг.; вариант 2 – на территории Беларуси в конце 70-х гг.; вариант 3 – средневзвешенное по территории бывшего

СССР в конце 70-х гг.; 4 – норматив ВДУ-88; 5 – норматив РДУ-92; 6 – норматив РДУ-96; 7 – норматив РДУ-99; 8–10 – удельная активность в продуктах питания в различные периоды после аварии на ЧАЭС; 11-12 – типичные удельные активности <sup>137</sup>Cs.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

# Практическое занятие 4

## Прогнозирование загрязнения атмосферного воздуха

### 4.1 Основные понятия и термины

Атмосферный перенос определяет наиболее быстрое перемещение низких концентраций загрязняющих веществ в локальном, региональном и даже глобальном масштабах по сравнению с водным, почвенным и биогенным. Поэтому при разработке экологических оценок воздействия на окружающую среду всех производств, связанных с загрязнением атмосферы (прежде всего, ядерного топливного цикла и энергетики, химических, переработки нефти и газа), всегда рассматриваются ситуации, связанные с выбросом загрязняющих веществ.

Моделирование загрязнения атмосферы и распространения выброса позволяет оценить содержание загрязнителя в атмосфере и возможное воздействие на животных и людей, уровень загрязнения почвы, хозяйственно-ценных растений при переходе в них загрязняющего вещества по внекорневому и корневому пути поступления, а также миграцию загрязнителя по пищевым цепочкам различных биогеоценозов.

Наиболее часто для таких целей применяют *гауссовы модели переноса загрязняющих веществ в атмосфере*.

Они разработаны на основании статистических закономерностей распределения загрязняющих веществ (рисунок 4.1).

Гауссовы модели используются для оценки загрязнения атмосферного воздуха в течение небольших промежутков времени (не более 1 суток), в пределах которых свойства атмосферы можно считать постоянными.

Гауссова модель распространения загрязнителя в атмосфере предполагает его осаждение по направлению движения ветра под действием сил тяжести, а в поперечном и вертикальном направлении – согласно закону нормального распределения по кривой Гаусса. Облако выброса с погрешностью не более 10 % имитируется в форме шлейфа с равномерно распределенной объемной концентрацией загрязняющего вещества  $A_v'$ , г·м<sup>-3</sup> (в случае радионуклидов – объемной активностью) для той или иной категории устойчивости атмосферы.

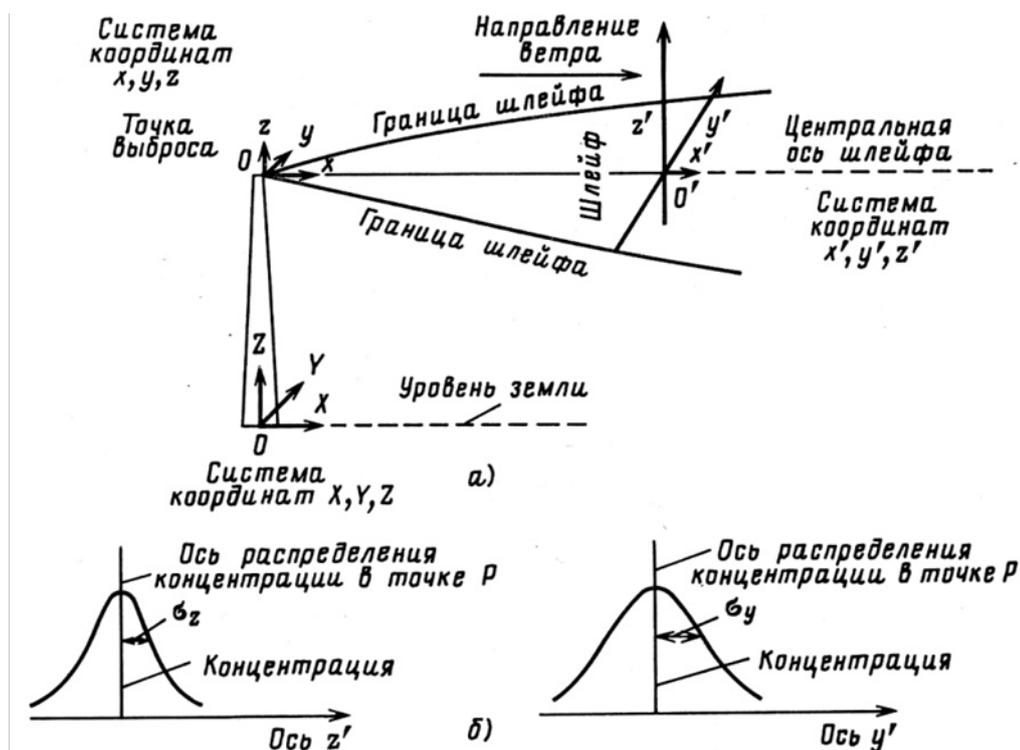


Рисунок 4.1 – Система координат (а) и параметров стандартных отклонений шлейфа выброса (б)

Под категорией устойчивости атмосферы понимают характерные для территории, над которой происходит распространение выброса погодных условий (распределение температур воздуха по высоте и направления движения ветра), определяющих интенсивность турбулентности в атмосфере и, как следствие, условия рассеяния выбрасываемых веществ.

Наиболее широкое распространение получила схема классификации категории устойчивости Пасквилла, согласно которой используется шесть категорий, распределенных по возрастанию степени устойчивости атмосферы от *A* (наиболее неустойчивого) до *F* (максимально устойчивого). Наиболее вероятное состояние атмосферы – *D* – нейтральное или близкое к таковому. С помощью Гауссовых моделей рассчитываются два важнейших показателя.

Объемная интегральная концентрация загрязнителя  $A_v$  ( $\text{г} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3}$  в случае радионуклидов – объемная активность,  $\text{Бк} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3}$ ) для точки с координатами  $(x, y, z)$ :

$$A_v = Q \cdot G, \quad (4.1)$$

где  $Q$  – интегральный выброс, (г или Бк);

$G$  – фактор метеорологического разбавления,  $\text{с} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Средняя объемная активность загрязнителя ( $\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$  или  $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ ) за время существования облака выброса  $t$ :

$$A_v' = A_v / t, \quad (4.2)$$

где  $t$  – время выброса, с.

При оценках максимально возможного уровня осаждения загрязнителя на оси следа выпадений ( $y = 0$ ) в слое воздуха ( $z = 0$ ), фактор метеорологического разбавления  $G(x, y, z)$  будет равен:

$$G(x, y, z) = \frac{1}{\pi \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot u} \cdot e^{\left[-\frac{h^2}{2\sigma_z(x)}\right]} \cdot f_d(x) \cdot f_{dep}(x), \quad (4.3)$$

где  $x, y, z$  – Эйлера координаты точки (рисунок 1), м;

$u$  – скорость ветра,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ;

$h$  – высота выброса над землей, м;

$\sigma_z(x), \sigma_y(x)$  – стандартное отклонение распределения примеси, м;

$f_d(x), f_{dep}(x)$  – поправки на химическое или физическое разрушение загрязнителя и осаждение его из атмосферы.

Поперечная дисперсия  $\sigma_y(x)$ :

$$\sigma_y(x) = c_3 \cdot x \cdot (\sqrt{1 + 0,0001 \cdot x})^{-1}, \quad (4.4)$$

где  $z_0$  – аэродинамическая шероховатость поверхности, см;

$c_3$  – численный коэффициент.

Вертикальная дисперсия  $\sigma_z(x)$ :

$$\sigma_z(x) = f(z_0, x) \cdot g(x), \quad (4.5)$$

Функции  $g(x)$  и  $f(z_0, x)$  рассчитывают по формулам:

$$g(x) = a_1 \cdot x^{b_1} \cdot (1 + a_2 \cdot x^{b_2})^{-1}, \quad (4.6)$$

$$f(z_0, x) = \left\{ \begin{array}{ll} \ln \left[ c_1 \cdot x^{d_1} \cdot (1 + (c_2 \cdot x^{d_2})^{-1}) \right] & \text{при } z_0 > 10 \text{ см;} \\ \ln \left[ c_1 \cdot x^{d_1} \cdot (1 + c_2 \cdot x^{d_2})^{-1} \right] & \text{при } z_0 \leq 10 \text{ см} \end{array} \right\}, \quad (4.7)$$

где  $c_1, d_1, c_2, d_2, a_1, b_1, a_2, b_2$  – численные коэффициенты, зависящие от категории устойчивости атмосферы и шероховатости поверхности, приведены в Приложении А (таблицы А1–А3).

Поправка на химическое или физическое разрушение загрязнителя рассчитывается по следующей формуле:

$$f_d(x) = e^{(-\lambda \cdot x/u)}, \quad (4.8)$$

где  $\lambda$  – постоянная химического или физического распада,  $\text{с}^{-1}$ .

Если вещество не распадается или время его распада значительно больше времени эксперимента, то  $\lambda$  принимается равной 0. Отметим, что  $x/u$  – это время движения облака к точке с удалением  $x$  от места выброса.

Поправка на гравитационное осаждение рассчитывается следующим образом:

$$f_{dep}(x) = \exp \left[ -\sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{v_g}{u} \int_0^x \left( \frac{1}{\sigma_z(x) \cdot \exp(0,5 \cdot h^2 \cdot \sigma_z^{-2}(x))} \right) dx \right], \quad (4.9)$$

где  $v_g$  – скорость гравитационного осаждения,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Плотность осаждения загрязнителя на поверхность почвы ( $\text{Г} \cdot \text{м}^{-2}$ ) может быть описана следующей зависимостью:

$$A_s = Q \cdot (v_g \cdot G). \quad (4.10)$$

## 4.2 Задание на выполнение лабораторной работы

Рассчитать объемную концентрацию, объемную интегральную концентрацию загрязнителя в приземном слое воздуха, плотность загрязнения почвы ( $z = 0$  м) на оси следа ( $y = 0$  м) при выбросе вследствие максимальной проектной аварии. Исходные данные взять из таблицы 4.1. Описать выполнение работы для  $x = 100$  м.

Результаты расчетов представить в таблице 4.2. В выводах отразить характер изменения концентрации загрязнителя и плотности загрязнения в зависимости от расстояния до источника выброса.

Таблица 4.1 – Варианты заданий на выполнение лабораторной работы

Исходные данные	Варианты задания									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Загрязнитель	$^{90}\text{Sr}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{137}\text{Cs}$	Cd	Hg	Cd	Hg
$Q$	3e+12	1e+13	1e+12	2e+14	4e+12	1e+14	5e+2	5e+2	5e+2	5e+2
$t, \text{с}$	3600	3600	3600	3600	3600	2400	2400	2400	2400	2400
$u, \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	3
$h, \text{м}$	30	40	30	30	40	30	30	40	30	50
категория	A	A	A	D	D	D	F	F	F	F

атмосферы										
$z_0$ , см	40	100	400	40	100	400	40	100	400	400
$\lambda$ , с <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$v_g$ , м·с <sup>-1</sup>	0,01	0,005	0,001	0,01	0,005	0,001	0,01	0,005	0,001	0,001

Окончание таблицы 4.1

Исходные данные	Варианты задания									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Загрязнитель	As	As	Pb	Pb	Zn	Zn	Бенз(а)пирен	Диоксин		
$Q$	5e+3	4e+3	1,5e+4	3e+4	5e+3	1e+4	4e-3	5e-3	2e-6	4e-6
$t$ , с	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
$u$ , м·с <sup>-1</sup>	1	2	3	2	2	2	2	2	2	2
$h$ , м	30	30	30	10	20	40	30	30	20	40
категория атмосферы	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
$z_0$ , см	100	100	100	100	100	100	40	400	40	40
$\lambda$ , с <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$v_g$ , м·с <sup>-1</sup>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,001

Примечание. – Величина выброса  $Q$  для радиоактивных изотопов приведена в Бк, для тяжелых металлов и химических загрязнителей – в граммах.

Таблица 4.2 – Результаты расчетов по моделированию загрязнения атмосферы

$x$ , м	$\sigma_y(x)$	$g(x)$	$f(z_0, x)$	$\sigma_z(x)$	$f_{oc}(x)$	$A_y$	$A_v$	$A_s$

# Практическое занятие 5

## Оценка риска для здоровья человека при загрязнении продуктов питания различными токсикантами

### 5.1 Основные понятия и термины

К числу наиболее опасных загрязнителей окружающей среды относятся канцерогенные вещества, воздействие которых достоверно увеличивает частоту возникновения опухолей в популяциях человека и/или животных и/или сокращает время развития этих опухолей.

При оценке воздействия канцерогенных веществ, используют два важных положения:

– у канцерогенов *нет пороговой дозы*, их действие начинается уже при самых малых количествах, попавших в организм человека или животного;

– вероятность развития онкозаболевания (то есть канцерогенный риск) прямо *пропорциональна количеству* (дозе) канцерогена, поступившего в него.

Совокупность этих двух положений называют *беспороговой линейной моделью*:

$$r = F_r \cdot m \quad (5.1)$$

где  $r$  – индивидуальный канцерогенный риск – дополнительный риск онкологического заболевания (к уже существующей вероятности равной примерно 0,2), вызываемый поступлением данного канцерогена;

$m$  – среднесуточное поступление канцерогена с воздухом, водой или с пищей, отнесенное к 1 кг массы тела человека, ( $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ );

$F_r$  – коэффициент между риском и дозой – фактор риска.

*Фактор риска  $F_r$  показывает, насколько быстро возрастает вероятность онкозаболевания при увеличении дозы канцерогена, поступившего в организм человека с воздухом, водой или пищей. Размерность фактора риска  $F_r$  –  $[\text{кг} \cdot \text{сут} \cdot \text{мг}^{-1}]$ . Данная величина характеризует увеличение угрозы здоровью в результате ежедневного поступления канцерогена в количестве 1 мг, отнесенного к 1 кг массы тела человека.*

При решении задач, в которых рассматривается *поступление токсиканта с воздухом, питьевой водой или продуктами питания*, среднесуточное его поступление  $m$ , отнесенное к 1 кг массы тела

человека ( $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ ), рассчитывается по формуле:

$$m = \frac{C \cdot V \cdot f \cdot T_p}{P \cdot T}, \quad (5.2)$$

где  $C$  – концентрация токсиканта (*при ингаляционном поступлении* – в воздухе  $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$ , *с питьевой водой* – в воде  $\text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$ , *при алиментарном поступлении* – в исследуемом продукте,  $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ );

$V$  – величина поступления (*при ингаляционном поступлении* – объем воздуха, поступающего в легкие ежедневно  $V = 20 \text{ м}^3 \cdot \text{сут}^{-1}$ ; *при поступлении с водой* – объем поступающей воды –  $V = 20 \text{ л} \cdot \text{сут}^{-1}$ ; *при алиментарном поступлении* – масса рассматриваемого продукта, потребляемая человеком в сутки;

$f$  – количество дней в году, в течение которых происходит воздействие загрязнителя;

$T_p$  – количество лет, в течение которых на протяжении  $f$  дней происходит воздействие загрязнителя;

$P$  – средняя масса тела взрослого человека, принимаемая равной 70 кг;

$T$  – усредненное время воздействия токсиканта (или средняя продолжительность возможного воздействия загрязнителя за время жизни человека), принимаемое равным 30 годам (10 950 сут).

$T$  – принимается равным 25 570 сут.

В случае воздействия нескольких канцерогенов полный риск рассчитывается как сумма отдельных рисков:

$$r_{\Sigma} = r_1 + r_2 + \dots + r_n. \quad (5.3)$$

Применяется следующая шкала оценки рисков воздействия:

- при  $r < 10^{-6}$  индивидуальный канцерогенный риск воздействия рассматриваемого токсиканта считается *пренебрежимо малым*;
- в диапазоне  $10^{-6} < r < 10^{-4}$  индивидуальный канцерогенный риск воздействия считается *приемлемым*;
- при  $r > 10^{-4}$  риск воздействия *недопустим*.

## 5.2 Задание для выполнения лабораторной работы

В организм в течение  $f$  дней на протяжении  $T$  лет поступает с вдыхаемым воздухом вещество  $A$  с концентрацией  $C_A$  ( $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$ ), с питьевой водой – вещество  $B$  с концентрацией  $C_B$  ( $\text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$ ) и с продуктом

питания  $P$  вещество  $D$  с концентрацией  $C_D$  ( $\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ ) (таблица 5.1).  
 Рассчитать риск от поступления каждого из веществ и полный риск.

Таблица 5.1 – Исходные данные для выполнения работы

Основные параметры							
Вариант	1	2	3	4	5	6	7
$T$ , лет	1	2	1	1	3	1	1
$A$	трихлор-этилен	трихлор-этилен	свинец	свинец	ДДТ	ДДТ	ДДТ
$C_A, \text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$	0,0001	0,00003	0,0001	0,0003	0,0003	0,001	0,003
$B$	трихлор-этилен	трихлор-этилен	свинец	свинец	ДДТ	ДДТ	ДДТ
$C_B, \text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$	0,03	0,01	0,0005	0,0009	0,25	0,75	0,5
$P$	картофель	молоко	молоко	овощи	молоко	картофель	молоко
$D$	трихлор-этилен	трихлор-этилен	свинец	свинец	ДДТ	ДДТ	ДДТ
$C_D, \text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$	0,02	0,01	0,0002	0,0004	0,15	0,6	0,3
Вариант	8	9	10	11	12	13	14
$T$ , лет	1	1	2	1	3	1	1
$A$	кадмий	кадмий	кадмий	тетрахлор-этилен	тетрахлор-этилен	тетрахлор-этилен	бенз(а)-пирен
$C_A, \text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$	0,0001	0,0002	0,00006	0,001	0,0004	0,001	0,001
$B$	кадмий	кадмий	кадмий	тетрахлор-этилен	тетрахлор-этилен	тетрахлор-этилен	бенз(а)-пирен
$C_B, \text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$	0,2	0,4	0,3	0,2	0,3	0,4	0,01
$P$	овощи	молоко	мясо	овощи	овощи	мясо	хлеб
$D$	кадмий	кадмий	кадмий	тетрахлор-этилен	тетрахлор-этилен	тетрахлор-этилен	бенз(а)-пирен
$C_D, \text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$	1	0,5	0,6	1	0,4	0,3	0,02
Вариант	15	16	17	18	19	20	
$T$ , лет	1	1	1	1	3	1	
$A$	бенз(а)пирен	бенз(а)пирен	диоксины	диоксины	диоксины	диоксины	
$C_A, \text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$	0,003	0,0005	1e-07	3e-07	1e-08	3e-07	
$B$	бенз(а)пирен	бенз(а)пирен	диоксины	диоксины	диоксины	диоксины	
$C_B, \text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$	0,015	0,005	2e-05	3e-05	2e-06	1e-05	
$P$	хлеб	хлеб	молоко	овощи	картофель	мясо	
$D$	бенз(а)пирен	бенз(а)пирен	диоксины	диоксины	диоксины	диоксины	
$C_D, \text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$	0,025	0,01	3e-06	8e-06	9e-07	2e-06	

2. Определить, какая концентрация загрязнителя  $Z$  может поступить в организм с воздухом, питьевой водой или продуктом питания в течение года, не вызывая отрицательных последствий для здоровья

(таблица 5.2). Принять приемлемый риск равным  $10^{-5}$ .

Таблица 5.2 – Исходные данные для выполнения работы

Вариант	1	2	3	4	5
Z	Винилхлорид	Дихлорэтан	ДДТ	Выхлопные газы	Бенз(а)пирен
поступление	с воздухом	с воздухом	с воздухом	с воздухом	с воздухом
Вариант	6	7	8	9	10
Z	Бензол	Кадмий	Мышьяк	Бенз(а)пирен	ДДТ
поступление	с картофелем	с питьевой водой	с молоком	с питьевой водой	с питьевой водой
Вариант	11	12	13	14	15
Z	Бенз(а)пирен	Мышьяк	Кадмий	Диоксины	Мышьяк
поступление	с молоком	с хлебом	с картофелем	с молоком	с овощами

## Литература

1. Дорожко, С.В. Защита населения и объектов в чрезвычайных ситуациях. Радиационная безопасность: пособие : в 3 ч. Ч. 3. Радиационная безопасность / С.В. Дорожко, В.П. Бубнов, В.Т. Пустовит. – Минск: Дикта, 2010. – 312 с.

2. Саечников, В.А. Основы радиационной безопасности: учеб. пособие / В.А. Саечников, В.М. Зеленкевич. – Минск : БГУ, 2002. – 183 с.

3. Асаенок, И.С. Радиационная безопасность [Электронный ресурс] : учебное пособие / И.С. Асаенок, А.И. Навоша. – Минск, 2004. – Режим доступа: [http://www.bsuir.by/rn/12100229\\_1\\_65341.pdf](http://www.bsuir.by/rn/12100229_1_65341.pdf). – Загл. с экрана.

## Приложение А (обязательное)

### Коэффициенты для расчета категории устойчивости атмосферы и шероховатости поверхности

Таблица А1 – Коэффициенты, используемые для расчета поперечной дисперсии струи  $\sigma_y(x)$

Категория по Пасквиллу	c3	Категория по Пасквиллу	c3	Категория по Пасквиллу	c3
А	0,22	С	0,11	Е	0,06
В	0,16	D	0,08	F	0,04

Таблица А2 – Коэффициенты в функции  $g(x)$ , используемой для расчета вертикальной дисперсии струи  $\sigma$

Категория по Пасквиллу	a1	b1	a2	b2
А	0,112	1,06	5,38e-4	0,815
В	0,130	0,950	6,52e-4	0,750
С	0,112	0,920	9,05e-4	0,718
D	0,098	0,889	1,35e-3	0,688
Е	0,0609	0,895	1,96e-3	0,684
F	0,0638	0,783	1,36e-3	0,672

Таблица А3 – Коэффициенты функции  $f(z_0, x)$ , модифицирующие  $\sigma$  для различной высоты шероховатости  $z_0$

Высота шероховатости $z_0$ , см	c1	d1	c2	d2
1	1,56	0,0480	6,25e-4	0,45
4	2,02	0,0269	7,76e-4	0,37
10	2,73	0	0	0
40	5,16	-0,098	5,38e-2	0,225
100	7,37	-0,00957	2,33e-4	0,60
400	11,7	-0,128	2,18e-5	0,78

*Производственно-практическое издание*

**Дворник Александр Михайлович,  
Аверин Виктор Сергеевич,  
Гулаков Андрей Владимирович**

**Защита населения и объектов  
от ионизирующего излучения**

Практическое пособие

Редактор *В. И. Шкредова*  
Корректор *В. В. Калугина*

Подписано в печать 15.02.2017. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,3.  
Уч.-изд. л. 2,5. Тираж 25 экз. Заказ 180.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
Изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013.  
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.  
Ул. Советская, 104, 246019, г. Гомель.

**А. М. Дворник, В. С. Аверин, А. В. Гулаков**

**Защита населения и объектов  
от ионизирующего излучения**

Гомель

40

2017

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ