

**Министерство образования Республики Беларусь**  
**Учреждение образования "Гомельский государственный**  
**университет им. Ф. Скорины"**

А.Н. Переволоцкий

## **РАДИОЭКОЛОГИЯ**

**ПРАКТИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО**  
**по выполнению лабораторных работ**  
**для студентов специальности 1-31 01 01-02 "Биология**  
**(научно-производственная деятельность)"**

Гомель  
УО "ГГУ им. Ф. Скорины"  
2012

УДК 502:628.4.047(075.8)

ББК 28.080.1я73

П27

Рецензенты:

Ю.М. Жученко, профессор, доктор биол. наук, профессор кафедры химии биологического факультета УО ГГУ им. Ф. Скорины

Н.И. Булко, канд. с.-х. наук, заведующий лабораторией проблем почвоведения и реабилитации антропогенно нарушенных лесных экосистем ГНУ "Институт леса НАН Беларуси"

Рекомендовано к изданию на заседании научно-методического совета учреждения образования "Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины"

Переволоцкий, А.Н.

П 27 Радиоэкология: практическое руководство для выполнения лабораторных работ для студентов специальности 1-31 01 01-02 "Биология (научно-педагогическая деятельность)" / А.Н. Переволоцкий; М-во образования РБ, Учреждение образования Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины. – Гомель, УО ГГУ им. Ф. Скорины, 2012. – 42 с.

Практическое пособие включает 7 занятий, посвященных изучению радиоэкологии, включая основные понятия по радиоактивности, источникам и путям распространения радионуклидов в окружающей среде, закономерностям миграции радионуклидов в почве, накоплению растениями и животными, особенностям миграции радионуклидов в зооценозах и оценке рисков радиационного воздействия на человеческий организм. Каждому занятию предшествуют основные теоретические сведения по теме, отражающие основные закономерности и расчетные формулы для выполнения работы.

Адресовано студентам биологического факультета.

**УДК 502:628.4.047(075.8)**

**ББК 28.080.1я73**

© Переволоцкий А.Н., 2012

© УО "ГГУ им.Ф.Скорины", 2012

## Содержание

Введение .....	4
Лабораторная работа №1 – Виды радиоактивных превращений .....	5
Лабораторная работа №2 – Дозовые единицы и их измерения .....	11
Лабораторная работа №3 – Пути распространения естественные и искусственные радионуклидов .....	15
Лабораторная работа №4 – Закономерности миграции радионуклидов в почве .....	22
Лабораторная работа №5 – Закономерности накопления радионуклидов растениями.....	26
Лабораторная работа №6 – Закономерности миграции радионуклидов в зооценозе .....	32
Лабораторная работа №7 – Основы радиационной экологии человека .....	37
Литература .....	40

## **Введение**

Радиоэкология – это область экологии, изучающая закономерности распределения в окружающей среде естественных и искусственных радионуклидов, миграции их между компонентами экосистем, накоплению и распределению в живых организмах. Важнейшая составляющая современной радиоэкологии – определение уровней поступления радионуклидов в организм человека с оценкой риска последствий радиационного воздействия на здоровье. Радиоэкология сформировалась на основе достижений современной биологии, ядерной физики, экологии, геохимии, метеорологии.

Объект изучения радиоэкологии – косная и биотическая компоненты биогеоценозов.

Предмет изучения – выяснение качественных и количественных закономерностей поступления и миграции естественных и искусственных радионуклидов между отдельными компонентами биогеоценозов.

На современном этапе развития радиоэкологии главными задачами являются изучение источников и путей распространения радиоактивных изотопов в природной среде, процессов миграции в биогеоценозах и выяснения роли живых существ различных таксонометрических групп в круговороте радионуклидов, моделирование и прогнозирование распределения радиоактивных изотопов между компонентами экосистем, изучения вида и характера сочетаний ионизирующих факторов среды, влияющих на жизненные процессы биоты, обоснование и установление допустимых уровней радиоактивного загрязнения продукции биогеоценозов для использования человеком.

Настоящий лабораторный практикум охватывает основные сферы радиоэкологии и позволяет сформировать представление о основных закономерностях миграции радионуклидов в окружающей среде, накоплении живыми организмами и наиболее вероятных дозовых нагрузках на представителей биоты и человека.

Пособие предназначено для проведения лабораторных занятий по дисциплине "Радиоэкология" для студентов, обучающихся по специальности 1-31 01 01-02 "Биология (научно-педагогическая деятельность)".

## Лабораторная работа № 1 – Виды радиоактивных превращений

*Цель работы – изучить основные виды радиоактивных превращений.*

**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, характеризующий 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. Единица измерения – беккерель (Бк, Вк); 1 Бк = 1 распад в секунду. Внесистемная единица - кюри (Ки), 1 Ки =  $3.7 \cdot 10^{10}$  Бк, 1 Бк =  $2.7 \cdot 10^{-11}$  Ки

Активность радионуклида и его масса связаны соотношением:

$$A_c = \frac{1.16 \cdot 10^{20}}{A \cdot T} , \quad (1)$$

где  $A$  – массовое число радионуклида,

$T$  – период полураспада, часы,

$A_c$  – активность 1 г (Бк).

**Закон радиоактивного распада** : количество распадов в единицу времени постоянно, изменение количества ядер радионуклида во времени подчиняется экспоненциальной зависимости:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} , \quad (2)$$

где  $N_0$  – исходное количество ядер;

$N_t$  – количество нераспавшихся ядер за время  $t$ ,

$e = 2.72$  – основание натурального логарифма;

$\lambda$  – постоянная распада, отражает долю ядер распавшихся за время  $t$ .

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

$$\text{Связаны соотношением } \lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} , \quad T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (3)$$

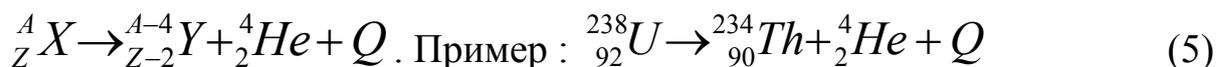
Формула закона радиоактивного распада позволяет определить через какое время активность радионуклида может быть снижена в  $k$  раз:

$$t = \ln(k) \cdot T_{1/2} / \ln(2) \quad (4)$$

### **Виды и свойства радиоактивных превращений**

К радиоактивным превращениям ядер относятся  $\alpha$ -распад,  $\beta$ -превращения,  $\gamma$ -излучение, спонтанное деление, одно- и двухпротонную радиоактивность. В радиологических исследованиях, чаще всего, рассматривают первые четыре вида превращений.

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



Краткие свойства  $\alpha$ -превращений:

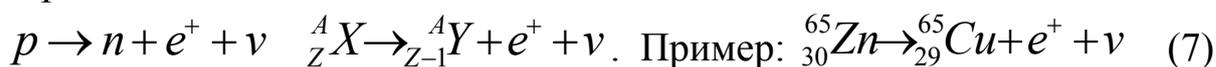
- энергия  $\alpha$ -частиц колеблется в пределах 2-11 МэВ<sup>1</sup> (каждому  $\alpha$ -излучателю свойственен свой диапазон энергии излучения);
- относится к корпускулярному, непосредственно ионизирующему излучению;
- $\alpha$ -частицы распространяются практически прямолинейно, обладают способностью ионизации среды, но относительно малым пробегом;
- свойственен тяжелым радиоактивным элементам с зарядом  $> 83$ , а также радиоизотопам редкоземельных элементов (от  ${}^{142}_{58} Ce$  до  ${}^{158}_{71} Lu$ ).

**$\beta$ -превращения** – радиоактивные превращения ядер, связанные с трансформацией протонов или нейтронов:

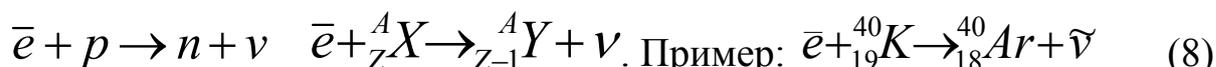
- **электронный распад** или  $\beta^-$ -распад, для ядер с избытком нейтронов с превращением одного из них в протон с испусканием электрона и антинейтрино:



- **позитронный** или  $\beta^+$ -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 и характеризуется захватом электрона К-оболочки и превращается в нейтрон:



<sup>1</sup> В ядерной физике энергию частиц выражают в электронвольтах [эВ]. Электронвольт – энергия, которую приобретает электрон, проходящий в электрическом поле с разностью потенциалов в 1 В.

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  $\beta$ -частиц в спектре равна  $\frac{1}{3}$  их максимальной энергии;

- скорость распространения достигает скорости света;
- относится к корпускулярному, непосредственно ионизирующему излучению;

- траектория  $\beta$ -частицы имеет вид изломанной кривой;

- 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 после  $\alpha$ - и  $\beta$ -превращений при избыток энергии материнского ядра (рисунок 1).

- $\gamma$ -кванты лишены массы покоя и заряда;

- скорость распространения в вакууме равняется скорости света;

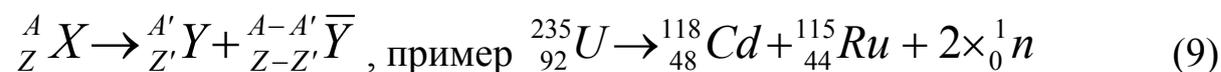
- энергия до 3 МэВ;

- 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 радиоактивные распады. Спонтанное деление характеризуются малой вероятностью – в 1 г чистого  $^{235}\text{U}$  – происходит 40 делений, а в 1 г  $^{238}\text{U}$  – 3 деления. Концентрация образованных радионуклидов пренебрежимо мала.

Деление тяжелых ядер с нечетным массовым числом :



Пример:

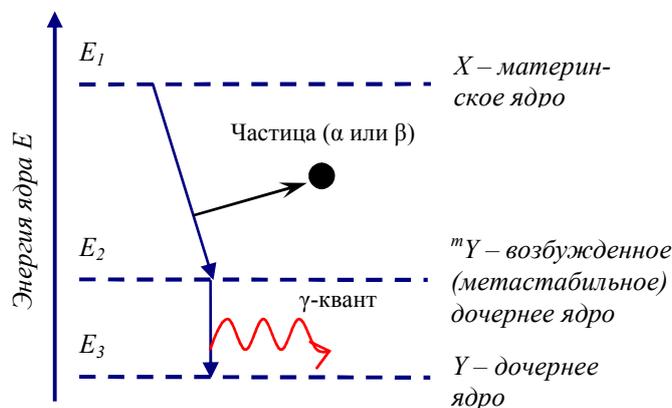
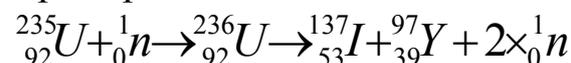
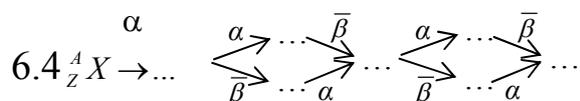
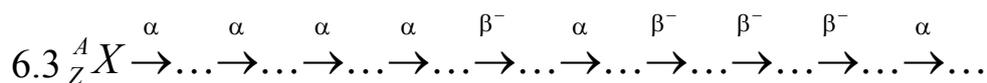
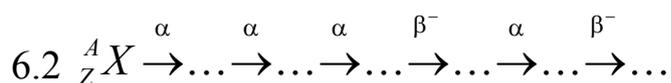
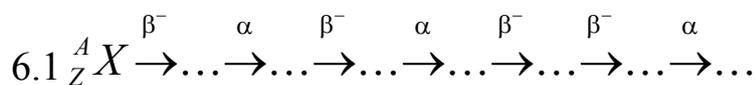


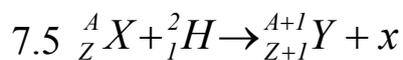
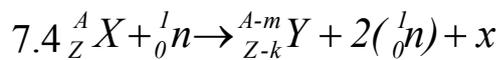
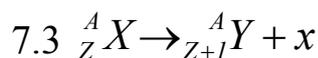
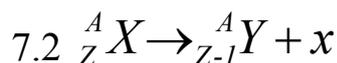
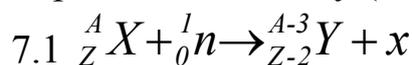
Рисунок 1 - Образование  $\gamma$ -квантов

### Задание по лабораторной 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  $^{226}_{88}\text{Ra}$  имеет активность 1 Ки, какая масса радионуклида X имеет такую же активность? (использовать данные таблицы 2)
4. Поверхностная активность радионуклида X в почве составляет A Ки/км<sup>2</sup>. Определить через какое время активность снизится в k раз.
5. Поверхностная активность радионуклида  $^{137}_{55}\text{Cs}$  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:



### Варианты заданий

Таблица 1 – Варианты к заданию 1

	вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	$^{137}\text{Cs}$	$^{134}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{144}\text{Ce}$	$^{106}\text{Ru}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{238}\text{U}$	$^{138}\text{La}$	$^3\text{H}$	$^{14}\text{C}$	$^{253}\text{Cf}$	$^{249}\text{Cm}$
$T_{1/2}$	30.1 2 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 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 3 – Варианты к заданию 4

	вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	1.7	2.8	8	2	2.2	3	12	11	7	15	11	10
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 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>

Таблица 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 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	$^{154}_{71}\text{Lu}$	$^{152}_{69}\text{Tm}$	$^{153}_{69}\text{Tm}$	$^{160}_{74}\text{W}$	$^{157}_{72}\text{Hf}$	$^{154}_{70}\text{Yb}$
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	$^{63}_{31}\text{Ga}$	$^{63}_{30}\text{Zn}$	$^{63}_{29}\text{Cu}$	$^{62}_{27}\text{Co}$	$^{62}_{26}\text{Fe}$	$^{62}_{25}\text{Mn}$
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	$^{90}_{36}\text{Kr}$	$^{90}_{37}\text{Rb}$	$^{90}_{38}\text{Sr}$	$^{90}_{39}\text{Y}$	$^{90}_{40}\text{Zr}$	$^{131}_{50}\text{Sn}$
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	$^{144}_{56}\text{Ba}$	$^{91}_{38}\text{Sr}$	$^{95}_{37}\text{Rb}$	$^{90}_{35}\text{Br}$	$^{143}_{55}\text{Cs}$	$^{94}_{36}\text{Kr}$
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	$^{63}_{29}\text{Cu}$	$^{63}_{28}\text{Ni}$	$^{132}_{54}\text{Xe}$	$^{63}_{26}\text{Fe}$	$^{63}_{25}\text{Mn}$	$^{65}_{33}\text{As}$
		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	$^{159}_{74}\text{W}$	$^{172}_{78}\text{Pt}$	$^{169}_{76}\text{Os}$	$^{166}_{74}\text{W}$	$^{178}_{80}\text{Hg}$	$^{173}_{77}\text{Ir}$
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	$^{62}_{24}\text{Cr}$	$^{65}_{33}\text{As}$	$^{65}_{32}\text{Ge}$	$^{65}_{31}\text{Ga}$	$^{65}_{30}\text{Zn}$	$^{65}_{29}\text{Cu}$
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	$^{131}_{51}\text{Sb}$	$^{131}_{52}\text{Te}$	$^{131}_{53}\text{I}$	$^{131}_{54}\text{Xe}$	$^{131}_{55}\text{Cs}$	$^{131}_{56}\text{Ba}$
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	$^{105}_{43}\text{Tc}$	$^{95}_{36}\text{Kr}$	$^{96}_{39}\text{Y}$	$^{72}_{30}\text{Zn}$	$^{93}_{37}\text{Rb}$	$^{90}_{36}\text{Kr}$
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	$^{134}_{54}\text{Xe}$	$^{66}_{34}\text{Se}$	$^{66}_{33}\text{As}$	$^{66}_{32}\text{Ge}$	$^{66}_{31}\text{Ga}$	$^{63}_{29}\text{Cu}$

### Контрольные вопросы:

1. Дайте определение радиоактивности.
2. Что такое радиоактивный распад ?
3. В чем разница между радиоактивным элементом, радионуклидом и радиоактивными изотопами?
4. Что такое активность ?
5. Как выражается закон радиоактивного распада? Что такое постоянная распада и период полураспада?
6. Какие виды радиоактивных превращений Вы знаете ?
7. Охарактеризуйте  $\alpha$ -распад.
8. Охарактеризуйте  $\beta$ -превращения.
9. Что такое  $\gamma$ -излучение?
10. Что такое спонтанное деление тяжелых ядер ?

## Лабораторная работа № 2. Дозовые единицы и их измерения

**Цель работы** – изучить основные дозовые характеристики, расчет экспозиционной дозы от точечного источника, работу с дозиметрами ДРГ-01Т.

**Доза** – это доля энергии радиоактивного излучения, которая тратится на ионизацию окружающей среды или биологического объекта.

**Экспозиционная доза** - характеризует степень ионизации сухого воздуха при нормальных условиях ( $t = 18^\circ\text{C}$  и давлении 760 мм рт. ст.).

Строгое определение **экспозиционной дозы** – это количественная характеристика фотонного излучения, которая основана на его ионизирующем действии в сухом атмосферном воздухе и представляет собой отношение суммарного заряда  $dQ$  всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой  $dm$ , полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в указанном объеме.

Понятие экспозиционной дозы рекомендовано для фотонного излучения с энергией до 3 МэВ.

Системной единицей экспозиционной дозы в СИ - Кл/кг. Один Кл/кг равен экспозиционной дозе, при которой все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в объеме воздуха массой 1 кг, производят ионы, несущие электрический заряд 1 Кл каждого знака.

Внесистемное единицей экспозиционной дозы является *Рентген* (Р). При 1 Р в  $1\text{ см}^3$  воздуха ионизирующим излучением образуется  $\sim 2 \cdot 10^9$  пар ионов. Более часто используются производные единицы (мкР, мР). Однако, экспозиционная доза не отражает степень поглощения энергии ионизирующего излучения облучаемым веществом.

**Поглощенная доза** ионизирующего излучения – доля энергии ионизирующего излучения, поглощаемая в единице массы облучаемого вещества.

Строгое определение **поглощенной дозы ионизирующего излучения**  $D$  - это отношение средней энергии  $dW$ , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе  $dm$  вещества в этом объеме:  $D = dW/dm$ .

Под переданной энергией следует понимать разность суммарной энергии всех частиц, входящих в объем облучаемого вещества и суммарной энергии всех частиц, покидающих рассматриваемый объем.

**Системная единица поглощенной дозы** - *грей* (Гр) - поглощенная доза, соответствующая передаче облучаемому веществу массой 1 кг энергии 1

Дж любого вида ионизирующего излучения. внесистемная единица – *рад*,  
1 рад = 0.01 Гр.

Для количественной оценки биологических последствий облучения вводят коэффициент **относительной биологической эффективности (ОБЭ) или коэффициент качества излучения** – численный коэффициент, равный отношению поглощенной дозы образцового излучения  $D_0$ , вызывающего определенный биологический эффект, к дозе рассматриваемого излучения  $D$ , вызывающего тот же эффект:

$$ОБЭ = D_0/D \quad (11)$$

В качестве образцового  $D_0$  принято рентгеновское излучение с энергией квантов менее 200 кэВ. Для рентгеновского,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений принимают  $ОБЭ = 1$ , протонного и нейтронного – от 3 до 10,  $\alpha$ -излучения с энергией менее 10 МэВ – 20.

**Эквивалентная доза  $D_{экв}$** , равная произведению поглощенной дозы излучения в биологической ткани на коэффициент качества данного вида излучения в облучаемом элементе биологической ткани стандартного состава:

$$D_{экв} = ОБЭ \cdot D \quad (12)$$

За системную единицу эквивалентной дозы облучения принят *Зиверт* (Зв), внесистемную – бэр. При этом 100 бэр = 1 Зв.

1 Зв – это эквивалентная доза любого вида излучения, поглощенная в 1 кг биологической ткани и создающая такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 Гр фотонного излучения.

**Доза эффективная (Е)** – величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты:

$$E = \sum_T W_T \times H_T, \quad (13)$$

где  $E$  – эффективная доза облучения, Зв;

$H_T$  – эквивалентная доза в органе или ткани  $T$ , Зв;

$w_T$  – весовой множитель для ткани  $T$ . Например, для половых желез  $w_T = 0.25$ , для молочной железы – 0.15, для красного костного мозга – 0.12.

Для измерения дозовых показателей применяются специальные приборы – дозиметры. Обычно они отражают **мощность дозы** – изменение дозы ионизирующего излучения  $dMD$  за единицу времени  $dt$ .

В этом случае доза (поглощенная, экспозиционная или эквивалентная) выражается как интеграл мощности дозы по времени или как произведение мощности дозы на время нахождения в поле  $\gamma$ -излучения.

**Мощность экспозиционной дозы**  $\gamma$ -излучения находится в прямой зависимости от активности радионуклида и энергии квантов, а обратно пропорционально квадрату расстояния от детектора до источника излучения:

$$MD = \frac{\Gamma_{\delta} \cdot A}{R^2}, \quad (15)$$

где  $\Gamma_{\delta}$  - гамма-постоянная для радионуклида (таблица 7),  $\text{Р} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}$ ;

$A$  – активность, Бк;

$R$  – расстояние от детектора до источника излучения, см.

### Измерение мощности дозы $\gamma$ -излучения дозиметром ДРГ-01Т

Дозиметр ДРГ-01Т предназначен для измерений мощности экспозиционной и мощности экспозиционной доз внешнего  $\gamma$ -излучения при проведении мероприятий радиоэкологического мониторинга. Он состоит из блока детектирования, формирования импульсов, счетного устройства и устройства управления.

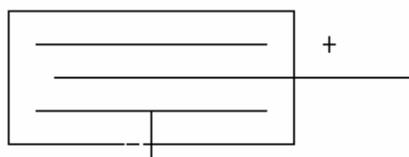


Рисунок 2 - Принципиальная схема газоразрядного счетчика



Рисунок 3 - Лицевая панель дозиметра

В составе блока детектирования имеется газоразрядный счетчик. В основе работы газоразрядного счетчика находится свойство гамма-излучения ионизировать среду, в которой оно распространяется. Газоразрядный счетчик представляет (рисунок 23) собой герметичный стеклянный цилиндр, заполненный инертным газом - аргоном или неоном. Давление внутри составляет 0.1-0.05 атм. Внутренние стенки выложены проводящим слоем и на них подается отрицательное напряжение. Центральный электрод - положительный. Разность потенциалов составляет 150-300 В. При прохождении  $\gamma$ -кванта происходит ионизация атомов газа, положительные ионы двигаются к аноду - отрицательно заряженному электроду, отрицательные к катоду - положительно заряженному электроду. Таким образом, в цепи возникает импульс электрического тока, который регистрируется счетным устройством. В его состав входят программно-управляемые

микросхемы и тактовый генератор. С их помощью проводится регистрация количества поступивших импульсов за заданное время измерения (20 с) и вычисляется мощность экспозиционной дозы с выводом значений на жидкокристаллический индикатор.

Выполнение работы с дозиметром ДРГ-01Т (рисунок 3):

1. Включить дозиметр в положение "мР/ч".
2. Перевести в положение "контр". При высвечивании на индикаторе цифры 0513 дозиметр готов к работе.
3. Нажать клавишу "сброс" для обнуления значений на индикаторе и измерения гамма-фона в помещении. Повторить измерение 3 раза в помещении, на расстоянии 0.5 м, 0.2 м и на поверхности источника излучения. Записать полученные значения.

### Задание по лабораторной работе:

Рассчитать мощность экспозиционной дозы в воздухе, величину экспозиционной дозы за 10 часов облучения на расстоянии 1, 10 и 100 см. Перевести полученные результаты в показатели поглощенной дозы. Исходные данные по величине гамма-постоянной и активности радионуклида взять из таблицы 7.

Таблица 7 – Исходные данные для выполнения лабораторной работы

Вариант задания	1	2	3	4	5	6
Радионуклид	$^{137}\text{Cs}$	$^{134}\text{Cs}$	$^{131}\text{I}$	$^{40}\text{K}$	$^{54}\text{Mn}$	$^{56}\text{Co}$
$\Gamma_{\delta}, \text{P}\cdot\text{см}^2\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{Бк}^{-1}$	8.75E-08	2.36E-07	5.82E-08	2.09E-08	2.29E-07	4.83E-07
А, Бк	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Вариант задания	7	8	9	10	11	12
Радионуклид	$^{137}\text{Cs}$	$^{134}\text{Cs}$	$^{131}\text{I}$	$^{60}\text{Co}$	$^{65}\text{Zn}$	$^{226}\text{Ra}$
$\Gamma_{\delta}, \text{P}\cdot\text{см}^2\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{Бк}^{-1}$	8.75E-08	2.36E-07	5.82E-08	3.47E-07	8.26E-08	2.44E-07
А, Бк	3000	3000	3000	10000	10000	10000

### Контрольные вопросы по работе:

1. Что такое доза излучения ?
2. Дайте определение экспозиционной дозе. В каких единицах она измеряется ?
3. Поглощенная доза, определение и основные единицы.
5. Для чего вводится понятие "относительной биологической эффективности" излучения ?
6. Что такое эквивалентная доза ?
7. Для каких целей применяется понятие эффективная доза ?

### Лабораторная работа № 3. Пути распространения естественных и искусственных радионуклидов

**Цель работы** – изучить источники естественного и искусственного ионизирующего излучения, пути распространения радионуклидов в окружающей среде, методы прогнозирования радиологической обстановки.

Естественное радиоактивное излучение на планете определяется двумя факторами:

- космическим (от энергии, передаваемой в окружающую среду от излучения из космоса и образуемых при этом радионуклидов);
- земным (от рассеянных в земной коре, воздухе, почве, воде и др. объектах естественных радионуклидов).

Земной источник ионизирующей радиации определяет как внешнее, так и внутреннее облучение биоты. Космический – преимущественно, внешнее.

Космическое излучение условно делится на два вида:

- первичное, состоящее из протонов,  $\alpha$ -частиц, ядер и квантов электромагнитного излучения, поступающих в атмосферу Земли из космического пространства. По источникам оно делится на галактическое и солнечное;
- вторичное - состоящее из элементарных частиц с различными характеристиками, нуклонов и квантов электромагнитного излучения, которое образуется в результате взаимодействия первичного космического излучения с атомами химических элементов, входящими в состав атмосферы.

**Природными (естественными) радионуклидами (ЕРН)** называются все радиоактивные изотопы, встречающиеся в природе и не созданные в процессе технологической деятельности человека.

Естественные радионуклиды условно можно разделить на две группы:

1) *естественные радиоактивные изотопы* стабильных химических элементов из середины периодической системы элементов Менделеева, характеризующиеся относительно большим периодом полураспада (до  $10^{20}$  лет) и не входящие в состав радиоактивных семейств -  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{138}\text{La}$ ,  $^{144}\text{Nd}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{113}\text{Cd}$ ;

2) *естественные радиоактивные химические элементы*:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{235}\text{U}$ . Их ядра претерпевают ряд последовательных  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов, что приводит к образованию целого ряда радионуклидов расположенные в периодической системе элементов Менделеева от 92 до 82 атомного номера с периодом полураспада от долей секунды до миллиардов лет.

Ряд генетически связанных радионуклидов, образованных от некоторого исходного называется **семейством**, каждое из них подразделяется на

подсемейства, объединяющие радионуклиды в которых сохраняется радиоактивное равновесие.

Основные подсемейства рядов:

Для уран-радиевого ряда выделяется 5 подсемейств:

$^{238}\text{U}$ - $^{234}\text{U}$ ;  $^{230}\text{Th}$ ;  $^{226}\text{Ra}$ ;  $^{222}\text{Rn}$  –  $^{214}\text{Po}$ ;  $^{210}\text{Pb}$ - $^{210}\text{Po}$ .

Для семейства тория

$^{232}\text{Th}$ ;  $^{228}\text{Ra}$  –  $^{224}\text{Ra}$ ;  $^{220}\text{Rn}$  –  $^{208}\text{Tl}$ .

Внешнее  $\gamma$ -излучение от естественных радионуклидов определяются, главным образом, радионуклидами, содержащимися в почве. При удельной активности в почве 1 Бк/кг ЕРН создают мощность экспозиционной дозы в воздухе на высоте 1 м :  $^{40}\text{K}$  – 0.043 мкР/ч, радионуклиды семейства  $^{238}\text{U}$  – 0.43, радионуклиды семейства  $^{232}\text{Th}$  – 0.66. При среднемировых удельных активностях  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  равных 370, 24 и 24 Бк/кг соответственно, **величина мощности поглощенной дозы в воздухе на высоте 1 м составит  $4.85 \pm 1.1 \times 10^{-8}$  Гр/ч (4.85 мкР/ч) или 0.5 мГр/год.** Количественная характеристика внешнего  $\gamma$ -излучения, обусловленная присутствующими в окружающей среде ЕРН называется **естественным радиоактивным фоном**. К указанной величине мощности поглощенной дозы следует примерно  $3 \times 10^{-8}$  Гр/ч (3 мкР/ч), обусловленной космическим излучением. На территории Республики Беларусь мощность поглощенной дозы по внешнему  $\gamma$ -излучению на высоте 1 м до аварии на ЧАЭС составляла  $4-13 \times 10^{-2}$  мкГр/ч (приблизительно 4-13 мкР/ч).

**Распределение естественных радионуклидов** на планете подвержено определенным закономерностям:

- с увеличением глубины в грунте содержание ЕРН возрастет;
- в изверженных породах концентрация ЕРН в 2-3 раза выше по сравнению с осадочными, а по сравнению с органогенными в 10 раз выше;
- концентрации ЕРН в материнской породе определяет содержание в почве и биоте;
- почвы по величине концентрации ЕРН образуют ряд: органогенные < песчаные < супесчаные < серозем < суглинки и глины < черноземы;
- всем биологическим объектам свойственно накопление ЕРН, однако, чем древнее вид по эволюционной лестнице и проще его организация, тем больше накопление ЕРН;
- в водных организмах накопление ЕРН всегда больше по сравнению с сухопутными;
- в водной среде максимально накапливают плавающие растение, далее полупогруженные, прикрепленные ко дну, береговые;
- величина накопления ЕРН водными видами тем меньше, чем больше минерализация воды.

Образование *искусственных радионуклидов* определяется применением **реакции деления** ядер с нечетным массовым числом ( $^{233, 235}\text{U}$ ,  $^{239, 241}\text{Pu}$  и др.).

При этом происходит образование:

- *продуктов реакции деления* – ядер химических элементов из середины таблицы Менделеева. Образуются непосредственно в результате деления ядра с нечетным массовым числом, обладают избытком одного из вида нуклонов (нейтронов или протонов) и поэтому претерпевают  $\beta$ -распады. Наиболее характерные представители  $^{137}\text{Cs}$  – ( $T_{1/2} = 30.2$  лет,  $\beta$ - и  $\gamma$ - излучатель),  $^{90}\text{Sr}$  – ( $T_{1/2} = 28.1$  года,  $\beta$ -излучатель),  $^{131}\text{I}$  – ( $T_{1/2} = 8.04$  суток,  $\beta$ - и  $\gamma$ - излучатель)  $^{144}\text{Ce}$  – ( $T_{1/2} = 284$  суток,  $\beta$ - и  $\gamma$ - излучатель),  $^{106}\text{Ru}$  – ( $T_{1/2} = 368$  суток,  $\beta$ - и  $\gamma$ - излучатель);

- *продуктов активации* – образуются вследствие захвата ядрами стабильных химических элементов нейтронов, вылетающих из разделившегося ядра при реакции деления. Наиболее характерные представители  $^{55}\text{Fe}$  – ( $T_{1/2} = 2.6$  года,  $\beta$ - и  $\gamma$ - излучатель),  $^{60}\text{Co}$  – ( $T_{1/2} = 5.27$  года,  $\beta$ - и  $\gamma$ - излучатель),  $^{54}\text{Mn}$  – ( $T_{1/2} = 312$  суток,  $\beta$ - и  $\gamma$ - излучатель);

- *трансурановые элементы* – образуются вследствие захвата нейтронов ядрами урана или плутония неспособных к делению. Наиболее характерные представители  $^{239}\text{Pu}$  – ( $T_{1/2} = 24100$  года,  $\alpha$ - и  $\beta$ - излучатель),  $^{241}\text{Am}$  – ( $T_{1/2} = 431$  года,  $\alpha$ - и  $\beta$ - излучатель).

Выделяют **четыре основных пути** распространения радионуклидов:

*Атмосферный путь* определяет собой очень эффективное и быстрое (равное скорости ветрового переноса) распространение радионуклидов в окружающей среде в локальном, региональном и глобальном масштабах.

*Водный путь миграции* по физическим законам распространения аналогичен атмосферному, однако, распространение идет медленнее, происходит поглощение радионуклидов взвешенным веществом и гидробионтами. По этим причинам, в водной среде скорость очищения выше, чем в воздушной.

*Почвенный путь миграции.* Определяется конвективным влагопереносом радионуклидов с почвенной влагой и диффузией свободных и адсорбированных ионов. Его относят к самому медленному виду перемещения загрязнителей в окружающей среде, с периодом сопоставимым со скоростью радиоактивного распада, хотя уровни загрязнения в месте поступления радионуклидов могут быть очень высоки.

*Биогенный путь миграции.* Имеет место за счет вовлечения радионуклидов животными и растениями в процессы жизнедеятельности с последующим выводом в окружающую среду в трансформированном состоянии.

Для прогнозирования распространения радионуклидов в атмосфере применяются *гауссовы модели рассеивания*, которые являются наиболее простыми, эффективными и относительно точными. *Исходными данными для прогнозирования* радиоактивного загрязнения атмосферы являются активность, высота, продолжительность выброса, скорость ветра, состояние атмосферы и шероховатость земной поверхности (минимальна – над снежной равниной, максимальна – над пересеченной местностью).

В результате прогнозирования рассчитывается параметр метеорологического разбавления  $G$  (отражает кратность разбавления начальной активности выброса) в точке с координатами  $x, y, z$ . Параметр метеоразбавления либо рассчитывается по специальным формулам, либо принимается для стандартизированных условий выброса. Исходя из параметра метеоразбавления можно рассчитать основные характеристики радиационно-экологической обстановки на территории, где происходит распространения облака радиоактивных выпадений.

Интегральная объемная активность  $A_v$  ( $\text{Бк} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3}$ ), для точки с координатами  $(x, y, z)$  рассчитывается по формуле :

$$A_v = Q \cdot G, \quad (16)$$

где  $Q$  – общая величина выброса, Бк;

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

Величина плотности загрязнения почвы  $A_s$  ( $\text{Бк} \cdot \text{м}^{-2}$ ):

$$A_s = A_v \cdot v_g, \quad (17)$$

где  $v_g$  – скорость осаждения радионуклидов из атмосферы, как правило, находится в диапазоне от 0.001 до 0.01 м/с.

Исходя из *объемной активности радионуклидов в воздухе и поверхностной активности радионуклида в почве* рассчитывается целый ряд *дозовых характеристик*:

- *внешнего облучения при нахождении внутри облака радиоактивных выбросов  $D_v$  (Зв)*, рассчитывается отдельно по  $\beta$ - и  $\gamma$ - излучению по формуле:

$$D_v = A_v \cdot K_v, \quad (18)$$

где  $K_v$  – дозовый коэффициент внешнего облучения при погружении в облако радиоактивных газов ( $\text{Зв} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}$ ). При оценке дозы от  $\beta$ -излучения применяются коэффициент  $K_{v\beta}$ , от  $\gamma$ -излучения -  $K_{v\gamma}$ .

- *мощности эквивалентной дозы в воздухе  $H_s$  ( $\text{Зв} \cdot \text{ч}^{-1}$ ) от поверхности почвы*:

$$H_s = A_s \cdot K_{s\gamma}, \quad (19)$$

где  $K_{s\gamma}$  – дозовый коэффициент,  $\text{Зв} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}$ ,

$A_s$  – плотность загрязнения почвы,  $\text{Бк} \cdot \text{м}^{-2}$ .

- эквивалентной дозы  $D_S(t)$  (Зв) за время, прошедшее с момента поступления радионуклида на поверхность почвы ( $t$ ):

$$D_S(t) = H_s [1 - \exp(-\lambda_{eff} \cdot t)] \cdot \lambda_{eff}^{-1}, \quad (20)$$

где  $t$  – время, с момента выпадений;

$\lambda_{eff}$  – постоянная распада вследствие радиоактивного распада и вертикальной миграции радионуклида в глубинные слои почвы. При консервативных расчетах соответствует периоду полураспада рассматриваемого радионуклида.

### Контрольные вопросы по работе

1. Какими факторами определяется естественное радиоактивное излучение ?
2. Что такое космические излучение ?
3. Что такое природные естественные радионуклиды и на какие группы они делятся ? Назовите типичных представителей ЕРН.
4. Что такое семейство радионуклидов ?
5. Какими радионуклидами обусловлен естественный радиоактивный фон ?
6. Какие закономерности распределения естественных радионуклидов Вы знаете ?
7. Какие группы искусственных радионуклидов Вы знаете ?
8. Какие основные пути распространения радионуклидов ?

### Задание по лабораторной работе:

- 1) Рассчитать мощность экспозиционной дозы на высоте 1 м от поверхности почвы при различной удельной активности естественных радионуклидов в почве (таблица 8).

Таблица 8 – Варианты к заданию 1

Радионуклид	Вариант											
	Удельная активность, Бк·кг <sup>-1</sup>											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<sup>40</sup> K	50	100	200	300	370	700	600	700	1000	1200	1200	1000
<sup>238</sup> U	4	8	15	17	25	50	40	50	100	1200	2000	2500
<sup>232</sup> Th	4	5	12	14	24	50	1200	2200	70	150	200	150

Примечание: 1 и 2 – болота, 3 и 4 – типичные значения для условий Беларуси, 5 – среднемировые значения, 6 – глинистые почвы Витебской области, 7 и 8 – монацитовые пески Гуарапари (Бразилия), 9-12 – почвы урановых провинций

2) С использованием данных о величине выброса (таблица 9), параметров метеорологического разбавления (таблица 10) рассчитать для различных расстояний  $r$  от источника выброса (500, 1500, 5000, 15000 и 30000 м):

- объемную активность радионуклидов в воздухе;
- поверхностную активность радионуклидов в почве;
- дозовые показатели на различном расстоянии от источника выброса:

а) эквивалентную дозу от внешнего  $\gamma$ -излучения за время существования облака;

б) эквивалентную дозу от внешнего  $\beta$ -излучения за время существования облака;

в) мощность эквивалентной дозы от внешнего  $\gamma$ -излучения от поверхности почвы;

г) эквивалентную дозу от внешнего  $\gamma$ -излучения от поверхности почвы за первый год после выброса.

Величины дозовых коэффициентов для расчета дозы внешнего облучения при погружении в облако и от поверхности почвы приведены в таблице 11.

Скорость осаждения  $v_g = 0.001$  м/с.

Дозу внешнего облучения от поверхности почвы  $D^{ext}$  рассчитать за первый год после аварийных выбросов,  $t$  принять равным 8760 часов.  $\lambda_{эфф}$  для  $^{137}\text{Cs}$  принять  $2.62\text{E-}06$  ч $^{-1}$ .

Результаты расчета свести в таблицу 12.

Таблица 9 – Активность выброса  $Q$

	вариант задания											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	$^{137}\text{Cs}$											
Q	1E+14	1E+14	1E+13	1E+13	1E+15	1E+15	1E+12	1E+12	1E+16	1E+14	1E+16	1E+16
	$^{90}\text{Sr}$											
Q	1E+12	1E+12	1E+11	1E+11	1E+12	1E+12	1E+10	1E+10	1E+14	1E+12	1E+13	1E+13

Таблица 10 – Величины параметра метеоразбавления  $G$  на различном расстоянии от источника выбросов

Вариант задания	Расстояние до АЭС, м						
	500	1000	1500	2000	5000	10000	30000
четные	2.91E-05	7.87E-06	3.69E-06	2.18E-06	4.50E-07	1.55E-07	3.61E-08
нечетные	1.72E-05	4.87E-06	2.34E-06	1.41E-06	3.08E-07	1.11E-07	2.85E-08

Таблица 11 – Дозовые коэффициенты

	$T_{1/2}$	Дозовые коэффициенты,		
		$K_{v\beta}$	$K_{v\gamma}$	$K_{s\gamma}$
		$\text{Зв}\cdot\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{Бк}^{-1}$		$\text{Зв}\cdot\text{м}^3\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{Бк}^{-1}$
$^{90}\text{Sr}$	28.2 года	9.57E-15	-	-
$^{137}\text{Cs}$	30.1 года	1.32E-14	3.82e-14	1.05e-12

Таблица 12 – Результаты расчетов по выполнению лабораторной работы

Рас- стоя- ние, м	Фактор метео- разбав- ления $G, \text{с}\cdot\text{м}^{-3}$	Объем- ная ак- тив- ность $A_v$ $\text{Бк}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-3}$	Поверх- ностная активность в почве $A_s, \text{Бк}\cdot\text{м}^{-2}$	Дозовые характеристики				
				$D_{v\beta},$ (Зв)	$D_{v\gamma},$ (Зв)	$H_s,$ (Зв·ч <sup>-1</sup> )	$D^{\text{ext}}(t)$ за 1 год, (Зв)	$\Sigma(D_{v\beta}+$ $D_{v\gamma}+$ $D^{\text{ext}}(t))$
г								

Определить, каким дозовым показателем определяется основная часть дозы.

Сделать выводы по выполненной работе. В выводах отразить:

а) насколько отличается рассчитанная величина мощности эквивалентной дозы от мощности дозы обусловленной естественными источниками излучения ( $4\text{E}-08 \text{Зв}\cdot\text{ч}^{-1}$ );

б) сравнить величину поверхностной активности по  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  с аналогичным показателем для глобальных радиоактивных выпадений 2000 и  $1000 \text{Бк}\cdot\text{м}^{-2}$ , соответственно;

в) превысит ли рассчитанная доза допустимую для растений ( $10 \text{мЗв}\cdot\text{сут}^{-1}$ ) и для животных ( $1 \text{мЗв}\cdot\text{сут}^{-1}$ );

г) сравнить рассчитанную дозу с допустимым уровнем хронического облучения для человека при котором необходимо введение защитных мероприятий (от 0.005 до 0.05 Зв за первый год после аварийного загрязнения), эвакуации (свыше 0.05 Зв за первый год).

## Лабораторная работа № 4 – Закономерности миграции радионуклидов в почвах

**Цель работы** – изучить общую схему поведения и основные закономерности миграции радионуклидов в почвах

*Миграцией радионуклидов в почвах* называется процесс их пространственно-временного перемещения, приводящий к изменению концентрации радионуклидов в отдельных почвенных слоях.

Нахождение радионуклидов в почвенной влаге и их совместное перемещением приводят к постоянным химическим реакциям с минеральными и органическими веществами, входящими в состав твердой и жидкой фаз почвы. При этом возможно образование химических соединений радионуклидов, имеющих различную энергию связи и различную степень подвижности в почве. Как правило, максимальная подвижность свойственна растворимым в воде органо-минеральным соединениям радионуклидов, а минимальная – необменно сорбированным твердой фазой почвы радионуклидам и включенным в состав кристаллической решетки почвообразующих минералов.

В качестве основных механизмов миграции рассматривают диффузию, конвективный влагоперенос, миграцию на коллоидных частицах – лессиваж, перенос по корневым системам, роющая деятельность животных и хозяйственная деятельность человека. Однако наиболее значимыми считаются первые два механизма миграции.

*Диффузия.* Часть радионуклидов в виде свободных ионов почвенного раствора и сорбированных твердой фазой почвы по ионообменному механизму мигрируют в направлении градиента активности (направление изменения активности от большего значения к меньшему) в результате диффузии. Этот вид миграции радионуклидов приводит к выравниванию концентрации радионуклида по почвенному профилю с течением времени

*Конвективный влагоперенос* – миграция радионуклидов с почвенной влагой.

Интенсивность миграции радионуклидов в почвах находится в прямой зависимости от степени их увлажнения, интенсивности и продолжительности атмосферных осадков, кислотности почвенного раствора, а в обратной – от размера почвообразующих частиц, суммы обменных оснований, количества органического вещества.

Исследования миграции радионуклидов в вертикальном профиле почвы проводят для определения загрязнения корнеобитаемых почвенных слоев (данная информация является исходной для оценки накопления ра-

дионуклидов растениями), а также для оценки вероятности достижения радионуклидами грунтовых вод.

Исходной информацией по миграции загрязняющих веществ в почвах служит показатель концентрации (удельной активности) радионуклидов по почвенным слоям. Для отбора проб почвы используются специальные трубчатые пробоотборники. Полученные почвенный керн делят на отдельные почвенные слои для каждого из которых определяют удельную активность  $AU_i$  и массу  $m_i$ .

Далее рассчитывают активность в относительных единицах для каждого слоя почвы по следующей формуле:

$$q_i = \frac{AU_i \times m_i}{\sum_{i=1}^n (AU_i \times m_i)}, \quad (21)$$

где  $q_i$  – активность в  $i$ -м слое почвы, отн. ед.;

$AU_i$  – удельная активность радионуклида в  $i$ -м слое почвы, Бк/кг;

$m_i$  – масса  $i$ -го слоя почвы, кг;

$n$  – число почвенных слоев.

Одним из распространенных подходов к описанию миграции радионуклидов в вертикальном профиле почвы является применение уравнения диффузии Фика, решением которого является следующая зависимость активности  $q$  от времени  $t$  и координаты по оси  $y$ :

$$q(y, t) = \frac{A \cdot e^{-\lambda \cdot t}}{\sqrt{\pi D t}} \cdot e^{\left(-\frac{y^2}{4 D t}\right)}, \quad (22)$$

где  $y$  – расстояние по нормали к плоскости раздела слоев, см;

$q$  – активность радионуклида на глубине  $y$ , отн. ед.;

$t$  – время с момента начала миграции, с;

$D$  – коэффициент диффузии,  $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ;

$\lambda$  – постоянная распада,  $\text{с}^{-1}$ .

Преимуществом использования данного уравнения является возможность упрощенного представления всей совокупности миграционных процессов радионуклидов в почвах в виде диффузионного переноса.

Для нахождения коэффициента диффузии проводят ряд последовательных математических преобразований. Прежде всего, выполняется логарифмирование уравнения (22) – находится натуральный логарифм от его обеих частей и уравнение приобретает следующий вид:

$$\ln[q(y, t)] = \ln\left(\frac{A \cdot e^{-\lambda \cdot t}}{\sqrt{\pi D t}}\right) + \left(-\frac{y^2}{4 D t}\right) \quad (23)$$

Далее производится замена параметров:

$$a = \ln\left(\frac{A \cdot e^{-\lambda \cdot t}}{\sqrt{\pi Dt}}\right), \quad (24)$$

$$b = \frac{l}{4Dt} \quad (25)$$

и замена переменных на  $z = \ln[q(y,t)]$ ,  $x = y^2$ , что приводит к линейному уравнению вида

$$z = a - bx \quad (26)$$

Расчет параметров  $a$  и  $b$  осуществляются по следующим формулам, согласно общепринятых методов нахождения параметров линейной зависимости :

$$b = \frac{\sum(x \cdot z) - \sum x \cdot \frac{\sum z}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \quad (27)$$

$$a = \frac{\sum z}{n} - b \cdot \frac{\sum x}{n} \quad (28)$$

Для того, чтобы облегчить проведение расчетов, целесообразно свести промежуточные данные в таблицу 13.

Таблица 12 – Промежуточные данные для расчета распределения активности в вертикальном профиле почвы и нахождения параметров  $a$  и  $b$

Но- мер слоя, $i$	Глу- бина отбора образ- ца $y_i$ , см	Мас- са об- раз- ца $m_i$ , кг	Удель- ная актив- ность почвенно- го образ- ца $UA_i$ , Бк·кг <sup>-1</sup>	Активность почвен- ного образца $UA_i \times m_i$		Вспомогательные величи- ны для расчета $a$ и $b$			
				в абсолют- ных едини- цах, Бк	в относи- тельных	$x_i = y_i^2$	$z_i = \ln(q_i)$	$x_i^2$	$x_i \times z_i$
1	$y_1$	$m_1$	$UA_1$	$UA_1 \times m_1$	$q_1$	$x_1$	$z_1$	$x_1^2$	$x_1 \times z_1$
2	$y_2$	$m_2$	$UA_2$	$UA_2 \times m_2$	$q_2$	$x_2$	$z_2$	$x_2^2$	$x_2 \times z_2$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
n	$y_n$	$m_n$	$UA_n$	$UA_n \times m_n$	$q_n$	$x_n$	$z_n$	$x_n^2$	$x_n \times z_n$
Суммы				$\Sigma(UA_i \times m_i)$	-	$\Sigma x_i$	$\Sigma z_i$	$\Sigma x_i^2$	$\Sigma (x_i \times z_i)$

С применением полученного коэффициента диффузии согласно уравнению (22) рассчитываются прогнозные активности радионуклида в вертикальном профиле почвы для произвольных моментов времени  $t_1, t_2 \dots t_n$ .

### Задание по лабораторной работе:

Приведено распределение удельной активности радионуклида в вертикальном профиле почвы (таблица 13) для момента времени  $t=10$  лет.

Необходимо определить :

- распределение активности в вертикальном профиле почвы в относительных единицах  $q_i$ ;
- параметры  $a$  и  $b$ , коэффициент диффузии  $D$ .

Таблица 13 – Варианты задания

Номер слоя, $i$	Глубина отбора образца $y_i$ , см	Масса образца $m_i$ , кг	Варианты					
			Удельная активность почвенного образца $UA_i$ , Бк·кг <sup>-1</sup>					
			1	2	3	4	5	6
Радионуклид			<sup>241</sup> Am	<sup>241</sup> Am	<sup>137</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs
Период полураспада, лет			431	431	30.12	30.12	30.12	30.12
1	1.5	0.06	275	180	180	1880	5650	6700
2	3.5	0.1	72	85	82	500	1120	510
3	4.5	0.11	31	44	61	230	211	112
4	5.5	0.12	17	23	28	133	75	52
5	6.5	0.13	8	12	15	75	23	18
6	7.5	0.14	5	7	11	23	5	3

Номер слоя, $i$	Глубина отбора образца $y_i$ , см	Масса образца $m_i$ , кг	Варианты					
			Удельная активность почвенного образца $UA_i$ , Бк					
			7	8	9	10	11	12
Радионуклид			<sup>90</sup> Sr	<sup>90</sup> Sr	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs
Период полураспада, лет			28.1	28.1	28.1	30.12	30.12	30.12
1	1.5	0.06	2440	2440	2000	2000	2000	1200
2	3.5	0.1	990	990	890	210	210	310
3	4.5	0.11	540	660	720	121	121	111
4	5.5	0.12	320	450	410	56	46	60
5	6.5	0.13	180	300	330	32	20	27
6	7.5	0.14	120	180	140	12	8	15

### Контрольные вопросы по работе :

- 1) Какие свойства почвы влияют на поведение в ней радионуклидов ?
- 2) Какие свойства радионуклидов определяют их поведение в почвах ?
- 3) Что такое миграция радионуклидов в почве и какие основные механизмы миграции ?
- 4) Особенности диффузионного переноса радионуклидов в почве.
- 5) Особенности конвективного влагопереноса радионуклидов в почве.

## Лабораторная работа №5 – Закономерности накопления радионуклидов растениями

**Цель работы** – изучить количественные характеристики накопления радионуклидов растениями при внекорневом и корневом путях поступления

Поступление радионуклидов в растения может происходить по двум путям: **внекорневому** (при выпадениях из атмосферы) и **корневому** (непосредственно из почвы).

Способность растений задерживать поверхностью элементов надземной фитомассы, выпадающие из атмосферы радионуклиды характеризуется коэффициентом первоначального задерживания  $K_f$  (от 0.01 для зерна хлебных злаков до 0.9 в молодых хвойных лесах):

$$K_f = \frac{A_p}{A_s}, \quad (29)$$

где  $A_p$  – активность радионуклида в фитомассе растений на  $1 \text{ м}^2$ ;

$A_s$  – активность радионуклида, поступившего на  $1 \text{ м}^2$  почвы.

Снижение удельной активности в растениях определяется их **разбавлением** в растительности за счет прироста биомассы и **прямыми потерями** вследствие удаления радиоактивных частиц с их поверхности.

Различают два варианта внекорневого загрязнения растений:

- **одноразовые радиоактивные выпадения**. Динамика удельной активности в растениях аппроксимируется следующей зависимостью :

$$UA_t = \frac{A_s}{m} K_f \cdot e^{(-\lambda_{eff} \cdot t)}, \quad (30)$$

где  $UA_t$  – удельная активность в растительности к моменту  $t$ ,  $\text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ ;

$A_s$  – плотность радиоактивных выпадений,  $\text{Бк} \cdot \text{м}^{-2}$ ;

$m$  – биомасса,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$ ;

$t$  – время, прошедшее с момента радиоактивных выпадений, сут;

$\lambda_{eff}$  – эффективная постоянная потеря ( $\lambda_{eff} = \ln(2) \cdot T_{eff}^{-1}$ , наиболее типичный диапазон значений  $T_{eff}$  для средне- и долгоживущих радионуклидов от 10 до 25 суток для сельскохозяйственных растений и до 500 суток – для сосновых лесов),  $\text{сут}^{-1}$ .

- **постоянные радиоактивные выпадения** источником которых служат испытания ядерного оружия и штатные выбросы предприятий ядерного топливного цикла. Динамика удельной активности радионуклида в растениях при осадении на почву с постоянной скоростью  $A_s = \text{const}$  за время  $t$  описывается формулой:

$$UA_t = \frac{A_s}{m} K_{nz} \cdot \frac{1 - e^{(-\lambda_{eff} \cdot t)}}{\lambda_{eff}}, \quad (31)$$

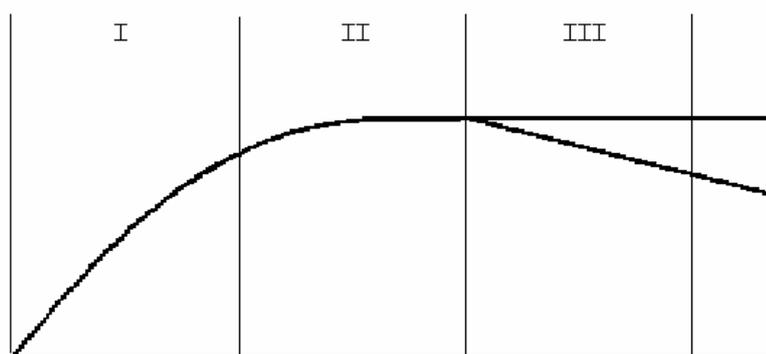
В данной формуле обозначения полностью аналогичны (30), за исключением  $A_s$ , отражающей интенсивность поступления радионуклида за единицу времени.

Корневое накопление **искусственных и большинства естественных** радионуклидов растениями происходит пропорционально содержанию в почве (**участок I рисунка 4**).

При высоких концентрациях урана и тория в почве (превышающих в десятки раз среднемировой уровень) возможно наличие **зоны насыщения** (**участок II рисунка 4**).

На территориях геохимических провинций с высоким содержанием урана и тория возможно достижение участка **токсической концентрации** (**участок III рисунка 4**).

Концентрация радионуклида в растении, отн. ед.



Концентрация радионуклида в почве,

Рисунок 4 – Зависимость удельной активности радионуклидов в растении от удельной активности в почве

Основные показатели, характеризующие корневое накопление :

Коэффициент накопления:

$$K_n = \frac{\text{Удельная активность в растении, Бк} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ (возд. сух. в - ва)}}{\text{Удельная активность в почве, Бк} \cdot \text{кг}^{-1}}, \quad (32)$$

Коэффициент накопления радионуклидов в растении имеет высокую корреляцию с коэффициентом распределения  $Kd$  (частное от деления активности радионуклида в твердой фазе почвы к активности жидкой фазе):

$$K_n = a + b \times \ln(Kd), \quad (33)$$

где,  $a$  и  $b$  - параметры регрессионного уравнения.

Для естественных экосистем, где распределение радионуклидов отличается от равномерного, применяется другой показатель.

Коэффициент пропорциональности, или коэффициент перехода ( $Tf$ ):

$$K_n(Tf) = \frac{\text{Удельная активность в растении, Бк} \cdot \text{кг}^{-1} (\text{возд. сух. в} - \text{ва})}{\text{Поверхностная активность корнеобитаемого слоя почвы, Бк} \cdot \text{м}^{-2}} \quad (34)$$

На корневое поступление радионуклидов определяющим образом влияют **агрохимические характеристики почвы**:

- с увеличением доли физической глины и ила в твердой фазе почвы повышается доля вторичных минералов, определяющих значительные емкость почвенного поглощающего комплекса и сумму обменных оснований, соответственно, повышается необменная сорбция радионуклидов и снижается их корневое поступление;

- увеличение влажности почвы определяет повышение перехода радионуклидов в растения;

- повышение кислотности почвенного раствора увеличивается биологическая доступность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , но по остальным радионуклидам зависимость носит сложный характер;

- повышение доли органического вещества в почвах определяет снижает корневое поступление радионуклидов в растения.

Для радионуклидов, поступающих по корневому пути свойственно **неравномерное распределение в растениях**: радиоактивные изотопы стронция накапливаются в надземных частях растений; цезия – распределяются равномерно; редкоземельных и трансурановых элементов – накапливаются, преимущественно, в корневых системах.

Радиоизотопы стронция накапливаются по аналогии с кальцием в составе оксалатов в клеточных стенках стареющих тканей с низкой физиологической активностью, цезия – в тканях с высокой физиологической активностью.

Параметры накопления (коэффициенты накопления и перехода) снижаются с течением времени, что связано с миграцией радионуклидов за пределы корнеобитаемого слоя и увеличением энергии связи соединений с почвенным поглощающим комплексом.

В многолетней динамике корневого поступления радионуклидов условно выделяют **два периода**, различающихся по интенсивности:

- **период интенсивного корневого накопления**, в первые вегетационные сезоны после выпадений, что обусловлено нахождением в поверхностном слое почвы, постоянным высвобождением высококомобильных форм из частиц выпадений. По этой причине биологическая доступность радионуклидов максимальна;

- **период установления квазиравновесного распределения** радионуклида в системе почва-растение, определяется установлением близкого к постоянному распределению радионуклидов между твердой и жидкой фазой почвы, поэтому переход радионуклидов в растения близок к постоянному.

Параметры накопления радионуклидов в растениях ( $K_n$  или  $K_p$ ) после прохождения максимума в период интенсивного корневого накопления хорошо аппроксимируются двухкомпонентной экспоненциальной зависимостью:

$$K(t) = A_1 \cdot e^{(-A_2 \cdot t)} + A_3 \cdot e^{(-A_4 \cdot t)}, \quad (35)$$

где  $A_1$  – максимальное значение  $K_n$  или  $K_p$ , для  $K_n$  величина безразмерная, для  $K_p$  –  $n \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ ;

$A_3$  – значение  $K_n$  или  $K_p$  в начале периода установления квазиравновесного состояния;

$A_2$  и  $A_4$  – соответственно параметры снижения  $K_n$  или  $K_p$  в период интенсивного корневого накопления и период установления квазиравновесного состояния,  $\text{лет}^{-1}$ ;

$t$  – время, лет.

### Задание по лабораторной работы

1) Определить удельную активность  $UA_t$  при известном коэффициенте первичного задерживания  $K_f$  и биомассе  $m$  при  $t = 1, 7, 30$  и  $50$  суток на различном расстоянии (500, 1500, 5000 и 30000 м) от источника выброса для одноразовых радиоактивных выпадений. Исходные данные взять в таблице 14.

Принять  $T_{\text{эфф}} = 20$  суток. Данные по поверхностной активности  $A_s$  взять из расчетов по лабораторной работе №4.

Результаты расчетов удельной активности свести в таблицу 15.

Таблица 14 – Варианты к заданию 1

Вариант	Вид растений	Радионуклид	$K_{пз}$	Биомасса, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$
1	многолетние травы	$^{137}\text{Cs}$	0.7	2
2	многолетние травы	$^{90}\text{Sr}$	0.7	2
3	зерно	$^{137}\text{Cs}$	0.02	0.3
4	зерно	$^{90}\text{Sr}$	0.02	0.3
5	листовая зелень	$^{137}\text{Cs}$	0.7	0.7
6	листовая зелень	$^{90}\text{Sr}$	0.7	0.7
7	многолетние травы	$^{137}\text{Cs}$	0.7	1
8	многолетние травы	$^{90}\text{Sr}$	0.7	1
9	ягоды черники	$^{137}\text{Cs}$	0.02	0.1
10	ягоды земляники	$^{90}\text{Sr}$	0.02	0.1
11	многолетние травы	$^{137}\text{Cs}$	1	1.5
12	многолетние травы	$^{90}\text{Sr}$	1	1.5

Таблица 15 – Результаты расчетов удельной активности на различном расстоянии и через различное время с момента выпадений

Расстояние, м	Поверхностная активность $A_s$ , Бк·м <sup>-2</sup>	Время после выпадений, сут			
		1	7	30	50

Сравнить рассчитанные удельные активности на различном расстоянии от источника выброса с допустимыми удельными активностями для первого года после аварийных радиоактивных выпадений для продуктов питания (по <sup>137</sup>Cs – 10000 Бк·кг<sup>-1</sup>, по <sup>90</sup>Sr – 1000 Бк·кг<sup>-1</sup>). Сделать выводы.

2) Определить удельную активность  $UA_t$  при известном коэффициенте первичного задерживания  $K_f$  и биомассе  $m$  на единице площади при поступлении радионуклида на поверхность почвы с постоянной скоростью  $A_s$  через 1, 7, 30 и 50 суток на различном расстоянии от источника выброса (500, 1500, 5000 и 30000 м). Исходные данные взять в таблице 14.

Принять  $T_{эфф} = 20$  суток.  $A_s$  принять равной 1 Бк·сут<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup> на расстоянии 500 м, 0.5 – на 1500 м, 0.25 – на 5000 м и 0.125 – на 5000 м.

Результаты расчетов свести в таблицу (аналогичную таблице 15).

Сделать выводы о характере изменения удельной активности в течение исследуемого времени.

Сравнить особенности радиоактивного внекорневого загрязнения для различных видов растений.

Сравнить изменения удельной активности при разовых и постоянных радиоактивных выпадениях.

3) Рассчитать удельную активность в растениях при корневом поступлении через 1, 5 и 30 лет после радиоактивных выпадений на расстоянии 500, 1500, 5000 и 30000 м от источника выпадений.

Исходные данные по параметрам зависимости коэффициента перехода от времени взять из таблицы 16, величины поверхностной активности для различных расстояний от источника выброса взять согласно расчетов, выполненных по лабораторной работе №4.

Таблица 16 – Варианты к заданию 3

Вариант	Вид растений	Радионуклид	Параметры зависимости Кп от времени			
			$A_1, (n \cdot 10^{-3}) \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$	$A_2, \text{ лет}^{-1}$	$A_3, (n \cdot 10^{-3}) \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$	$A_4, \text{ лет}^{-1}$
1	многолетние травы	$^{137}\text{Cs}$	2.5	0.33	1.45	0.032
2	многолетние травы	$^{90}\text{Sr}$	2.0	0.30	1.1	0.030
3	зерно	$^{137}\text{Cs}$	0.85	0.087	0.4	0.023
4	зерно	$^{90}\text{Sr}$	0.55	0.090	0.3	0.027
5	лиственная зелень	$^{137}\text{Cs}$	2.9	0.8	-	-
6	лиственная зелень	$^{90}\text{Sr}$	2.4	0.7	-	-
7	многолетние травы	$^{137}\text{Cs}$	12	0.3	7	0.033
8	многолетние травы	$^{90}\text{Sr}$	15	0.4	6	0.035
9	ягоды черники	$^{137}\text{Cs}$	13	0.33	6.5	0.025
10	ягоды земляники	$^{90}\text{Sr}$	25	0.04	-	-
11	многолетние травы	$^{137}\text{Cs}$	2.0	0.30	1.1	0.030
12	многолетние травы	$^{90}\text{Sr}$	2.5	0.33	1.45	0.032

### Контрольные вопросы к работе :

1. Каким показателем характеризуется внекорневое радиоактивное загрязнение растений ?
2. Какой диапазон поверхностного задерживания элементами надземной фитомассы ?
3. За счет каких факторов изменяется внекорневое загрязнение растений ?
4. В чем различия в корневом накоплении искусственных и естественных радионуклидов ?
5. Какие параметры для количественного описания накопления радионуклидов Вы знаете?
6. Как группируются радионуклиды по степени накопления растениями ?
7. Как распределяются радионуклиды в растениях ?
8. Какой вид имеет зависимость удельной активности естественных и искусственных радионуклидов в растении от удельной активности в почве?
9. Какие существуют периоды в многолетней динамике корневого накопления радионуклидов ?
10. Влияние различных факторов (свойств почв, времени нахождения в почве, вида радиоактивных выпадений) на корневое накопление радионуклидов растениями.

## Лабораторная работа №6 – Закономерности миграции радионуклидов в зооценозе

**Цель работы** – *изучить методики прогнозирования содержания радионуклидов в организме животных и оценки доз внутреннего облучения*

В организм животных радионуклиды могут поступать по следующим трем неравнозначным путям: алиментарному, ингаляционному и через поверхность кожи. Если принять для сухопутных животных ингаляционное поступление за 1, то алиментарное составит 100-1000, а через поверхности кожи – 0.01-0.001. Для водных животных алиментарный и кожный путь поступления может быть равнозначным.

Всасывание радионуклидов в ЖКТ зависит, в основном, от их физико-химических свойств. Из рациона на практически полностью усваиваются радиоактивные изотопы щелочные металлов, галогенов, С, Н, О, N, P, S, Мо, Hg. От 20 до 70% усваиваются радиоизотопы щелочноземельных элементов, теллура и полония. Менее 20% усвоение радиоизотопов алюминия, магния, ванадия, железа, цинка, мышьяка, рубидия и свинца. ~1% усваиваются уран, цирконий и ниобий, а переход редкоземельных и трансурановых элементов пренебрежимо мал.

Наиболее общей закономерностью *в соотношений поступление – выведение радионуклидов* связано с особенностями их усвоения из рациона: чем полнее и быстрее они усваиваются, тем быстрее и выводятся. Соответственно, очень быстро накапливаются и выводятся  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ . Очень медленно – радиоактивные изотопы Sr, Ce, Am, Pu, Cm, Th.

Для радиоактивных изотопов химических элементов из одной группы величина усвоение обратно пропорциональна массовому числу изотопа.

Радионуклиды по разному распределяется **между органами и тканями** в организме животных. Соответственно выделяют радионуклиды:

- с равномерным распределением: Н, С, N, P, Cl, S, щелочные;
- органотропным (I, At – щитовидная железа; Kr, Rn, Xe – легкие; Cs, Co – печень и почки),
- остеотропным (Te, Pb, U, Th, Am, Zr, щелочноземельные элементы);
- ретикуло-эндотелиальным (лантаноиды, актиноиды, Ce, Np, Pu, Cm)

Различают *однократное и хроническое поступление радионуклидов* в организм животных.

При *однократном поступлении радионуклидов* сразу после приема пищи происходит резкое увеличение их концентрации в органах и тканях организма. В дальнейшем, при отсутствии повторного поступления радионуклидов в организм, начинается их постепенное выведение.

*Хроническое поступление радионуклидов* характеризуется постоянным нахождением радиоактивных веществ в рационе. При этом происходит постоянное нарастание активности в организме, причем, наиболее интенсивно оно в первые дни после начала поступления. В последующем прирост активности замедляется и наступает состояние равновесия между поступающим и выводимым радионуклидом. Это состояние называется *динамическим равновесием*.

Для прогнозирования удельной активности радионуклидов в организме животных используют эмпирически определяемые параметры.

**При разовом поступлении радионуклида** в организм применяются *коэффициенты всасывания*. Скорость поступления радионуклидов в органы намного превышает скорость выведения, что дает основание с приемлемой для целей прогнозов точностью допустить мгновенное установление равновесия в распределении радионуклида между содержимым ЖКТ и органами. Тогда начальная концентрация  $C_0$  в органе или ткани массой  $M$  после поступления известного количества радионуклида  $A$  может быть определена как

$$C_0 = \frac{Q \cdot f_1 \cdot f_2}{M}, \quad (36)$$

где  $f_1$  – коэффициент всасывания радионуклида в кровь,

$f_2$  – коэффициент всасывания в орган или ткань на 1 кг массы.

$f_1$  находится в очень широком диапазоне: от 1 для водорода, углерода, щелочных металлов и галогенов, до тысячных долей – для редких земель и трансурановых элементов.  $f_2$  зависит от особенностей распределения радионуклида в организме. Например, для  $^{90}\text{Sr}$  коэффициент всасывания в скелет  $f_2$  может достигать 0.0006 у коров, 0.006 у свиней, 0.01 у коз, 0.04 у овец и 0.4 – у кур на 1 кг ткани от усвоения в крови.

**При хроническом поступлении радионуклида в организм животных** для прогнозной оценки содержания в органах или организме в целом применяются коэффициенты накопления или перехода, отражающие долю радионуклида перешедшую из рациона при условии установления динамического равновесия:

- коэффициент накопления или коэффициент концентрирования ( $K_n$ ):

$$UA_i = K_n \times UA_{i-1}, \quad (37)$$

где  $UA_i$  – удельная активность радионуклида в органе или организме в целом для представителя рассматриваемого звена пищевой цепочки, Бк·кг<sup>-1</sup>;

$UA_{i-1}$  – аналогичный показатель для предыдущего звена пищевой цепочки.

- коэффициент перехода  $K_p$  или Transfer Factor:

$$UA = Tf \cdot UA_p \cdot m_p, \quad (38)$$

где  $UA_p$  – удельная активность радионуклида в рационе, Бк·сут<sup>-1</sup>;  $m_p$  – масса рациона, кг;

$Tf$  – коэффициент перехода в орган или ткань, кг·кг<sup>-1</sup> для биологических тканей или кг·л<sup>-1</sup> для биологических жидкостей.

Оценка суммарного радиационного воздействия на биоту для каждого из видов излучений:

$$D = D_v + D_s + D_{int}, \quad (39)$$

где  $D_v$  – доза, обусловленная внешним излучением в облаке радиоактивного выброса, значима для  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений;

$D_s$  – доза внешнего облучения от поверхности почвы, в наибольшей степени определяется  $\gamma$ -излучением, поскольку  $\beta$ -излучение экранируется слоем воздуха и задерживается поверхностным слоем кожи;

$D_{int}$  – доза внутреннего облучения, наибольший вклад вносит  $\beta$ -излучение при условии, что размеры облучаемого органа, ткани или животного сопоставимы с пробегом частиц.

Подробно формирование доз внешнего облучения рассмотрено лабораторной работе №3.

Рассмотрим формирование доз внутреннего облучения от радионуклидов, поступивших по алиментарному пути.

Величину мощности дозы внутреннего облучения в органе (ткани) или на все тело (Гр·с<sup>-1</sup>), в наиболее общем случае, можно оценить исходя из удельной активности радионуклида и средней энергии  $\alpha$ - или  $\beta$ -излучения:

$$D_{\alpha,\beta} = UA \cdot f \cdot E_{av} \cdot 1.6 \cdot 10^{-13}, \quad (40)$$

где  $UA$  – удельная активность радионуклида в органе (ткани) или всего тела, Бк·кг<sup>-1</sup> для биологических тканей;

$f$  – выход на распад данного вида излучения, для  $\beta$ -излучения  $f=1$ ;

$E_{av}$  – средняя энергия  $\beta$ -излучения, МэВ (0.195 МэВ для <sup>137</sup>Cs и 0.18 - <sup>90</sup>Sr);

$1.6 \cdot 10^{-13}$  – коэффициент перехода от МэВ к Дж.

Эта формула справедлива при относительно равномерном распределении радионуклида в органе и ткани, а также при меньшей длине пробега частиц по сравнению с размерами исследуемого органа или ткани.

Для  $\beta$ -излучения ОБЭ=1, соответственно, величина эквивалентной и поглощенной доз численно равны между собой.

Для растений допустима доза менее 10 мГр·сут<sup>-1</sup>, для животных – 1 мГр·сут<sup>-1</sup>.

## Задание по лабораторной работе:

Рассчитать удельную активность для различных видов животных и суточную дозу внешнего и внутреннего облучения на расстоянии 500, 1500, 5000 и 30000 м от источника загрязнения при корневом загрязнении за одни сутки в первый год после аварии.

Исходные данные :

- схема миграции радионуклидов в зооценозе (рисунок 5) с величиной коэффициента перехода для растений и с средними коэффициентами накопления для смежных звеньев пищевой цепочки (таблица 16);

- поверхностная активность радионуклидов, рассчитанная согласно лабораторной работе №3 на различных расстояниях от источника выброса;

- дозы внешнего облучения, рассчитанные согласно лабораторной работы №3.

Результаты расчетов свести в таблицу 17.

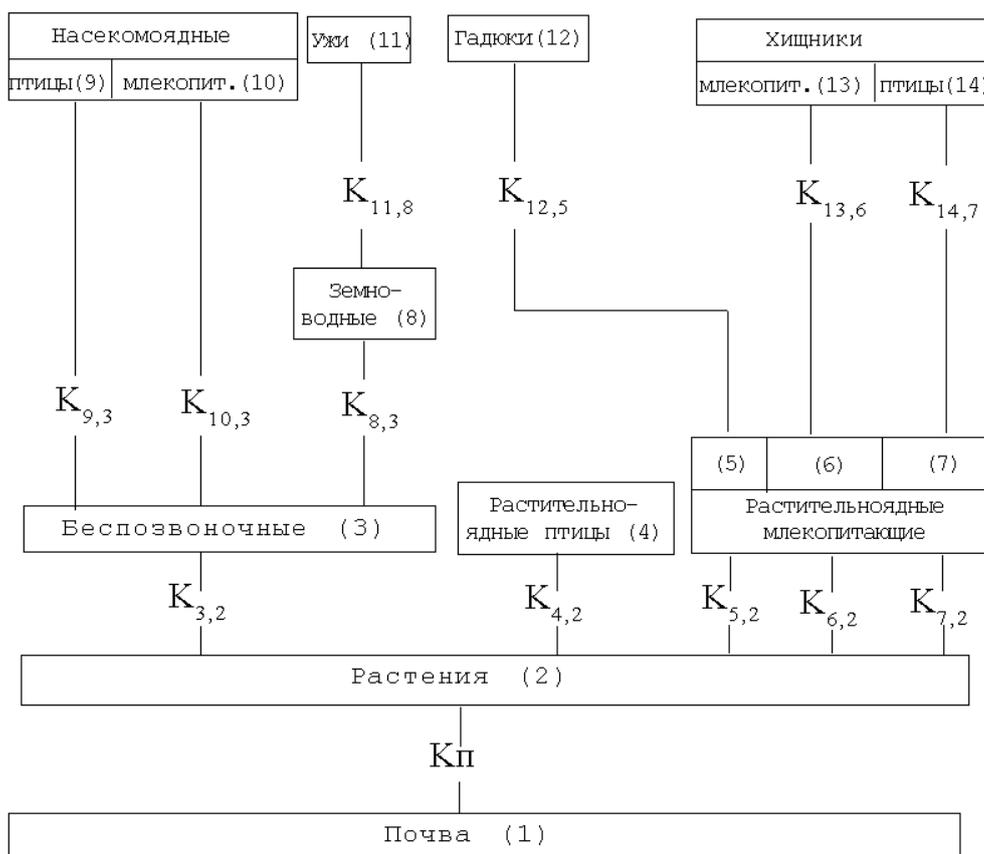


Рисунок 5 - Средние значения коэффициентов накопления для разных групп животных в сухопутном зооценозе

Примечание. Коэффициенты накопления рассчитаны относительно предыдущего звена трофической цепи.

Таблица 16 – Варианты к выполнению задания

Номер варианта	Радио-нуклид	Коэффициент перехода, $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$	Коэффициенты накопления		
1	$^{137}\text{Cs}$	$K_{\text{п}}=6 \cdot 10^{-3}$	$K_{7,2}=0.6$	$K_{14,7}=1.5$	
2	$^{90}\text{Sr}$	$K_{\text{п}}=1 \cdot 10^{-2}$	$K_{7,2}=25$	$K_{14,7}=5.5$	
3	$^{137}\text{Cs}$	$K_{\text{п}}=6 \cdot 10^{-3}$	$K_{6,2}=0.4$	$K_{13,6}=0.7$	
4	$^{90}\text{Sr}$	$K_{\text{п}}=1 \cdot 10^{-2}$	$K_{6,2}=25$	$K_{13,6}=2.9$	
5	$^{137}\text{Cs}$	$K_{\text{п}}=6 \cdot 10^{-3}$	$K_{3,2}=2$	$K_{10,3}=0.4$	
6	$^{90}\text{Sr}$	$K_{\text{п}}=1 \cdot 10^{-2}$	$K_{5,2}=0.6$	$K_{12,5}=2.1$	
7	$^{137}\text{Cs}$	$K_{\text{п}}=6 \cdot 10^{-3}$	$K_{3,2}=1.5$	$K_{8,3}=0.7$	$K_{11,8}=3.1$
8	$^{90}\text{Sr}$	$K_{\text{п}}=1 \cdot 10^{-2}$	$K_{3,2}=0.5$	$K_{10,3}=15$	
9	$^{137}\text{Cs}$	$K_{\text{п}}=6 \cdot 10^{-3}$	$K_{5,2}=25$	$K_{12,5}=11$	
10	$^{90}\text{Sr}$	$K_{\text{п}}=2 \cdot 10^{-2}$	$K_{3,2}=5$	$K_{8,3}=3$	$K_{11,8}=9$
11	$^{137}\text{Cs}$	$K_{2,1}=1 \cdot 10^{-2}$	$K_{3,2}=2$	$K_{8,3}=0.6$	$K_{11,8}=3.5$
12	$^{90}\text{Sr}$	$K_{2,1}=2 \cdot 10^{-2}$	$K_{3,2}=6$	$K_{8,3}=4$	$K_{11,8}=8$

Таблица 17 - Результаты выполнения лабораторной работы

Расстояние, м	Радиационные характеристики звеньев пищевой цепочки					
	Удельная активность, $\text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$			Дозы внутреннего облучения, $\text{Гр} \cdot \text{сут}^{-1}$		
	1 звено	2 звено	3 звено	2 звено	3 звено	4 звено
500						
1500						
5000						
30000						

### Контрольные вопросы к лабораторной работе :

1. Перечислите пути поступления радионуклидов в организм животных?
2. В чем особенность накопления радионуклидов животными сухопутного и водного зооценозов ?
3. Назовите группы радионуклидов с различной величиной всасывания в ЖКТ.
4. Какие количественные параметры для прогнозирования накопления радионуклидов в организме животных Вы знаете ?
5. Как изменяется удельная активность радионуклидов в организме животных в течение времени ?
6. Как определяется мощность внутренней поглощенной дозы для животных ?
7. Какие допустимые мощности поглощенной дозы для представителей биоты ?

## Лабораторная работа №7 – Основы радиационной экологии человека

**Цель работы** – изучить формирование доз внешнего и внутреннего облучения и оценку радиационного риска для человека

Радиационное воздействия на организм человека определяется внешним ( $D^{int}$ ) и внутренним ( $D^{ext}$ ) облучением.

$$D^{\Sigma} = D^{int} + D^{ext} \quad (41)$$

Доза внешнего облучения определяется преимущественно  $\gamma$ -излучением, вклад  $\beta$ -излучения выражен в гораздо меньшей степени и определяет воздействие на наружные покровы тела.  $\alpha$ -излучение не определяет внешнего облучения объектов биоты и человека, задерживаясь в поверхностном слое кожи или одежды. Внешнее облучение обусловлено радионуклидами, находящимися, в первую очередь, в воздухе и на поверхности почвы:

$$D^{ext} = D_S + D_V, \quad (42)$$

где  $D_S$  – доза внешнего  $\gamma$ -излучения от поверхности почвы (20), Зв;

$D_V$  – доза внешнего  $\gamma$ -излучения от радионуклидов, рассеянных 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 (деревянные дома снижают интенсивность  $\gamma$ -излучения примерно в 10 раз). Соответственно, величина дозы внутреннего облучения должна быть скорректирована:

$$D_{S'} = 0.46 \cdot D_S \quad (44)$$

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

$$D_V(t) = A_v \cdot B_{v\gamma} \cdot t, \quad (45)$$

где  $B_{v\gamma}$  – дозовый коэффициент, Зв·м<sup>3</sup>·час<sup>-1</sup>·Бк<sup>-1</sup> (таблица 18);

$A_v$  – 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 :

$$D^{int} = D_{ing} + D_{al} \quad (46)$$

При этом ингаляционная доза будет равна :

$$D_{ing}(t) = A_v \cdot B_{v\beta\gamma} \cdot V \cdot t, \quad (47)$$

где,  $B_{v\beta\gamma}$  – дозовый от ингаляции радионуклида (таблица 17), 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 18 – Дозовые коэффициенты

	T <sub>1/2</sub>	Дозовые коэффициенты,			Дозовый коэффициент при поступлении, Зв/Бк	
		$B_{\alpha\beta}$	$B_{v\gamma}$	$B_{s\gamma}$	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	1.34E-12	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 :

$$D_{al} = 365 \cdot B_{al} \cdot \sum_{i=1}^n m_i \cdot UA_i, \quad (48)$$

где,  $m_i$  – масса i-го продукта, потребляемого в сутки, кг;

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

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

Рассчитывается суммарная доза внешнего и внутреннего облучения:

$$D^{\Sigma} = D_{S'} + D_V + D_{ing} + D_{al} \quad (49)$$

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

$$r = D^{\Sigma} \cdot r_e, \quad (50)$$

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 токсиканта 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 18 – 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):

$$K = D^{\Sigma} \cdot N \quad (51)$$

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>):

$$R = K \cdot r_e \quad (52)$$

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  $\Delta$ :

$$\Delta = R \cdot \beta \quad (53)$$

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

$$\delta = \frac{\Delta}{70 \cdot N} \quad (54)$$

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

$$\Delta_u = 70 \cdot \delta \quad (55)$$

## Задание по лабораторной работе:

Рассчитать дозу внешнего облучения при проживании на территории с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$   $37000 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}$ , 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 19 – Варианты для выполнения лабораторной работы

Продукты	Суточное потребление $m_i$ , кг	Удельная активность $^{137}\text{Cs}$ $UA_i$ , $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$											
		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  $^{137}\text{Cs}$  в продуктах питания на современном этапе.

### Контрольные вопросы к лабораторной работе :

- 1) Каким излучением обусловлено внешнее облучение человека ?
- 2) Каким излучением обусловлено внутреннее облучение человека ?
- 3) Как можно ориентировочно рассчитать поступление  $^{137}\text{Cs}$  в организм человека ?
- 4) Что такое индивидуальный радиационный риск ?
- 5) Как рассчитывается индивидуальный радиационный риск ? Какая величина риска считается допустимой ?

## Литература

1. Алексахин, Р. М. Сельскохозяйственная радиозэкология / Р. М. Алексахин, А. В. Васильев, В. Г. Дикарев и др. // Под ред. Р. М. Алексахина, Н. А. Корнеева. - М.: Экология, 1992. – 400 с.
2. Гусев, Н.Г. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник / Н.Г. Гусев, В.А. Беляев. – Москва:Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
3. Романов, Г.Н. Ликвидация последствий радиационных аварий: Справочное руководство / Г.Н. Романов. – Москва:ИздАТ, 1993. – 336 с.
4. Искра, А. А. Естественные радионуклиды в биосфере / А. А.Искра, В. Г. Бахуров // М.: Энергоиздат, 1981. - 128 с.
5. Основы сельскохозяйственной радиологии / Б. С. Пристер, Н. А. Лоцилов, О. Ф. Немец, В. А. Поярков. – Киев:Урожай, 1991. – 472 с.
6. Ильенко, А.И. Экология животных в радиационном биогеоценозе / А.И. Ильенко, Т.И. Крапивко // М.:Наука, 1989. – 224 с.
7. Переволоцкий, А.Н. Радиозэкология / А.Н. Переволоцкий, А.В. Гаврилов, И.М. Булавик. – Мн.: НПООО "ПИОН", 2000. – 112 с.
8. Проблемы радиационной реабилитации загрязненных территорий / Ю.М. Жученко, С.К. Фирсакова, Н.В. Гребенщикова и др. – Гомель: РНИУП "Институт радиологии", 2004. – 112 с.
9. Лурье, А.А. Сельскохозяйственная радиология и радиозэкология / А.А. Лурье. – М.:ФГОУ ВПО РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2007. – 227 с.
10. Белозерский, Г.Н. Радиационная экология: учебник для студентов ву-зов по специальности «Экология» / Г.Н. Белозерский. – М.: Академия, 2008. – 382 с.
11. Методика разработки нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух (ДВ-2010). – Том 2 (технические приложения, рекомендации для расчетов). – М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 216 с.
12. Проведение комплексного экспедиционного радиационно-гигиенического обследования населенного пункта для оценки доз облучения населения. Методические рекомендации – М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 48 с.

*Учебное издание*

ПЕРЕВОЛОЦКИЙ Александр Николаевич

## **РАДИОЭКОЛОГИЯ**

### **Практическое руководство**

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

**Редактор В. И. Шкредова**

**Корректор В. В. Калугина**

Подписано в печать . Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офсетная. Ризография. Усл.печ.л.

Уч.-изд.л. Тираж 120 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждения образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»  
ЛИ №02330/0549481 от 14.05.2009.  
ЛИ № 02330/0150450 от 03.02.2009  
ул. Советская, 104, 246019, г. Гомель