

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

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

Радиационная безопасность

Практическое руководство

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

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2017

УДК 614.876(076)
ББК 51.26я73
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 Радиационная безопасность : практическое руководство /
А. М. Дворник, В. С. Аверин, А. В. Гулаков ; М-во образования
Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. –
Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2017. – 46 с.
ISBN 978-985-577-269-0

Практическое руководство предназначено для подготовки студентов
по вопросам безопасности жизнедеятельности человека в условиях радио-
активного загрязнения. Дается характеристика опасных и вредных факторов
ионизирующего излучения, описывается физиологическое воздействие их
на человека, основные принципы, средства и способы защиты от чрезвычай-
ных ситуаций различного характера.

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

УДК 614.876(076)
ББК 51.26я73

ISBN 978-985-577-269-0

© Дворник А. М., Аверин В. С.,
Гулаков А. В., 2017
© Учреждение образования «Гомельский
государственный университет
имени Франциска Скорины», 2017

Оглавление

Введение	4
Тема 1. Физические основы радиоактивности	6
Тема 2. Радиоэкологическая ситуация в Республике Беларусь после катастрофы на Чернобыльской АЭС	19
Тема 3. Биологические эффекты воздействия ионизирующего излучения на организм человека	30
Тема 4. Основные меры защиты населения от радиационного воздействия при авариях на атомных электростанциях	38
Литература	46

Введение

Радиоактивность – отнюдь не новое явление. Ионизирующие излучения существовали на Земле задолго до зарождения на ней жизни и присутствовали в космосе до возникновения самой Земли. Радиоактивные материалы вошли в состав Земли с самого ее рождения. Даже человек слегка радиоактивен, так как во всякой живой ткани присутствуют в следовых количествах радиоактивные вещества.

До открытия в конце 19 века рентгеновского излучения человек жил в равновесии с окружающим его радиационным фоном. Действие ионизирующей радиации на живой организм интересовало мировую науку с момента открытия и первых же шагов применения радиоактивного излучения. Это неслучайно, так как с самого начала исследователи столкнулись с его отрицательными эффектами. Так, французский ученый А. Беккерель, открывший радиоактивность, получил сильный ожог кожи от излучения радия.

Открытие в 1938 году реакции деления тяжелых ядер и возможности осуществления цепной ядерной реакции обусловило бурное развитие ядерной энергетики и широкое использование ионизирующих излучений в науке, технике и производстве, а также создание новых видов атомного оружия массового поражения. С этих пор атомная энергия использовалась как в мирных, так и в военных целях. Это создало потенциальную угрозу радиационной опасности для человека и загрязнения окружающей среды.

История многократно подтвердила реальность этой опасности. Первая атомная бомба была испытана в 1945 году в Нью-Мексико, США. В этом же году были сброшены атомные бомбы на японские города Хиросима и Нагасаки. Авария 4 июля 1961 года на первой советской атомной подлодке К-19 с баллистическими ракетами на борту привела к разгерметизации первого контура реактора и переоблучению экипажа. Далее последовали другие крупные радиационные аварии на военных объектах: атомные подводные лодки «Комсомолец», «Курск», атомоходы США. Максимум испытаний ядерного оружия в атмосфере приходится на два периода: первый – на 1954–1958 годы, когда взрывы проводили Великобритания, США и СССР, и второй, более значительный, – на 1961–1962 годы, когда их проводили в основном Соединенные Штаты и Советский Союз. Значительная радиационная катастрофа произошла в 1957 году на заводах Южного Урала, где производили атомное оружие. В 1957 году на другом военном заводе, производящем оружейный плутоний в Великобритании (Уиндскейл, ныне Селлафилд), из-за частичного расплавления активной зоны реактора в окружающую среду была выброшена огромная активность. В 1979 г. произошла авария на АЭС в Три Майл-Айленде

(Пенсильвания, США). Авария, произошедшая в 1986 году на Чернобыльской АЭС, по своим масштабам загрязнения окружающей среды и влиянию на условия жизнедеятельности миллионов людей беспрецедентна и по радиоэкологическим последствиям является глобальной катастрофой. К этому же классу глобальных катастроф относится и катастрофа на АЭС Фукусима (Япония, 2011 год). По данным МКРЗ с 1954 года по 1984 год в мире произошли 152 аварии ядерных реакторов с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду.

Авария на Чернобыльской АЭС заставила обратить самое пристальное внимание на природные системы, которые по степени аккумуляции радионуклидов и длительности дозовых нагрузок на человека следует отнести к критическим. Беларусь, как известно, является самой пострадавшей от Чернобыльской аварии страной, 25 % территории которой загрязнено радионуклидами с плотностью свыше 37 кБк/м².

Количество несчастных случаев, связанных с атомной энергетикой, значительно меньше, чем в других областях человеческой деятельности. Тем не менее радиационные аварии заставляют пересмотреть наше отношение к радиационной безопасности использования атомной энергии.

Радиационная безопасность – составная часть общей техники безопасности, обеспечивающая безопасные условия труда персонала и населения. Радиационная безопасность – совокупность технических, гигиенических и организационных мероприятий, обеспечивающих безопасные условия труда персонала и населения. Практическая значимость проблемы радиационной безопасности обусловлена также и ее стоимостью. Доля затрат на обеспечение безопасности строящихся сегодня АЭС составляет 50 % общих капиталовложений в АЭС.

Первой задачей радиационной безопасности является разработка критериев для оценки ионизирующего излучения как вредного фактора воздействия на отдельных людей, на популяцию в целом и объекты окружающей среды, способов оценки и прогнозирования радиационной обстановки. Второй немаловажной задачей радиационной безопасности является разработка систем радиационного контроля, которая позволяет осуществить снижение уровня облучения персонала и населения до регламентируемого предела на основе технических, медико-санитарных, организационных мероприятий и создание эффективных систем радиационного контроля, позволяющих оперативно регистрировать изменения в радиационной обстановке.

В данном издании рассматриваются в краткой форме основные вопросы радиационной безопасности в современных условиях.

Тема 1. Физические основы радиоактивности

- 1 Явление радиоактивности. Радионуклиды.
- 2 Закон радиоактивного распада, активность радионуклида.
- 3 Период полураспада радиоактивного вещества.
- 4 Классификация ионизирующих излучений.
- 5 Основы дозиметрии. Единицы измерения в дозиметрии.
- 6 Естественный радиационный фон.
- 7 Искусственные источники ионизирующего излучения.

1 Явление радиоактивности. Радионуклиды

С момента открытия радиации как явления прошло немногим более ста лет. Два принципиальных открытия, сделанные в конце 19 века, положили начало развитию фундаментального раздела физики, а именно, ядерной физики. И, как следствие, развитию таких наук, как радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность, дозиметрия и др.

В 1895 году Вильгельм Рентген, изучая взаимодействие катодных лучей с веществом, обнаружил новый вид излучения – X-лучи, впоследствии названные рентгеновскими лучами. Рентгеновские лучи обладают высокой проникающей способностью.

В 1896 году Анри Беккерель исследовал флуоресценцию солей урана и заметил, что они самопроизвольно испускают невидимые лучи, которые подобно рентгеновским лучам способны ионизировать среду.

В дальнейшем Мария Складовская-Кюри и Пьер Кюри установили, что свойством спонтанного излучения обладают не только соли урана, но и все его соединения, также другие элементы. Они открыли новые химические элементы торий, радий, полоний.

По предложению Марии Складовской-Кюри это явление было названо **радиоактивностью**. Химические элементы, обладающие этим свойством, называются радиоактивными элементами или радионуклидами.

Радиоактивность – это самопроизвольное превращение неустойчивых изотопов химических элементов в другие элементы (изотопы), сопровождающееся испусканием элементарных частиц, атомных ядер или жесткого электромагнитного излучения.

Открытие естественной радиоактивности дало возможность проникнуть в новый мир, и, в конечном счете, привело к представлениям о сложности структуры атома и к овладению атомной энергией.

Как известно, атом состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженной электронной оболочки и в целом электрически

нейтрален. Ядро атома составляют положительные протоны и нейтральные нейтроны. Число протонов в ядре и определяет, к какому химическому элементу относится данный атом. Ядра атомов одного и того же элемента всегда содержат одно и то же число протонов, но число нейтронов в них может быть разным. Атомы, имеющие ядра с одинаковым числом протонов, но различающиеся по числу нейтронов, относятся к разным разновидностям одного и того же химического элемента, называемым *изотопами* данного элемента. Ядра всех изотопов химических элементов образуют группу «*нуклидов*». Некоторые нуклиды стабильны, то есть в отсутствие внешнего воздействия никогда не претерпевают никаких превращений.

Большинство же нуклидов нестабильны, они все время превращаются в другие нуклиды. Нестабильным нуклидам энергетически выгодно перейти в состояние с более низкой энергией. При этом нестабильное ядро испускает излучение с энергией, равной разности энергий начального и конечного состояний ядра. При каждом таком акте распада высвобождается энергия, которая и передается дальше в виде излучения. Излучение сопровождается вылетом ионизирующих частиц различного типа.

Можно сказать, что испускание ядром частицы, состоящей из двух протонов и двух нейтронов, – это альфа-излучение; испускание электрона – это бета-излучение. Весь процесс самопроизвольного распада нестабильного нуклида называется *радиоактивным распадом*, а сам такой нуклид – *радионуклидом*. Часто нестабильный нуклид оказывается настолько возбужденным, что испускание частицы не приводит к полному снятию возбуждения; тогда он выбрасывает порцию чистой энергии, называемую гамма-излучением (гамма-квантом). При этом не происходит испускания каких-либо частиц.

Радиоактивность изотопа не зависит от того, находится ли он в чистом виде или в составе каких-либо химических соединений. Радиоактивные превращения протекают самопроизвольно. На скорость их течения не оказывают никакого воздействия изменения температуры и давления, наличие электрического и магнитного полей, вид химического соединения данного радиоактивного элемента и его агрегатное состояние. Из этого следует, что радиоактивный процесс разыгрывается в самых внутренних (глубинных) частях атома, то есть в атомном ядре.

Радиоактивный распад – это свойство самого атомного ядра и зависит только от его внутреннего состояния. Нельзя повлиять на течение процесса радиоактивного распада, не изменив состояния атомного ядра. Поэтому для данного атомного ядра, находящегося в определенном энергетическом состоянии, вероятность радиоактивного распада за единицу времени является постоянной.

2 Закон радиоактивного распада, активность радионуклида

Радиоактивный распад – явление принципиально статистическое. Нельзя предсказать, когда именно распадется данное нестабильное ядро. Естественной статистической величиной, описывающей радиоактивный распад, является вероятность λ распада ядра за единицу времени. Смысл величины λ , называемой также постоянной распада, состоит в том, что если взять большое число N одинаковых нестабильных ядер, то за единицу времени в среднем будет распадаться λN ядер. Величина λN называется *активностью*. *Активность* характеризует интенсивность излучения вещества в целом, а не отдельного ядра. В качестве единиц измерения активности используются системные и внесистемные единицы.

Старейшей является внесистемная единица кюри (Ku , Ci):

$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ распад/с}$ и ее доли милликюри ($1 \text{ мКи} = 10^{-3} \text{ Ки}$) и микрокюри ($1 \text{ мкКи} = 10^{-6} \text{ Ки}$).

В международной системе СИ единицей активности предлагается считать 1 распад в секунду. Эту единицу назвали *беккерель* ($Bк$, Bq). $1 \text{ Бк} = 1 \text{ распад/с}$, $1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$, $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$.

Существенным свойством явления радиоактивности является независимость постоянной распада λ от времени.

Сформулируем теперь основной закон радиоактивного распада. Если в момент t имеется большое число N радиоактивных ядер и если за промежуток dt распадается в среднем dN ядер, то в соответствии с определением величины λ

$$dN = -\lambda N dt. \quad (1)$$

Знак минус означает, что общее число радиоактивных ядер уменьшается в процессе распада. Вследствие того, что постоянная распада λ не зависит от времени (то есть от «возраста» ядра), это соотношение легко интегрируется. Результатом интегрирования и является основной закон радиоактивного распада, имеющий вид

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

где N – число нераспавшихся радиоактивных ядер;

N_0 – число радиоактивных ядер в произвольно выбранный начальный момент $t = 0$.

Подчеркнем, что основной закон радиоактивного распада относится к статистическим средним и справедлив лишь при достаточно большом числе частиц. Активность A является производной от N по времени, взятой с обратным знаком:

$$A = \lambda N = -dN/dt. \quad (3)$$

Через постоянную распада λ выражаются две другие величины, характеризующие интенсивность процесса радиоактивности – *период полураспада* $T_{1/2}$ и *среднее время жизни* ядра τ .

3 Период полураспада радиоактивного вещества

Время, за которое распадается в среднем половина всех радионуклидов данного типа в любом радиоактивном источнике, называется **периодом полураспада** соответствующего изотопа.

Если известно значение постоянной радиоактивного распада λ , характеризующей степень неустойчивости ядра, то можно вычислить среднюю продолжительность жизни τ радиоактивного атома. τ равно обратной величине постоянной распада λ :

$$\tau = 1/\lambda, \quad (4)$$

Периодом полураспада $T_{1/2}$ называется время, за которое число радиоактивных ядер уменьшается вдвое. Согласно формуле

$$\frac{1}{2} = \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda T_{1/2}}, \quad (5)$$

откуда

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} = 0,693\tau. \quad (6)$$

Согласно этому закону через один период полураспада от первоначальной активности радионуклида останется половина, через два периода – одна четверть, через три периода – одна восьмая часть и т. д. (рисунок 1).

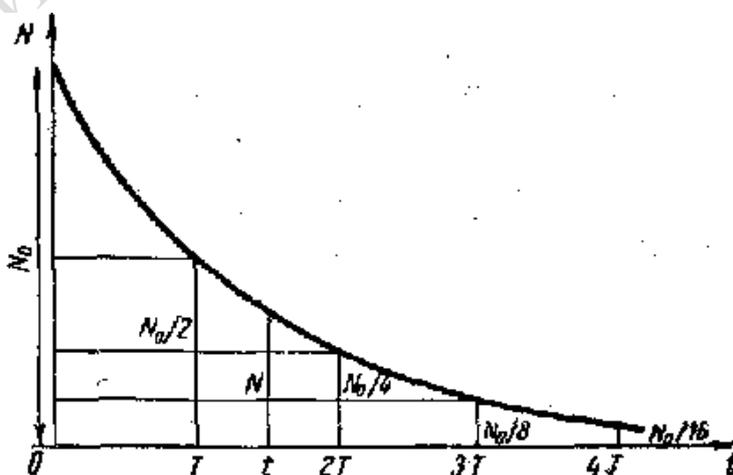


Рисунок 1 – Кривая распада радиоактивного изотопа

Активность радионуклида $A(t)$ или число атомов радиоактивного изотопа $N(t)$ уменьшается с течением времени по экспоненциальному закону (рисунок 1):

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda t) = A_0 \exp(-0,693 t/T_{1/2}); \quad (7)$$

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t) = N_0 \exp(-0,693 t/T_{1/2}). \quad (8)$$

Различные радионуклиды имеют различные периоды полураспада. В таблице 1 приведены значения периодов полураспада некоторых естественных радионуклидов.

Таблица 1 – Характеристики радионуклидов, встречающиеся в практике радиационной безопасности

Радионуклид	Символ	Период полураспада	Вид излучения
Америций 241	^{241}Am	432,8 года	$\alpha \beta \gamma$
Калий 40	^{40}K	$1,28 \cdot 10^9$ лет	$\beta \gamma$
Кобальт 60	^{60}Co	5,3 года	$\beta \gamma$
Стронций 90	^{90}Sr	28,1 года	β
Иттрий 90	^{90}Y	64,1 час	$\beta \gamma$
Йод 131	^{131}I	8,04 сут	$\beta \gamma e$
Цезий 134	^{134}Cs	2,06 года	$\beta \gamma$
Цезий 137	^{137}Cs	30,17 года	$\beta \gamma e$
Церий 144	^{144}Ce	284,3 сут	$\beta \gamma e$
Радий 226	^{226}Ra	1 600 лет	$\alpha \gamma e$
Торий 232	^{232}Th	$1,405 \cdot 10^{10}$ лет	$\alpha \beta \gamma$
Уран 238	^{238}U	$4,51 \cdot 10^9$ лет	$\alpha \gamma e$
Плутоний 239	^{239}Pu	$2,4 \cdot 10^4$ лет	α

Зная период полураспада радионуклида, можно вычислить его активность в любой момент времени после его образования. Например, необходимо определить активность ^{137}Cs через 20 лет после его выпадения с активностью 15 мКи. Используя формулу (7), можно записать

$$\begin{aligned} A(20) &= A_0 \exp(-0,693 t/T_{1/2}) = \\ &= 15 \cdot \exp(-0,693 \cdot 20/30,17) = 9,5 \text{ мКи} = 35,2 \cdot 10^7 \text{ Бк}. \end{aligned}$$

На практике часто радиоактивное загрязнение окружающей среды происходит не одним, а несколькими радионуклидами. В этом случае закон радиоактивного распада будет описываться суммой выражений (7) или (8). Например, если образец содержит два сорта радионуклидов с постоянными периодами распада λ_1 и λ_2 , то общая активность образца будет изменяться со временем по закону

$$A(t) = A'_0 \exp(-\lambda_1 t) + A''_0 \exp(-\lambda_2 t), \quad (9)$$

где A'_0 и A''_0 – активность радионуклида определенного сорта при $t = 0$.

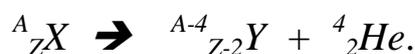
В дозиметрической практике часто пользуются величиной удельной активности, характеризующей концентрацию радионуклида. Удельная активность – общая активность радионуклида, приходящаяся на единицу длины A_l (Бк/м), площади A_s (Бк/м²), объема A_v (Бк/м³) или массы A_m (Бк/кг) в источнике. Указанные величины носят соответственно названия линейной, поверхностной, объемной и массовой удельной активности радионуклида.

4 Классификация ионизирующих излучений

При радиоактивном распаде испускаются корпускулярные частицы (α -, β^- -, β^+ -частицы, конверсионные электроны) и фотоны (γ -кванты). Распад одного радиоактивного элемента, материнского, приводит к образованию другого, дочернего радиоактивного элемента, который в свою очередь также распадается. Возникает цепочка радиоактивных превращений. Радионуклиды, которые участвуют в цепочке последовательных радиоактивных превращений, образуют радиоактивное семейство.

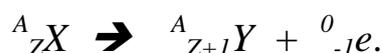
Процесс радиоактивного распада радионуклидов происходит в соответствии с законами сохранения электрического заряда и числа нуклонов (массового числа). Из этих законов сохранения вытекает *правило смещения* (установлено английским физиком Ф. Содди в 1913 г.).

Радиоактивный изотоп с атомным номером Z и массовым числом A при испускании α -частицы превращается в изотоп с атомным номером $Z-2$ и массовым числом $A-4$, то есть в результате α -распада получается изотоп другого элемента, смещенный в периодической системе на два места раньше исходного элемента. Схематически α -распад можно записать так:



Радиоактивный изотоп с атомным номером Z и массовым числом A при испускании β^- -частицы превращается в изотоп другого элемента с тем же массовым числом и атомным номером $Z+$, то есть смещается в периодической системе на одно место после исходного элемента.

Схематически β^- -распад можно записать так:



В природе существуют четыре радиоактивных семейства, родоначальниками которых считаются ${}^{238}_{92}\text{U}$, ${}^{232}_{90}\text{Th}$, ${}^{227}_{89}\text{Ac}$ (актино-уран ${}^{235}_{92}\text{U}$) и ${}^{237}_{93}\text{Np}$. Месторождения радиоактивных элементов U, Th, AcU на земной поверхности всегда сопровождаются наличием свинца, который является конечным продуктом каждого семейства.

5 Основы дозиметрии. Единицы измерения в дозиметрии

Ионизация и возбуждения атомов среды – это те эффекты, которые определяют величину воздействия излучения на биологические объекты. Степень воздействия ионизирующих излучений на живой организм зависит от мощности дозы излучения, продолжительности этого воздействия и вида излучения и сорта радионуклида.

Для определения меры действия ионизирующих излучений на вещество используют понятие дозы излучения. Различают *экспозиционную дозу, поглощенную дозу, эквивалентную дозу, эффективную эквивалентную дозу и коллективную дозу*.

Для количественной оценки ионизирующего действия рентгеновского и γ -излучения в сухом атмосферном воздухе используется понятие *экспозиционной дозы X* .

Это количественная характеристика рентгеновского и гамма-излучений, основанная на их ионизирующем действии и выраженная суммарным электрическим зарядом ионов одного знака, образованных в единице объема воздуха в условиях электронного равновесия. За единицу экспозиционной дозы принимают кулон на килограмм (Кл/кг).

Кулон на килограмм – экспозиционная доза рентгеновского и гамма-излучений, при которой в 1 кг сухого атмосферного воздуха производятся ионы, несущие заряд в 1 кулон электричества каждого знака:

$$X_{\text{эксп}} = dQ/dm.$$

Единица экспозиционной дозы в СИ – кулон на килограмм (Кл/кг).

Рентген – экспозиционная доза фотонного излучения при прохождении которого через 0,001 293 г [масса 1 см³ сухого атмосферного воздуха при нормальных условиях (0 °С; 0,1013 МПа)] воздуха в результате завершения всех ионизационных процессов в воздухе создаются ионы, несущие одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака. Отметим связь единиц: 1Р = 2,58·10⁻⁴ Кл/кг.

Экспозиционная доза в 1Р создает при нормальных условиях в 1 см³ воздуха 2,08·10⁹ пар ионов, а в 1 г воздуха 1,6·10¹² пар ионов.

Мощность дозы (мощность поглощенной дозы) P – приращение дозы в единицу времени. Она характеризует скорость накопления дозы и может увеличиваться или уменьшаться со временем. Единицей мощности поглощенной дозы является грэй в секунду или рад в секунду (Гр/с, рад/с). Аналогично, единицей мощности экспозиционной дозы является рентген в секунду (Р/с, Р/час).

Внесистемной единице 1 Р соответствует поглощенная доза 0,873 рад

в воздухе или 0,95 рад в биологической ткани. Поэтому с погрешностью до 5 % экспозиционную дозу в рентгенах и поглощенную дозу в радах можно считать совпадающими.

Эффекты воздействия однозначно связаны с поглощенной энергией излучения в веществе. Поэтому основной физической величиной, определяющей степень радиационного воздействия, является поглощенная доза ионизирующего излучения D .

Она используется для характеристики величины поглощенной энергии излучения, то есть энергии, поглощенной единицей массы облучаемого вещества. За единицу поглощенной дозы принимается джоуль на килограмм (Дж/кг) – *грей* ($Гр$, Gy). *Грей* (джоуль на килограмм) – поглощенная доза излучения, переданная массе облучаемого вещества в 1 кг и измеряемая энергией в 1 Дж любого ионизирующего излучения ($1 Гр = 1 Дж/кг$).

В радиобиологии и радиационной гигиене широкое применение получила внесистемная единица поглощенной дозы – рад. *Рад* – это такая поглощений доза, при которой количество поглощенной энергии в 1 г любого вещества составляет 100 эрг независимо от вида и энергии излучения, $1 рад = 100 эрг/г$.

Производными данной единицы являются миллирад (мрад), равный 0,001 рад, и микрорад (мкрад), равный 0,000 001 рад. Системная единица поглощенной дозы в СИ – грей (Гр); 1 Гр равен 1 Дж, поглощенному в 1 кг вещества: $1 Гр = 1 Дж/кг = 100 рад$.

Биологический эффект для разных видов ионизирующих излучений не одинаков при прочих равных условиях, в том числе при одинаковой поглощенной дозе.

Для оценки радиационной опасности излучения произвольного состава при хроническом облучении человека в малых дозах (в дозах, не превышающих пяти предельно допустимых годовых доз при облучении всего тела человека) вводится понятие эквивалентной дозы.

Эквивалентная доза ионизирующего излучения H – основная дозиметрическая величина, равная произведению поглощенной дозы D на средний коэффициент качества ионизирующего излучения $КК$ в данном объеме биологической ткани стандартного состава:

$$H = D \cdot КК.$$

Единицей эквивалентной дозы в СИ является Зиверт (Зв). Зиверт – единица эквивалентной дозы любого вида излучения в биологической ткани, которое создает такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 Гр образцового рентгеновского излучения. Иными словами, Зиверт равен эквивалентной дозе, у которой произведение поглощенной дозы в

биологической ткани стандартного состава на средний коэффициент качества равно 1 Дж/кг. Зиверт представляет собой единицу поглощенной дозы, умноженную на коэффициент, учитывающий неодинаковую радиоактивную опасность для организма разных видов ионизирующего излучения.

Внесистемная единица эквивалентной дозы – бэр. Бэр (биологический эквивалент рентгена) равен эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на средний коэффициент качества равно 100 эрг/г. Таким образом: 1 Зв = 100 бэр.

Безразмерный коэффициент качества является функцией ЛПЭ данного излучения в воде и выбирается на основе имеющихся значений коэффициента относительной биологической эффективности (ОБЭ).

Мощность эквивалентной дозы \dot{H} – отношение приращения эквивалентной дозы dH за интервал времени dt к этому интервалу времени:

$$\dot{H} = dH/dt.$$

Единица мощности эквивалентной дозы в СИ – зиверт в секунду (Зв/с). Внесистемная единица – бэр в секунду (бэр/с). На практике чаще используется микрозиверт в час (мкЗв/ч).

Если энергетический состав излучения неизвестен, рекомендуется использовать значения КК, приводимые в таблице 2.

Таблица 2 – Значения коэффициента качества k для излучений различных видов с неизвестным энергетическим составом

Вид излучения	КК (ОБЭ)
Рентгеновское и γ -излучение, электроны, позитроны	1
Нейтроны с энергией меньше 20 кэВ	3
Нейтроны с энергией 0,1–10 МэВ	10
Протоны с энергией меньше 10 МэВ	10
α -излучение с энергией меньше 10 МэВ	20
Тяжелые ядра отдачи	20

Системные и внесистемные единицы измерения, используемые в дозиметрии ионизирующих излучений приводятся в таблице 3.

Таблица 3 – Основные системные и внесистемные единицы измерения, используемые в дозиметрии ИИ

Величина и ее символы	Единица СИ		Внесистемная единица		Соотношение между единицами
	международ. обознач.	русское обозначение и название	международ. обознач.	русское обозначение и название	
1	2	3	4	5	6
Активность А	Bg	Бк – беккерель	Сi	Ки – кюри	1 Бк = 1 расп./с = = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ки;

					$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$
Поглощенная доза D	Gy	Гр – грей	rad	Рад – рад	$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж / кг} = 100 \text{ рад};$ $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр};$

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6
Эквивалентная доза H	Sv	Зв – зиверт	rem	Бэр – бэр	$1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр} / W_R =$ $1 \text{ (Дж/кг)} / W_R = 100 \text{ рад} / W_R =$ $= 100 \text{ бэр};$ $1 \text{ бэр} = 100 \text{ рад} / W_R =$ $= 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр} / W_R = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}$
Экспозиционная доза X	c/kg	Кл/кг – кулон на килограмм	R	P – рентген	$1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ P}$ $1 \text{ P} = 2,58 \cdot 10^4 \text{ Кл/кг}$

Разные органы и ткани имеют разные чувствительности к излучению. В результате для случаев неравномерного облучения разных органов или тканей тела человека было введено понятие эффективной эквивалентной дозы H_E .

Эффективная эквивалентная доза – эквивалентная доза, умноженная на коэффициент, учитывающий разную чувствительность различных тканей к облучению; она также измеряется в зивертах.

Отношение $R_T/R_E = W_T$ определяет взвешенный риск облучения данного органа по отношению к взвешенному риску облучения всего организма, то есть представляет отношение вероятности возникновения стохастических эффектов в результате облучения какого-либо органа или ткани к вероятности их возникновения при равномерном облучении всего тела. Параметр W_T называют *взвешивающим фактором* или *весовым множителем* (таблица 4). При этом $\Sigma W_T = 1$.

Таблица 4 – Взвешивающие факторы W_T радиационного риска для отдельных органов. Рекомендованы МАГАТЭ, 2011

Органы, ткани	Коэффициент
Красный костный мозг	0,12
Толстый кишечник	0,12
Желудок	0,12
Лёгкие	0,12
Гонады (половые железы)	0,2
Мочевой пузырь	0,05
Печень	0,05
Пищевод	0,05
Щитовидная железа	0,05
Кожа	0,01
Клетки костных поверхностей	0,01
Головной мозг	0,025
Сумма	1,0

Эквивалентная доза или эффективная эквивалентная доза считаются индивидуальными критериями опасности, обусловленными ионизирующим излучением. Эти величины являются индивидуальными дозами.

Для этого используется величина – эффективная коллективная доза, определяющая полное воздействие на популяцию:

$$S = \sum_{i=1}^{\infty} H_{Ei} N_i,$$

где H_{Ei} – средняя эффективная эквивалентная доза на i -ю подгруппу популяции;

N_i – число лиц в подгруппе, получивших эквивалентную дозу H_{Ei} . Единицей измерения коллективной дозы в СИ является человеко-зиверт (чел-Зв), внесистемная единица – человеко-бэр (чел-бэр).

6 Естественный радиационный фон

Избежать облучения ионизирующим излучением невозможно. Жизнь на Земле возникла и продолжает развиваться в условиях постоянного облучения. Радиационный фон Земли складывается из трех компонентов:

- космического излучения;
- излучения от рассеянных в земной коре, воздухе и других объектах внешней среды природных радионуклидов;
- излучения от искусственных (техногенных) радионуклидов.

Облучение по критерию месторасположения источников излучения делится на внешнее и внутреннее. Внешнее облучение обусловлено источниками, расположенными вне тела человека. Источниками внешнего облучения являются космическое излучение и наземные источники. Источником внутреннего облучения являются радионуклиды, находящиеся в организме человека.

Космическое излучение. Космическое излучение складывается из частиц, захваченных магнитным полем Земли, галактического космического излучения и корпускулярного излучения Солнца. В его состав входят в основном электроны, протоны и альфа-частицы. Это так называемое первичное космическое излучение, взаимодействуя с атмосферой Земли, порождает вторичное излучение. В результате на уровне моря излучение состоит почти полностью из мюонов (подавляющая часть) и нейтронов.

Поглощенная мощность дозы космического излучения в воздухе на уровне моря равна 32 нГр/час и формируется в основном мюонами. За счет космического излучения большинство населения получает дозу,

равную около 0,3 мЗв в год.

Космическому внешнему облучению подвергается вся поверхность Земли. Однако это облучение неравномерно. Интенсивность космического излучения зависит от солнечной активности, географического положения объекта и возрастает с высотой над уровнем моря. Наиболее интенсивно оно на Северном и Южном полюсах, менее интенсивно в экваториальных областях. Причина этого – магнитное поле Земли, отклоняющее заряженные частицы космического излучения.

В результате ядерных реакций, идущих в атмосфере (а частично и в литосфере) под влиянием космических лучей, образуются радиоактивные ядра – космогенные радионуклиды. В создание дозы наибольший вклад вносят ^3H , ^7Be , ^{14}C и ^{22}Na , которые поступают вместе с пищей в организм человека.

Взрослый человек потребляет с пищей 95 кг углерода в год при средней активности на единицу массы углерода 230 Бк/кг. Суммарный вклад космогенных радионуклидов в индивидуальную дозу составляет около 15 мкЗв/год.

Радионуклиды в земной коре. Естественный радиационный фон. В настоящее время на Земле сохранилось 23 долгоживущих радиоактивных элемента с периодами полураспада от 10^7 лет и выше. Физические характеристики некоторых из них представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Радиоактивные изотопы в земной коре

Радионуклид	Весовое содержание в земной коре	Период полураспада, лет	Тип распада
Уран-238	$3 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^9$	α -распад
Торий-232	$8 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	α -распад, γ -излучение
Калий-40	$3 \cdot 10^{-16}$	$1,3 \cdot 10^9$	β -распад, γ -излучение
Рубидий-87	$8,4 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{10}$	β -распад

В трех радиоактивных семействах: урана (^{238}U), тория (^{232}Th) и актиния (^{235}Ac), в процессах радиоактивного распада постоянно образуется 40 радиоактивных изотопов.

Средняя эффективная эквивалентная доза внешнего облучения, которую человек получает за год от земных источников, составляет около 0,35 мЗв, то есть чуть больше средней индивидуальной дозы, обусловленной облучением из-за космического фона на уровне моря.

Значения природного фона (мощность эквивалентной зоны) варьируют в зависимости от местности и находятся в пределах 0,05 до 0,2 мкЗв/час. В местах, где массивы гранита залегают достаточно близко к поверхности, уровни природного радиационного фона выше и составляют 0,4 мкЗв/час.

Радиационный уровень, который соответствует природному фону со-

ставляет 0,1–0,2 мкЗв/час и считается нормальным, уровень 0,2–0,6 мкЗв/час считается допустимым, а уровни более 0,6–1,2 мкЗв/час с учетом коэффициента экранирования считаются повышенными.

Внутреннее облучение от радионуклидов земного происхождения. В организме человека постоянно присутствуют радионуклиды земного происхождения, поступающие через органы дыхания и пищеварения. Наибольший вклад в формирование дозы внутреннего облучения вносят ^{40}K , ^{87}Rb и нуклиды рядов распада ^{238}U и ^{232}Th .

Средняя доза внутреннего облучения за счет радионуклидов земного происхождения составляет 1,35 мЗв/год. Наибольший вклад (около 3/4 годовой дозы) дают не имеющий вкуса и запаха тяжелый газ радон-222 и продукты его распада.

В качестве удобрений ежегодно используются несколько десятков млн. тонн фосфатов. Большинство разрабатываемых в настоящее время фосфатных месторождений содержит уран, присутствующий в довольно высокой концентрации. Содержащиеся в удобрениях радиоизотопы проникают из почвы в пищевые продукты, приводят к повышению радиоактивности молока и других продуктов питания.

Таким образом, эффективная доза от внутреннего облучения за счет естественных источников (1,35 мЗв/год) в среднем примерно в два раза превышает дозу внешнего облучения от них (0,65 мЗв/год). Следовательно, суммарная доза внешнего и внутреннего облучения от естественных источников радиации в среднем равна 2 мЗв/год. Для отдельных контингентов населения она может быть выше. Причем максимальное превышение над средним уровнем может достигать одного порядка.

7 Искусственные источники ионизирующего излучения

За последние несколько десятилетий человек создал несколько тысяч радионуклидов и начал использовать их в научных исследованиях, в технике, медицинских целях и др. Это приводит к увеличению дозы облучения, получаемой как отдельными людьми, так и населением в целом. Иногда облучение за счет источников, созданных человеком, оказывается в тысячи раз интенсивнее, чем от природных источников.

Роль различных искусственных источников излучений в создании радиационного фона иллюстрируется таблице 6.

В настоящее время основной вклад в дозу от источников, созданных человеком, вносит внешнее радиоактивное облучение при диагностике и лечении. В развитых странах на каждую тысячу населения приходится от 300 до 900 таких обследований в год, не считая массовой флюорографии

и рентгенологических обследований зубов.

Таблица 6 – Среднегодовые дозы, получаемые от естественного радиационного фона и различных искусственных источников излучения

Источник излучения	Доза, мбэр/год
Природный радиационный фон	200
Стройматериалы	140
Атомная энергетика	0,2
Медицинские исследования	140
Ядерные испытания	2,5
Полеты в самолетах	0,5
Бытовые предметы	4
Телевизоры и мониторы ЭВМ	0,1
Общая доза	500

Средняя эффективная эквивалентная доза, получаемая от всех источников облучения в медицине, в промышленно развитых странах составляет ~ 1 мЗв в год на каждого жителя, то есть примерно половину средней дозы от естественных источников.

Вопросы для самоконтроля

- 1 Кто и когда открыл явление радиоактивности?
- 2 Что такое период радиоактивного распада?
- 3 Во что превращается материнское ядро при альфа-распаде?
- 4 В каких единицах измеряется экспозиционная доза?
- 5 Что показывает коэффициент качества?
- 6 Какие источники излучения определяют радиационный фон Земли?

Тема 2. Радиозэкологическая ситуация в Республике Беларусь после катастрофы на Чернобыльской АЭС

- 1 Классификация радиационных аварий.
- 2 Оценка радиационной обстановки.
- 3 Катастрофа на Чернобыльской АЭС.
- 4 Особенности формирования радиационной обстановки.
- 5 Распределение территории Республики Беларусь по зонам радиоактивного загрязнения.

6 Внешнее и внутреннее облучение населения.

1 Классификация радиационных аварий

С 1990 года для классификации событий на АЭС применяется Международная шкала ядерных и радиологических событий (ИНЕС) (таблица 7).

В рамках шкалы события классифицируются по семи уровням: на уровнях 1–3 они называются «инцидентами», а на уровнях 4–7 – «авариями». Шкала построена таким образом, что степень серьезности события возрастает с каждым уровнем шкалы примерно в 10 раз. События, не существенные с точки зрения безопасности, называются «отклонениями» и классифицируются как случаи ниже шкалы (уровень 0).

Авария на АЭС Фукусима-1 – крупная радиационная авария (по заявлению японских официальных лиц – 7-го уровня по шкале INES), произошедшая 11 марта 2011 года в результате сильнейшего землетрясения в Японии и последовавшего за ним цунами. Землетрясение и удар цунами вывели из строя внешние средства электроснабжения и резервные дизельные электростанции, что явилось причиной неработоспособности всех систем нормального и аварийного охлаждения и привело к расплавлению активной зоны реакторов на энергоблоках 1, 2 и 3 в первые дни развития аварии.

Японская Комиссия по ядерной безопасности (NSC) повысило уровень опасности на АЭС «Фукусима-1» до максимального 7 уровня по шкале INES, после оценки выбросов радионуклидов йода-131 и цезия-137 в объёмах $1,3 \cdot 10^{17}$ Бк и $6,1 \cdot 10^{15}$ Бк, соответственно (оценка NISA). В этот же день МАГАТЭ подтвердило информацию.

Оценка была повышена исходя из количества выбросов йода-131, которое сопоставимо с 10 % от выбросов Чернобыльской аварии.

Таблица 7 – Международная шкала ядерных и радиологических событий (ИНЕС)

Уровень ИНЕС	Население и окружающая среда
Крупная авария. Уровень 7	Крупный выброс радиоактивного материала с обширными последствиями для здоровья и окружающей среды. Выброс значительной части активной зоны в количестве, эквивалентном более чем 10^{16} Бк йода-131. Чернобыль, 1986 год. АЭС Фукусима-1, Япония, 2011 год.
Серьезная авария. Уровень 6	Значительный выброс радиоактивного материала. Выброс продуктов деления, эквивалентный 10^{14} – 10^{16} Бк йода-131. Челябинск, Кыштым, Россия, 1957 год.
Авария с широкими последствиями. Уровень 5	Ограниченный выброс радиоактивного материала, который, вероятно, потребует осуществления некоторых запланированных контрмер. Выброс продуктов деления, радиологически эквивалентный 10^{14} – 10^{15} Бк йода-131. Виндскейл-Пайл, Соединенное Королевство, 1957 год.

2 Оценка радиационной обстановки

Радиационная обстановка складывается на территории административного района, населенного пункта или объекта в результате радиоактивного заражения местности и всех расположенных на ней объектов и требует принятия определенных мер защиты, исключающих или способствующих уменьшению радиационных потерь среди населения.

Оценка радиационной обстановки проводится как методом прогнозирования, так и по данным разведки (показаниям дозиметрических приборов).

Выявление радиационной обстановки по данным радиационной разведки включает сбор и обработку информации о мощностях доз облучения (уровнях радиации) и плотности радиоактивного загрязнения почвы на местности, а также нанесения зон заражения на карту.

Показатели, по которым оценивается радиационная обстановка, используется (мЗв/ч) и (кБк/м²).

Естественный дочернобыльский радиационный фон в Беларуси составлял:

- мощность эквивалентной дозы облучения 0,05–12 мЗв/ч;
- плотность радиоактивного загрязнения почвы ¹³⁷Cs составляло от 1,5 до 3,7 кБк/м².

3 Катастрофа на Чернобыльской АЭС

Катастрофа на Чернобыльской АЭС – разрушение 26 апреля 1986 года четвёртого энергоблока Чернобыльской атомной электростанции, расположенной на территории Украинской ССР (ныне – Украина). Разрушение носило взрывной характер, реактор был полностью разрушен, и в окружающую среду было выброшено большое количество радиоактивных веществ. Авария расценивается как крупнейшая в своём роде за всю историю атомной энергетики, как по предполагаемому количеству погибших и пострадавших от её последствий людей, так и по экономическому ущербу.

Основными факторами, приведшим к аварии, считаются следующие:

- несоответствие реактора нормам безопасности и наличие опасных конструктивных особенностей;
- низкое качество регламента эксплуатации в части обеспечения безопасности;
- неэффективность режима регулирования и надзора за безопасностью, общая недостаточность культуры безопасности;
- ошибки персонала и нарушение существующих инструкций и

программ испытаний.

Перед аварией в реакторе четвёртого блока находилось 180–190 т ядерного топлива (диоксида урана). По оценкам, которые в настоящее время считаются наиболее достоверными, в окружающую среду было выброшено от 5 до 30 % от этого количества.

Суммарная активность веществ, выброшенных в окружающую среду, составила, по различным оценкам, до $14 \cdot 10^{18}$ Бк (примерно $38 \cdot 10^7$ Ки), в том числе:

- 1,8 ЭБк иода-131;
- 0,085 ЭБк цезия-137;
- 0,01 ЭБк стронция-90;
- 0,003 ЭБк изотопов плутония;
- благородные газы – около половины от суммарной активности.

Загрязнению подверглось более 200 тыс. км², примерно 70 % – на территории Беларуси, России и Украины. Радиоактивные вещества распространялись в виде аэрозолей, которые постепенно осаждались на поверхность земли. Благородные газы рассеялись в атмосфере и не вносили вклада в загрязнение прилегающих к станции регионов. Загрязнение было очень неравномерным, оно зависело от направления ветра в первые дни после аварии. Наиболее сильно пострадали области, в которых в это время прошёл дождь. Большая часть стронция и плутония выпала в пределах 100 км от станции, так как они содержались в основном в более крупных частицах. Иод и цезий распространились на более широкую территорию.

4 Особенности формирования радиационной обстановки

Особенности метеорологических условий в период 26 апреля – 10 мая 1986 года, а также количество, состав и динамика аварийного выброса радиоактивных веществ обусловили сложный характер загрязнения территории республики.

Количество выброшенных радионуклидов определило уровень радиоактивного заражения территории, а их распределение – метеоусловия, состав и динамика аварийного выброса.

Пройдя через территорию Советского Союза 26–27 апреля они достигли Польши, Финляндии и Швеции (27–29 апреля) – Центральной Европы. Сильные дожди 30 апреля и 1 мая обусловили радиоактивные влажные выпадения во Франции, южной части ФРГ, Швейцарии, Австрии, Венгрии и Чехословакии. Затем загрязненные воздушные массы достигли Голландии, Великобритании, пересекли территорию Югославии, Италии и Греции. Повышение радиационного фона отмечалось так-

же в КНР, Японии, Индии, Канаде и США.

В соответствии с Законом РБ «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» территория радиоактивного загрязнения – это часть земель Республики Беларусь, на которых в результате катастрофы на ЧАЭС возникло долговременное загрязнение окружающей среды радиоактивными веществами с плотностью загрязнения радионуклидами ^{137}Cs либо ^{90}Sr или плутония-238, 239, 240, 241 соответственно 1,0; 0,15; 0,01 Ки/км² и более, а также иные территории, на которых среднегодовая эффективная эквивалентная доза облучения населения может превысить (над естественным и техногенным фоном) 1,0 мЗв (0,1 бэр) в год, и земли, на которых невозможно получение чистой продукции.

В Беларуси радиоактивному загрязнению ^{137}Cs с содержанием в почве более 37 кБк/м² подверглась территория, площадь которой составляет 46,45 тысяч квадратных километров. На ней было расположено более 3 600 населенных пунктов, в том числе 27 городов, где проживало 2,2 млн. человек, то есть свыше 1/5 всего населения Беларуси.

Согласно общепринятым данным суммарный социально-экономический ущерб Республики Беларусь от катастрофы на Чернобыльской АЭС оценивается в 235 млрд. долларов США. На преодоление последствий этой катастрофы с 1991 года республикой было направлено около 20 млрд. долларов США.

Наиболее загрязненными в результате катастрофы на ЧАЭС оказались Гомельская (1528), Могилевская (866) и Брестская области (167 населенных пунктов).

Вся площадь загрязнения в России составила 47 170 км², на Украине – 37 450 и в Беларуси – 46 450 км².

Общая площадь зон с уровнем загрязнения ^{137}Cs 15 Ки/км² и более составляет более 10 тыс. км² (около 6 400 км² в Беларуси; 2 400 км² в России; 1 500 км² в Украине). Всего на территории этой зоны (за пределами зоны отселения) расположено около 640 населенных пунктов с населением более 230 тыс. чел.

Анализ радиоактивного загрязнения территории Европы ^{137}Cs показывает, что не менее 34 % чернобыльских выпадений этого радионуклида на европейском континенте находится на территории Беларуси, а по ряду других оценок эта доля составляет около 70 %. Загрязнение территории Беларуси ^{137}Cs с плотностью свыше 37 кБк/м² составило 23 % от всей площади республики (для Украины – 5 %, России – 0,6 %). Учитывая масштабность и тяжесть последствий катастрофы на ЧАЭС, Верховный Совет Беларуси в июле 1990 года объявил территорию республики зоной экологического бедствия.

Наибольшие уровни выпадения йода-131 имели место в ближней зоне

ЧАЭС, в Брагинском, Хойникском, Наровлянском районах Гомельской области, где его содержание в почвах составило 37 000 кБк/м² и более. В Чечерском, Кормянском, Буда-Кошелевском, Добрушском районах уровни загрязнения достигали 18 500 кБк/м².

Загрязнение территории йодом-131 обусловило большие дозы облучения щитовидной железы («йодный удар»), что привело в последующем к значительному увеличению её патологии, особенно у детей. Анализ радиоактивного загрязнения цезием-137 территории Беларуси позволяет выделить несколько основных пятен. Прежде всего, это ближняя зона Чернобыльской АЭС, куда входит и 30-километровая зона вокруг самой станции.

Часть загрязнения именуется как северо-западный след. К нему относятся южная и юго-западная часть Гомельской области, центральные части Брестской, Гродненской и Минской областей.

Третье пятно находится на севере Гомельской и центральной части Могилевской областей.

Максимальный уровень загрязнения почвы ¹³⁷Cs в ближней зоне ЧАЭС обнаружен в населенном пункте Крюки Брагинского района – 59 200 кБк/м² (1600 Ки/км²), а в дальней зоне (локальное пятно на расстоянии 250 км от ЧАЭС) – в населенном пункте Чудяны Чериковского района Могилевской области – 59 000 кБк/м² (1595 Ки/км²).

Четвертое пятно зарегистрировано на территории Воложинского района Минской области, где загрязнение почвы ¹³⁷Cs в отдельных точках превышает 185 кБк/м² (5 Ки/км²).

Загрязнение территории Республики Беларусь ¹³⁷Cs в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС (на 01.01.2012 г.) показано в таблице 8.

Таблица 8 – Загрязнение территории Республики Беларусь ¹³⁷Cs (на 01.01.2012 г.)

Территория	Загрязнено		В том числе с уровнем загрязнения, тыс. км ²			
	тыс. км ²	в процентах к общей площади территории	1–5 Ки/км ²	5–15 Ки/км ²	15–40 Ки/км ²	40 и более Ки/км ²
Республика Беларусь	30,10	14,5	20,86	6,6	2,22	0,42
в т. ч. области:						
Брестская	2,37	7,23	2,3	0,07		
Витебская	0,01	0,03	0,01			
Гомельская	18,33	45,37	11,7	4,72	1,54	0,37
Гродненская	0,61	2,41	0,6	<0,01		
Минская	0,90	2,25	0,9	<0,01		
Могилевская	7,88	27,08	5,35	1,8	0,68	0,05

Загрязнение территории республики ⁹⁰Sr носит более локальный,

по сравнению с ^{137}Cs , характер.

Уровни загрязнения почвы этим радионуклидом выше $5,5 \text{ кБк/м}^2$ ($0,15 \text{ Ки/км}^2$) обнаружены на площади $21,1 \text{ тыс. км}^2$, что составило 10 % от территории республики. Максимальные уровни стронция-90 обнаружены в пределах 30-километровой зоны ЧАЭС и достигали величины $1 800 \text{ кБк/м}^2$ ($48,6 \text{ Ки/км}^2$) в Хойникском районе Гомельской области.

Загрязнение почвы изотопами $^{238}, ^{239}, ^{240}\text{Pu}$ с плотностью более $0,37 \text{ кБк/м}^2$ охватывает около $4,0 \text{ тыс. кв. км}$, или почти 2 % площади республики. Эти территории преимущественно находятся в Гомельской области (Брагинский, Наровлянский, Хойникский, Речицкий, Добрушский и Лоевский районы) и Чериковском районе Могилевской области. Загрязнение изотопами плутония с высокой плотностью характерно для 30-километровой зоны ЧАЭС. Наиболее высокие уровни наблюдаются в Хойникском районе – более 111 кБк/м^2 .

5 Распределение территории Республики Беларусь по зонам радиоактивного загрязнения

При классификации территорий и зон радиоактивного загрязнения приняты следующие критерии:

- возможность проживания населения (величина среднегодовой эффективной дозы облучения населения);
- уровень радиоактивного загрязнения территории (плотность загрязнения почв радионуклидами);
- возможность получения продукции, содержание радионуклидов в которой не превышает республиканских допустимых уровней (сельскохозяйственной, лесохозяйственной, торфа, вод и других видов продукции и сырья).

Территории в зависимости от плотности загрязнения почв радионуклидами и степени воздействия (величины эффективной дозы) радиации на население подразделяются на следующие зоны (таблица 9):

– зона эвакуации (отчуждения) – территория вокруг Чернобыльской АЭС, с которой в 1986 году в соответствии с существовавшими нормами радиационной безопасности было эвакуировано население (30-километровая зона и территория, с которой проведено дополнительное отселение в связи с плотностью загрязнения почв ^{90}Sr выше 3 Ки/км^2 и $^{238}, ^{239}, ^{240}\text{Pu}$ – выше $0,1 \text{ Ки/км}^2$);

– зона первоочередного отселения – территория с плотностью загрязнения почв ^{137}Cs от 40 Ки/км^2 , либо ^{90}Sr , или $^{238}, ^{239}, ^{240}\text{Pu}$ соответ-

ственно 3,0; 0,1 Ки/км² и более;

– зона последующего отселения – территория с плотностью загрязнения почв ¹³⁷Cs от 15 до 40 Ки/км², либо ⁹⁰Sr от 2 до 3 Ки/км², или ^{238, 239, 240}Pu от 0,05 до 0,1 Ки/км², на которых средняя годовая эффективная доза облучения населения может превысить (над естественным и техногенным фоном) 5 мЗв, и другие территории с меньшей плотностью загрязнения вышеуказанными радионуклидами, где средняя годовая эффективная доза облучения населения может превысить 5 мЗв;

– зона с правом на отселение – территория с плотностью загрязнения почв ¹³⁷Cs от 5 до 15 Ки/км² либо ⁹⁰Sr от 0,5 до 2 Ки/км² или ^{238, 239, 240}Pu от 0,02 до 0,05 Ки/км², на которых средняя годовая эффективная доза облучения населения может превысить (над естественным и техногенным фоном) 1 мЗв, и другие территории с меньшей плотностью загрязнения вышеуказанными радионуклидами, где средняя годовая эффективная доза облучения населения может превысить 1 мЗв;

– зона проживания с периодическим радиационным контролем – территория с плотностью загрязнения почв ¹³⁷Cs от 1 до 5 Ки/км² либо ⁹⁰Sr от 0,15 до 0,5 Ки/км² или ^{238, 239, 240}Pu от 0,01 до 0,02 Ки/км², где средняя годовая эффективная доза облучения населения не должна превышать 1 мЗв.

Таблица 9 – Зонирование территорий Республики Беларусь, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС

Наименование зоны	Эквивалентная доза, мЗв/год	Плотность загрязнения, кБк/м ² (Ки/км ²)		
		¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	^{238, 239, 240} Pu
Зона проживания с периодическим радиационным контролем	менее 1	37–185 (1–5)	5,55–18,5 (0,15–0,5)	0,37–0,74 (0,01–0,02)
Зона с правом на отселение	1–5	185–555 (5–15)	18,5–74 (0,5–2,0)	0,74–1,85 (0,02–0,05)
Зона последующего отселения	свыше 5	555–1480 (15–40)	74–111 (2,0–3,0)	1,85–3,7 (0,05–0,1)
Зона первоочередного отселения	–	свыше 1480 (свыше 40)	свыше 111 (свыше 3,0)	свыше 3,7 (свыше 0,1)
Зона эвакуации (отчуждения)	–	30-километровая территория вокруг ЧАЭС, с которой в 1986 году было эвакуировано население		

По состоянию на 01.02.2010 г. по отношению к площади территории республики площади загрязнения ¹³⁷Cs по зонам составили: зона проживания с периодическим радиационным контролем – 10,0 %, зона с правом на отселение – 3,2 %, зона последующего отселения – 1,1 %, зона перво-

очередного отселения – 0,2 %.

6 Внешнее и внутреннее облучение населения

Внутреннее и внешнее облучение в конкретных условиях радиоактивного загрязнения территорий могут различаться в сотни раз, при этом выше или ниже может быть и внутреннее, и внешнее облучение. В среднем примерно 2/3 эффективной эквивалентной дозы облучения, которую человек получает от естественных источников радиации, поступает от радиоактивных веществ, попавших в организм с пищей, водой и воздухом.

Главную опасность представляют радионуклиды, которые попадают различными путями в организм человека. Самым распространенным путем является пищевая цепочка. Радионуклиды из почвы переходят в кормовые растения, овощи и фрукты. В конечном счете, радиоактивная пища попадает на наш стол с молоком, мясом и пр.

Природа так распорядилась, что если в организме живого существа не хватает какого-нибудь элемента, то происходит компенсация его за счет другого химического аналога: радиоактивные или нерадиоактивные изотопы элементов химически совершенно одинаковы (например, изотопы йода), стронций-90 схож по химическим свойствам с кальцием, цезий-137 – с калием, плутоний-239 – с железом и т. д.

Пути поступления радионуклидов. Радиоактивные вещества могут поступать в организм тремя путями: с пищей и водой в желудочно-кишечный тракт, через легкие и кожу. Наиболее важным и потенциально опасным является ингаляционное поступление радионуклидов.

Попадание твердых частиц в дыхательные органы зависит от степени дискретности частиц. Частицы размером меньше 0,1 мкм при входе вместе с воздухом попадают в легкие, а при выходе удаляются. В легких остается только небольшая часть. Крупные частицы размером больше 5 мкм почти все задерживаются носовой полостью.

Дальнейшая судьба отложившихся в дыхательных путях радионуклидов также связана с размерами радиоактивных частиц, их физико-химическими свойствами и транспортабельностью в организме. Хорошо растворимые вещества в основном быстро (в несколько десятков минут) резорбируются в кровеносное русло, а затем, в процессе обмена веществ, откладываются в определенных органах и системах организма или выводятся. Нерастворимые или слабо растворимые вещества, осевшие в верхних дыхательных путях, удаляются из них вместе со слизистой, после чего с большой вероятностью поступают в желудочно-кишечный тракт, где резорбируются кишечной стенкой.

Второй по значимости путь – *поступление радионуклидов с пищей и водой*. Питательные вещества наряду с фоновыми концентрациями есте-

ственных радиоактивных веществ могут быть загрязнены искусственными радионуклидами, которые из внешней среды по биологическим пищевым цепочкам попадают в сельскохозяйственные растения, организмы животных и, в конце концов, в продукты питания. Дальнейшая судьба радиоактивных веществ зависит от их растворимости в жидкой среде желудочно-кишечного тракта.

Орган тела человека является критическим, если он: а) получает наибольшую дозу или усваивает наибольшее количество радионуклидов; б) играет наиболее важную роль (или необходим) для нормального функционирования всего организма; в) обладает наибольшей радиочувствительностью, то есть повреждается самой низкой дозой облучения по сравнению с другими органами.

«Судьба» поступивших в организм радионуклидов зависит от их свойств и химической природы. Одни из них в виде растворов удаляются с мочой, другие могут быть задержаны в организме на различные сроки (рисунок 2).

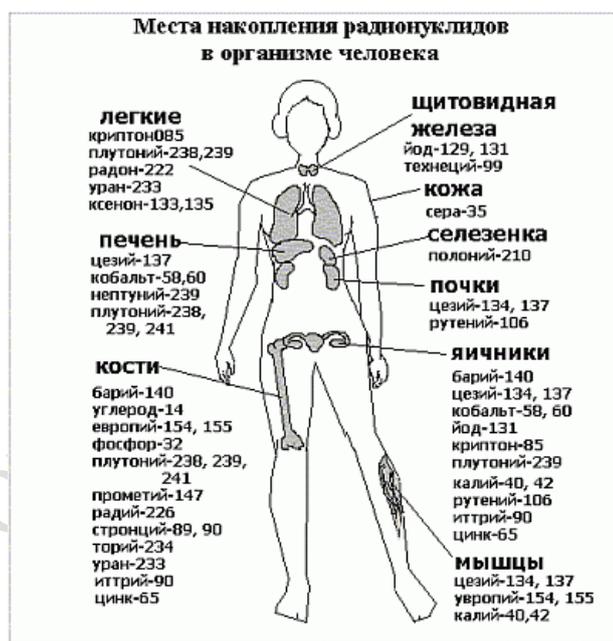


Рисунок 2 – Накопление радионуклидов в организме человека
(Из книги Борчук, Н. И. «Медицина экстремальных ситуаций», Минск, «Вышэйшая школа», 1998 г.)

Известны отдельные случаи высокой избирательности распределения. Так, изотопы ^{131}I накапливаются исключительно в щитовидной железе.

Степень опасности зависит также от скорости выведения вещества из организма. Если радионуклиды, попавшие внутрь организма однотипны с элементами, которые потребляются человеком, то они не задерживаются на длительное время в организме, а выделяются вместе с ними

(натрий, хлор, калий и другие).

На скорость выведения радиоактивного вещества большое влияние оказывает период полураспада данного радиоактивного вещества $T_{1/2}$. Если обозначить T_b период биологического полувыведения радиоактивного изотопа из организма, то эффективный период полураспада $T_{эф}$, учитывающий радиоактивный распад и биологическое выведение, выразится формулой

$$T_{эф} = T_{1/2} \cdot T_b / (T_{1/2} + T_b).$$

В условиях постоянного поступления цезий накапливается в органах и тканях до определенного предела. Вначале процесс протекает интенсивно, затем постепенно затухает – и наступает равновесное состояние, когда, несмотря на присутствие нуклида в окружающей среде, его содержание в организме остается постоянным. Время достижения такой стабилизации зависит от вида животных и их возраста. Равновесное состояние у коров наступает примерно к концу месяца, у овец и коз – через 10 дней. У человека равновесное состояние устанавливается через 430 суток.

Время, в течение которого выводится половина поступившего в организм радионуклида цезия, зависит от возраста человека: у детей до 1 года – за 9 суток, до 9 лет – за 38 суток, у взрослого 30-летнего человека – за 70 суток, 70-летнего – за 90 суток.

Годовая суммарная эффективная доза:

$$D_{сумм} = D_{внешн.} + D_{внутр.}$$

Годовая эффективная доза внешнего облучения:

$$D_{внешн.} = k_{ext} \cdot \sigma,$$

где $k_{ext} = 1,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{мЗв} \cdot \text{м}^2}{\text{кБк} \cdot \text{год}}$ – пересчетный коэффициент от плотности загрязнения территории к дозе;

σ – плотность радиоактивного загрязнения, кБк/м².

Годовая эффективная доза внутреннего облучения:

$$D_{внутр.} = k_{int} \cdot \sum_j \frac{m_j \cdot q_j}{\epsilon_j},$$

где $k_{int} = 1,3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мЗв}}{\text{Бк} \cdot \text{год}}$ – пересчетный коэффициент от годовой потребленной активности ¹³⁷Cs в продуктах питания к дозе;

m_j – годовое потребление j -го продукта среднестатистическим жителем (кг/год);

q_j – удельное содержание ¹³⁷Cs в j -ом продукте питания (Бк/кг);

ϵ_j – коэффициент снижения активности при кулинарной обработ-

ке (отн. ед.).

Вопросы для самоконтроля

- 1 Как классифицируются радиационные аварии?
- 2 Когда произошла катастрофа на Чернобыльской АЭС?
- 3 Какое государство наиболее пострадало от катастрофы на ЧАЭС?
- 4 Как распределена территория Республики Беларусь по зонам радиоактивного загрязнения?
- 5 Что такое внешнее и внутреннее облучение населения?
- 6 Какими путями поступают радионуклиды в организм человека?
- 7 В каких органах человека накапливаются радионуклиды?

Тема 3. Биологические эффекты воздействия ионизирующего излучения на организм человека

- 1 Действие ионизирующего излучения на организм.
- 2 Чувствительность органов и тканей к воздействию ионизирующего излучения.
- 3 Понятие о пороговом уровне дозы облучения.
- 4 Детерминированные и стохастические эффекты воздействия ионизирующего излучения на организм.

1 Действие ионизирующего излучения на организм

Радиация присутствовала на нашей планете с момента ее образования. Ионизирующие излучения наряду с другими явлениями физической, химической и биологической природы сопровождали развитие жизни на Земле. Однако физическое действие радиации начало изучаться только в конце XIX столетия, а ее биологические эффекты на живые организмы – в середине XX.

Специфика действия ионизирующего излучения (ИИ) на биологические объекты заключается в том, что производимый им эффект обусловлен не столько количеством поглощенной энергии в облучаемом объекте, сколько той формой, в которой эта энергия передается. Никакой другой вид энергии (тепловой, электрической и др.), поглощенной биологическим объектом в том же количестве, не приводит к таким изменениям, какие вызывает ИИ. Смертельная доза ионизирующего излучения для человека составляет 6 Гр, в 1 см³ ткани образуется 1 ионизированная молекула на 10 миллионов. Такая же доза, переданная телу в виде тепло-

вой энергии, вызовет повышение температуры тела на 0,001 градуса.

При изучении действия радиации на живой организм были определены следующие особенности:

- действие ИИ на организм не ощутимо человеком. У людей отсутствует орган чувств, который воспринимал бы ионизирующие излучения. Существует так называемый период мнимого благополучия – инкубационный период проявления действия ИИ. Продолжительность его сокращается при облучении в больших дозах;

- действие от малых доз может суммироваться или накапливаться;

- излучение действует не только на данный живой организм, но и на его потомство – это так называемый генетический эффект;

- различные органы живого организма имеют свою чувствительность к облучению. При ежедневном воздействии дозы 0,002–0,005 Гр уже наступают изменения в крови;

- не каждый организм в целом одинаково воспринимает облучение;

- облучение зависит от частоты. Одноразовое облучение в большой дозе вызывает более глубокие последствия, чем фракционированное.

ИИ способно разрывать химические связи молекул, из которых состоят ткани живого организма, и, как следствие, вызывать биологические изменения. Действие ИИ происходит на атомном или молекулярном уровне, независимо от того, подвергается ли человек внешнему облучению, или получает радиоактивные вещества с пищей и водой. Биологические эффекты влияния радиации на организм человека обусловлены взаимодействием энергии излучения с биологической тканью. Энергию, непосредственно передаваемую атомам и молекулам биотканей, называют *прямым действием радиации*.

ИИ, воздействуя на живой организм, вызывает в нем цепочку обратимых изменений, которые приводят к тем или иным биологическим последствиям, зависящим от воздействия и условий облучения. Первичным этапом – спусковым механизмом, инициирующим многообразные процессы, происходящие в биологическом объекте, являются ионизация и возбуждение. Именно в этих физических актах взаимодействия происходит передача энергии ионизирующего излучения облучаемому объекту.

Заряженные частицы проникают в ткани организма, теряют свою энергию вследствие электрических взаимодействий с электронами атомов. Электрическое взаимодействие сопровождает процесс ионизации (вырывание электрона из нейтрального атома).

Этапы биологического действия ионизирующих излучений. Действие ИИ на биологические объекты можно разделить на несколько этапов. Начальный этап развивается на атомарном уровне – это ионизация и возбуждение. Время протекания этого процесса составляет $1 \cdot 10^{-14}$ – $1 \cdot 10^{-10}$ секунды.

В дальнейшем, в результате прямого или непрямого действия, происходят изменения в молекулярной структуре облучаемого объекта. Длительность этого процесса $1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-6}$ с. На этом заканчивается *физико-химический этап* радиационного воздействия на живой организм и начинается *биологический* (таблица 10).

Физико-химические изменения сопровождаются возникновением в организме чрезвычайно опасных «свободных радикалов».

Известно, что в биологической ткани 60–70 % по массе составляет вода. Кроме прямого ионизирующего облучения выделяют также косвенное или не прямое действие, связанное с радиолизом воды.

Таблица 10 – Этапы воздействия ионизирующих излучений на биологические объекты (по Э. А. Галицкому)

Явление	Длительность этапа
1. Физико-химическая стадия (перенос энергии в виде ионизации и возбуждения на первичной траектории)	$10^{-12} - 10^{-8}$, с
2. Химические повреждения (свободные радикалы, возбужденные молекулы – до теплового равновесия)	10^{-7} с – несколько часов
3. Биомолекулярные повреждения (белки, нуклеиновые кислоты и т. д.)	Микросекунды – несколько часов
4. Ранние биологические эффекты (гибель клеток, гибель животных)	Часы – недели
5. Отдаленные биологические эффекты, в том числе возникновение опухолей, генетические эффекты	Годы – столетия

В результате ионизации молекулы воды образуют свободные радикалы $H\cdot$ и $OH\cdot$. В присутствии кислорода образуются также свободные радикалы – гидратный окисел HO_2 и перекись водорода H_2O_2 , являющиеся сильными окислителями.

Получающиеся в процессе радиолиза воды свободные радикалы и окислители, обладая высокой химической активностью, вступают в химические реакции с молекулами белков, ферментов и других структурных элементов биологической ткани, что приводит к изменению биологических процессов в организме. В результате нарушаются обменные процессы, подавляется активность ферментных систем, замедляется и прекращается рост тканей, возникают новые химические соединения, не свойственные организму – токсины. Это приводит к нарушениям жизнедеятельности отдельных функций или систем организма в целом. В зависимости от величины поглощенной дозы и индивидуальных особенностей организма вызванные изменения могут быть обратимыми или необратимыми.

При небольших дозах пораженная ткань восстанавливает свою функциональную деятельность. Большие дозы при длительном воздействии могут вызвать необратимое поражение отдельных органов или всего организма. Любой вид ионизирующих излучений вызывает биологические изменения

в организме как при внешнем (источник находится вне организма), так и при внутреннем облучении (радиоактивные вещества попадают внутрь организма, например, с пищей или ингаляционным путем).

Последующие биохимические процессы лучевого повреждения развиваются медленнее. Образовавшиеся активные радикалы нарушают нормальные ферментативные процессы в клетке, что ведёт к уменьшению количества богатых энергией (макроэргических) соединений. Особенно чувствителен к облучению синтез дезоксирибонуклеиновых кислот (ДНК) в интенсивно делящихся клетках. В результате цепных реакций, возникающих при поглощении энергии излучения, изменяются многие компоненты клетки, в том числе макромолекулы (ДНК, ферменты и др.) и сравнительно малые молекулы (аденозинтрифосфорная кислота, коферменты и др.). Это приводит к нарушению ферментативных реакций, физиологических процессов и клеточных структур.

2 Чувствительность органов и тканей к воздействию ионизирующего излучения

Радиочувствительность – это физиологическая реакция организма на воздействие ИИ.

Биологический эффект ионизирующего излучения зависит от суммарной дозы и времени воздействия излучения, вида излучения, размеров облучаемой поверхности и индивидуальных особенностей организма.

Радиочувствительность разных видов организмов различна. Смерть половины облученных животных (при общем облучении) в течение 30 сут после облучения (летальная доза – ЛД^{50/30}) вызывается следующими дозами рентгеновского излучения: морские свинки 250 Р, собаки 335 Р, обезьяны 600 Р, мыши 550–650 Р, караси (при 18°С) 1800 Р, змеи 8000–20 000 Р. Более устойчивы одноклеточные организмы: дрожжи погибают при дозе 30 000 Р, амёбы – 100 000 Р, а инфузории выдерживают облучение в дозе 300 000 Р. Радиочувствительность высших растений тоже различна: семена лилии полностью теряют всхожесть при дозе облучения 2 000 Р, на семена капусты не влияет доза в 64 000 Р.

Степень чувствительности различных тканей к облучению неодинакова. Если рассматривать ткани органов в порядке уменьшения их чувствительности к действию излучения, то получим следующую последовательность: лимфатическая ткань, лимфатические узлы, селезенка, зубная железа, костный мозг, зародышевые клетки. Большая чувствительность кроветворных органов к радиации лежит в основе определения характера лучевой болезни.

Поглощенная доза излучения, вызывающая поражение отдельных

частей тела, а затем смерть, превышает смертельную поглощенную дозу облучения всего тела. Смертельные поглощенные дозы для отдельных частей тела следующие: голова – 20, нижняя часть живота – 30, верхняя часть живота – 50, грудная клетка – 100, конечности – 200 Гр.

При однократном облучении всего тела в дозе 25 *бэр* нельзя обнаружить какие-либо изменения в состоянии здоровья человека.

При однократном облучении всего тела в дозе 25–50 *бэр* тоже отсутствуют внешние признаки лучевого поражения. Однако могут наблюдаться временные изменения в крови, которые быстро нормализуются.

В случае однократного облучения в дозах больше 100 *бэр* возникают различные формы острой лучевой болезни.

При облучении в дозе 150–200 *бэр* наблюдается кратковременная лёгкая форма острой лучевой болезни. Она проявляется в 3–50 % случаев в виде рвоты в первые сутки после облучения. Смертельные исходы отсутствуют.

При облучении в дозе 250–400 *бэр* возникает лучевая болезнь средней степени тяжести. В первые сутки наблюдается тошнота и рвота у всех облучённых. Резко снижается количество лейкоцитов, появляются подкожные кровоизлияния. В 20 % случаев возможен смертельный исход. Смерть наступает через 2–6 недель после облучения.

При облучении в дозе 400–700 *бэр* развивается тяжёлая форма лучевой болезни. В течение месяца после облучения смертельный исход возможен у 50 % облучённых.

Крайне тяжёлая форма острой лучевой болезни наблюдается после лучевого воздействия в дозе свыше 700 *бэр*. Через 2–4 часа после облучения появляется рвота. В крови почти полностью исчезают лейкоциты, появляются множественные подкожные кровотечения, кровавый понос. Смертность – 100 %.

Радиопротекторы частично предотвращают возникновение химически активных радикалов, которые образуются под воздействием излучения. Механизмы действия радиопротекторов различны. Одни из них вступают в химическую реакцию с попадающими в организм радиоактивными изотопами и нейтрализуют их, образуя нейтральные вещества, легко выводимые из организма. Другие (антиоксиданты – витамины А, В, Е, селен) воздействуют на образование и нейтрализацию свободных радикалов. Одни радиопротекторы действуют в течение короткого промежутка времени, время действия других более длительное. Есть несколько разновидностей радиопротекторов: таблетки, порошки и растворы.

Существует значительная изменчивость в любой возрастно-половой группе: примерно четверть всех людей обладает повышенной радиочувствительностью, а около 20 % – пониженной. Вероятность заболеть раком крови при облучении эмбриона или плода еще в утробе матери почти в четыре раза выше, чем при таком же уровне облучения молодого

человека в возрасте 11–24 лет.

Эффект радиации может многократно усиливаться при ее воздействии одновременно с другими факторами среды – химическими (пестициды, тяжелые металлы, диоксины и др.) и физическими (электромагнитные, температурные воздействия) загрязнениями. Малые количества пестицидов могут усиливать действие радиации. То же самое происходит в присутствии небольших количеств ртути. Недостаток селена в организме усиливает тяжесть радиационного поражения. Известно, что у курильщиков, подвергающихся облучению в 15 мЗв/год, риск заболеть раком легких возрастает более чем в 16 раз по сравнению с некурящими.

3 Понятие о пороговом уровне дозы облучения

Биологические последствия воздействия ИИ проявляются в виде радиационных эффектов - эффектов облучения.

Различают два вида эффекта воздействия на организм ионизирующих излучений: *соматический* и *генетический*. При *соматическом* эффекте последствия проявляются непосредственно у облучаемого, при *генетическом* – у его потомства. Соматические эффекты могут быть *ранними* или *отдалёнными*. Ранние возникают в период от нескольких минут до 30–60 суток после облучения. К ним относят покраснение и шелушение кожи, помутнение хрусталика глаза, поражение кроветворной системы, лучевую болезнь, летальный исход. Отдалённые соматические эффекты проявляются через несколько месяцев или лет после облучения в виде стойких изменений кожи, злокачественных новообразований, снижения иммунитета, сокращения продолжительности жизни.

Порог дозы – безопасные уровни дозы излучения, которые не обладают поражающим действием на облученный организм любого возраста и на потомство облученных родителей.

На рисунке 3 представлена кривая, характеризующая зависимость выхода соматико-стохастических последствий от поглощенной дозы (D).

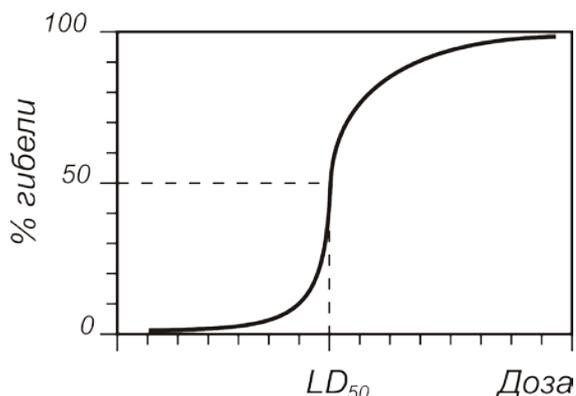


Рисунок 3 – Зависимость «доза-эффект»

Это известная в радиобиологии кривая «доза-эффект», имеющая S-образную форму и обрывающаяся в нижней части при значении эквивалентной дозы 0,25–0,50 Зв (25–50 бэр). При меньших дозах не удается зарегистрировать отдаленных соматико-стохастических последствий облучения (злокачественные новообразования) на фоне «естественных» или, как их называют, спонтанных раков. При высоких уровнях доз облучения вероятность появления этих видов патологии имеет линейную зависимость от дозы. В области малых доз такая зависимость пока не доказана, поэтому рассматриваемый вопрос чрезвычайно сложен.

Концепция линейного беспорогового воздействия радиации. Недостаточность прямых данных, позволяющих оценить в интересах гигиенического нормирования ИИ риск стохастических эффектов излучения в области малых доз, вызвала необходимость условно распространить на нее закономерности развития таких эффектов при высоких уровнях радиационного воздействия. На этой основе была сформулирована *концепция линейного беспорогового воздействия радиации*, которая в настоящее время принята на международном уровне в качестве официальной доктрины гигиенического нормирования ИИ. Согласно ей, риск радиационно обусловленного канцерогенеза не имеет дозового порога и существует при воздействии любой, в том числе сколь угодно малой дозы ИИ. При этом вероятность радиационно обусловленного канцерогенеза возрастает прямо пропорционально дозе облучения: при удвоении дозы риск удваивается, при увеличении дозы в три раза – утраивается и т. д.

Таким образом, в основе гигиенического нормирования ИИ лежит *концепция линейного беспорогового воздействия радиации*, в соответствии с которой любые малые дозы облучения, в том числе и обусловленные естественным радиационным фоном, не являются безопасными, и, следовательно, необходимо учитывать беспороговые, или стохастические, радиационные эффекты, которые они вызывают.

Суть «концепции приемлемого (оправданного) риска» состоит в том, что максимально допустимое радиационное воздействие должно быть таким, чтобы риск смертельного радиационного канцерогенеза – наиболее частого стохастического эффекта – не превышал объективно сложившейся на современном этапе развития человеческого общества средней величины риска смерти в связи с производственной деятельностью (социально приемлемого профессионального риска) в важнейших отраслях народного хозяйства. Для населения этот риск не должен превышать риска смерти от естественных причин, связанных с современной средой обитания человека в развитых странах.

На основе анализа обширных статистических данных было установлено, что профессиональный риск смерти, равный в среднем $5 \cdot 10^{-4}$ на одного чело-

века в год, остается практически неизменным на протяжении многих лет, несмотря на развитие и усложнение промышленного производства, создание принципиально новых технологий и прочее. Следовательно, риск гибели, обусловленный профессиональными факторами, равный в среднем $5 \cdot 10^{-4}$ на одного человека в год, рассматривается как социально приемлемый.

4 Детерминированные и стохастические эффекты воздействия ионизирующего излучения на организм

Эффекты излучения детерминированные (нестохастические) – клинически выявляемые вредные биологические эффекты, вызванные ионизирующим излучением, в отношении которых предполагается существование порога, ниже которого эффект отсутствует, а выше тяжесть зависит от дозы. *Нестохастические* эффекты могут возникать вскоре после облучения в высоких дозах ионизирующего излучения, при этом тяжесть эффекта проявляется в зависимости от дозы, и для появления этих эффектов должен существовать порог.

Эффекты излучения стохастические – вредные биологические эффекты, вызванные ионизирующим излучением, не имеющим дозового порога возникновения, вероятность возникновения которых пропорциональна дозе и для которых тяжесть проявления не зависит от дозы. Стохастические эффекты обычно обнаруживаются через длительное время после облучения, вероятность их появления (а не столько их тяжесть) рассматривают как беспороговую функцию дозы.

Принципиальным отличием стохастических эффектов от детерминированных является их вероятностный (необязательный) характер. Применительно к каждому человеку, который подвергся облучению ИИ, они не могут рассматриваться в качестве фатальных, неотвратимых последствий радиационного воздействия. Кроме того, возможность их развития и степень тяжести не зависят от величины дозы или от превышения того или иного дозового порога. Другими словами, под стохастическими понимают такие последствия, вероятность которых возрастает с дозой, но тяжесть поражения не зависит от нее.

Вопросы для самоконтроля

- 1 На какие этапы подразделяется биологическое действие ИИ?
- 2 Что такое радиолиз воды?
- 3 Что такое радиочувствительность организма?
- 4 Что такое порог дозы?
- 5 В чем заключается концепция линейного беспорогового воздей-

ствия радиации?

Тема 4. Основные меры защиты населения от радиационного воздействия при авариях на атомных электростанциях

1 Законодательство Республики Беларусь в области радиационной безопасности.

2 Основные принципы радиационной безопасности.

3 Меры защиты населения от техногенного облучения в результате аварий на атомных электростанциях.

4 Ограничение потребления, потенциально загрязненных радионуклидами пищевых продуктов.

5 Система радиационного мониторинга и контроля продуктов питания.

1 Законодательство Республики Беларусь в области радиационной безопасности

Закон Республики Беларусь от 23 ноября 1993 г. № 2583-ХІІ «О санитарно-эпидемическом благополучии населения».

Закон Республики Беларусь от 12 ноября 1991 г. № 1227-ХІІ «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС».

Закон Республики Беларусь от 5 января 1998 г. № 122-З «О радиационной безопасности населения».

Закон Республики Беларусь 6 января 2009 г. № 9-з «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий».

Эти законы определяют основы правового регулирования в области обеспечения радиационной безопасности населения, направлены на создание условий, обеспечивающих охрану жизни и здоровья людей от вредного воздействия ионизирующего излучения.

2 Основные принципы радиационной безопасности

Радиационная безопасность персонала, населения и окружающей природной среды считается обеспеченной, если соблюдаются основные принципы радиационной безопасности (обоснование, оптимизация, нор-

мирование) и требования радиационной защиты, установленные законами Республики Беларусь, действующими нормами радиационной безопасности и санитарными правилами.

Принцип обоснования – запрещение всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного облучением.

Принцип оптимизации предусматривает поддержание на возможно низком и достижимом уровне как индивидуальных (ниже пределов, установленных действующими нормами), так и коллективных доз облучения, с учетом социальных и экономических факторов.

Принцип нормирования, требующий не превышения установленных действующими нормами Республики Беларусь индивидуальных пределов доз и других нормативов Республики Беларусь, должен соблюдаться всеми организациями и лицами, от которых зависит уровень облучения людей.

Принцип ограничения дозы на человека является основой в современных концепциях нормирования радиационного облучения, он позволяет предотвратить вредные нестохастические и свести к минимуму стохастические и генетические последствия облучения. Поэтому одной из важнейших задач радиационной безопасности является установление границ опасности.

В настоящее время концепция линейного, беспорогового действия радиации является официальной доктриной, на базе которой ведется нормирование доз облучения и принимаются рекомендации по радиационной защите.

Предел индивидуального пожизненного риска в условиях нормальной эксплуатации для техногенного облучения в течение года персонала принимается округленно $1,0 \cdot 10^{-3}$, а для населения – $5,0 \cdot 10^{-5}$.

3 Меры защиты населения от техногенного облучения в результате аварий на атомных электростанциях

Основополагающими документами в системе государственного регулирования, в котором регламентируются основные дозовые пределы, допустимые уровни воздействия ионизирующего излучения и другие требования по ограничению облучения человека являются:

– Санитарные нормы и правила «Требования к радиационной безопасности», утвержденные постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28 декабря 2012 г. № 213 «Об утверждении Санитарных норм и правил «Требования к радиационной безопасности» (*Требования*);

– Гигиенический норматив «Критерии оценки радиационного воз-

действия» (НРПА РБ, 25.05.2013, 8/26850) (*Критерии*).

Требования и Критерии применяются для обеспечения безопасности человека во всех условиях воздействия на него ионизирующего излучения искусственного или природного происхождения и являются *Нормами* обязательными для всех юридических лиц.

Нормы распространяются на следующие виды воздействия ионизирующего излучения на человека в условиях нормальной эксплуатации техногенных источников излучения; в результате радиационной аварии; от природных источников излучения; при медицинском облучении.

Устанавливаются следующие категории облучаемых лиц:

- персонал;
- все население, включая лиц из персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности.

Предельно допустимая доза. Эффективная доза для персонала не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) – 1 000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) – 70 мЗв.

Основные пределы доз облучения показаны в таблице 11.

Таблица 11 – Основные пределы доз облучения

Нормируемые величины	Пределы доз, мЗв	
	Персонал	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год:		
в хрусталике глаза,	150	15
на коже,	500	50
кистях и стопах	500	50

Ограничение облучения от природных источников. Допустимое значение эффективной дозы, обусловленной суммарным воздействием природных источников излучения, для населения не устанавливается. При проектировании новых жилых и общественных зданий должно быть предусмотрено, чтобы *среднегодовая* эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) изотопов радона и тория в воздухе помещений не превышала 100 Бк/м³, а мощность эффективной дозы гамма-излучения не превышала мощность дозы на открытой местности более чем на 0,2 мкЗв/ч.

Эффективная удельная активность ($A_{эфф}$) природных радионуклидов в строительных материалах (щебень, гравий, песок, бутовый и пиленный камень, цементное и кирпичное сырье и пр.), добываемых на их месторождениях или являющихся побочным продуктом промышленности, а также отходы промышленного производства, используемые для изготовления

строительных материалов (золы, шлаки и пр.), не должна превышать:

– для материалов, используемых в строящихся и реконструируемых жилых и общественных зданиях (I класс):

$$A_{\text{эфф}} = A_{\text{Ra}} + 1,3 A_{\text{Th}} + 0,09 A_{\text{K}} \leq 370 \text{ Бк/кг},$$

где A_{Ra} и A_{Th} – удельные активности ^{226}Ra и ^{232}Th ;

A_{K} – удельная активность ^{40}K , Бк/кг;

– для материалов, используемых в дорожном строительстве в пределах территории населенных пунктов и зон перспективной застройки, а также при возведении производственных сооружений (II класс):

$$A_{\text{эфф}} \leq 740 \text{ Бк/кг};$$

– для материалов, используемых в дорожном строительстве вне населенных пунктов (III класс):

$$A_{\text{эфф}} \leq 1,5 \text{ кБк/кг}.$$

При $1,5 \text{ кБк/кг} < A_{\text{эфф}} < 4,0 \text{ кБк/кг}$ (IV класс) вопрос об использовании материалов решается в каждом случае отдельно по согласованию с федеральным органом госсанэпиднадзора. Если $A_{\text{эфф}} > 4,0 \text{ кБк/кг}$, то материалы не должны использоваться в строительстве.

Ограничение медицинского облучения. Принципы контроля и ограничения радиационных воздействий в медицине основаны на получении необходимой и полезной диагностической информации или терапевтического эффекта при минимально возможных уровнях облучения. При этом не устанавливаются ПД, но используются принципы обоснования назначения радиологических медицинских процедур и оптимизации мер защиты пациентов.

При проведении профилактических медицинских рентгенологических исследований и научных исследований практически здоровых лиц годовая эффективная доза облучения этих лиц не должна превышать 1 мЗв.

Ограничение облучения в условиях радиационной аварии.

Радиационная авария – потеря управления источником ионизирующего излучения, вызванная неисправностью оборудования, неправильными действиями работников (персонала), стихийными бедствиями или иными причинами, которые могли привести или привели к облучению людей выше установленных норм или радиоактивному загрязнению окружающей среды.

Доза предотвращаемая – прогнозируемая доза вследствие радиационной аварии, которая может быть предотвращена защитными мероприятиями.

В случае возникновения аварии должны быть приняты практические меры для восстановления контроля над источником излучения и сведения

к минимуму доз облучения, количества облученных лиц, радиоактивного загрязнения окружающей среды, экономических и социальных потерь, вызванных радиоактивным загрязнением.

При радиационной аварии или обнаружении радиоактивного загрязнения ограничение облучения осуществляется защитными мероприятиями, применимыми, как правило, к окружающей среде и (или) к человеку. Эти мероприятия могут приводить к нарушению нормальной жизнедеятельности населения, хозяйственного и социального функционирования территории.

При принятии решений о характере вмешательства (защитных мероприятий) следует руководствоваться следующими принципами:

- предлагаемое вмешательство должно принести обществу и прежде всего облучаемым лицам больше пользы, чем вреда, то есть уменьшение ущерба в результате снижения дозы должно быть достаточным, чтобы оправдать вред и стоимость вмешательства, включая его социальную стоимость (**принцип обоснования вмешательства**);

- форма, масштаб и длительность вмешательства должны быть оптимизированы таким образом, чтобы чистая польза от снижения дозы, то есть польза от снижения радиационного ущерба за вычетом ущерба, связанного с вмешательством, была бы максимальной (**принцип оптимизации вмешательства**).

Принятие решений о мерах защиты населения в случае крупной радиационной аварии с радиоактивным загрязнением территории проводится на основании сравнения прогнозируемой дозы, предотвращаемой защитным мероприятием, и уровней загрязнения с уровнями А и Б, приведенными в таблицах 13–14.

Если уровень облучения, предотвращаемого защитным мероприятием, не превосходит уровень А, нет необходимости в выполнении мер защиты, связанных с нарушением нормальной жизнедеятельности населения, а также хозяйственного и социального функционирования территории.

Таблица 13 – Критерии для принятия неотложных решений в начальном периоде радиационной аварии

Меры защиты	Предотвращаемая доза за первые 10 суток, мГр			
	на все тело		щитовидная железа, легкие, кожа	
	уровень А	уровень Б	уровень А	уровень Б
Укрытие	5	50	50	500
Йодная профилактика: взрослые дети			250 100	2 500 1 000
	Эвакуация	50	500	500 5 000

Таблица 14 – Критерии для принятия решений об отселении и ограничении потребления загрязненных пищевых продуктов

Меры защиты	Предотвращаемая эффективная доза, мЗв	
	уровень А	уровень Б
Ограничение потребления загрязненных пищевых продуктов и питьевой воды	5 за первый год	50 за первый год
	1/год в последующие годы	10/год в последующие годы
Отселение	50 за первый год	500 за первый год
	1000 за все время отселения	

Если предотвращаемое защитным мероприятием облучение превосходит уровень А, но не достигает уровня Б, решение о выполнении мер защиты принимается по принципам обоснования и оптимизации с учетом конкретной обстановки и местных условий.

Если уровень облучения, предотвращаемого защитным мероприятием, достигает и превосходит уровень Б, необходимо выполнение соответствующих мер защиты, даже если они связаны с нарушением нормальной жизнедеятельности населения, хозяйственного и социального функционирования территории.

На поздних стадиях радиационной аварии, повлекшей за собой загрязнение обширных территорий долгоживущими радионуклидами, решения о защитных мероприятиях принимаются с учетом сложившейся радиационной обстановки и конкретных социально-экономических условий.

4 Ограничение потребления, потенциально загрязненных радионуклидами пищевых продуктов

Республиканские допустимые уровни содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99) показаны в таблице 15.

Таблица 15 – Республиканские допустимые уровни содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99)

Для ^{137}Cs		
№	Наименование продукта	Бк/кг, Бк/л
1	2	3
1.	Вода питьевая	10
2.	Молоко и цельномолочная продукция	100
4.	Творог и творожные изделия	50
6.	Масло коровье	100
7.	Говядина, баранина и продукты из них	500

Окончание таблицы 15

1	2	3
8.	Свинина, птица и продукты из них	180
9.	Картофель	80
10.	Хлеб и хлебобулочные изделия	40
11.	Мука, крупы, сахар	60
13.	Жиры животные и маргарин	100
14.	Овощи и корнеплоды	100
15.	Фрукты	40
18.	Дикорастущие ягоды и консервированные продукты из них	185
19.	Грибы свежие	370
20.	Грибы сушеные	2 500
21.	Специализированные продукты детского питания в готовом для употребления виде	37
22.	Прочие продукты питания	370
Для ⁹⁰ Sr		
1.	Вода питьевая	0,37
2.	Молоко и цельномолочная продукция	3,7
3.	Хлеб и хлебобулочные изделия	3,7
4.	Картофель	3,7
5.	Специализированные продукты детского питания в готовом для употребления виде	1,85

Формируемая доза внутреннего облучения населения Беларуси от радионуклидов цезия при введении в действие РДУ-99 составит 0,98 мЗв/год. Основной вклад в формирование дозы внесут молоко и молочные продукты, картофель, говядина.

Мониторинг окружающей среды – система длительных регулярных наблюдений за окружающей средой, оценки состояния, анализа и прогноза изменений окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов.

Мониторинг окружающей среды проводится в рамках *Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь* (сокращенно НСМОС), образованной в 1993 году.

В настоящее время НСМОС включает 11 организационно-самостоятельных видов мониторинга, окружающей среды.

Основными задачами мониторинга окружающей среды являются:

- наблюдение за компонентами окружающей среды;
- анализ и оценка состояния окружающей среды;
- прогнозирование состояния окружающей среды;
- информационное обеспечение органов государственного управления.

Сеть постоянного мониторинга окружающей среды Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды включает

181 реперную площадку, 19 ландшафтно-геохимических полигонов. На метеорологической сети проводится радиационный мониторинг приземного слоя атмосферы, в том числе измерения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения на 56 постах, измерения радиоактивных выпадений из атмосферы на 30 постах и радиоактивных аэрозолей – на 6 постах. На гидрологических постах 5 больших и средних рек республики, протекающих на загрязненных радионуклидами территориях, осуществляется мониторинг поверхностных вод.

Действующая система радиационного мониторинга окружающей среды с введением созданных автоматизированных систем контроля обеспечивает высокий уровень национальной системы реагирования в случае техногенных чрезвычайных ситуаций.

В 11 пунктах (Брагин, Гомель, Лельчицы, Мозырь, Наровля, Хойники, Чечерск, Костюковичи, Могилев, Славгород, Пинск) контролируются радиоактивные выпадения из атмосферы (установлены горизонтальные планшеты). В Могилеве, Гомеле, Мозыре, Пинске ежедневно контролируется содержание радиоактивных аэрозолей в воздухе с использованием фильтровентиляционных установок.

В Республике Беларусь функционируют автоматизированные системы радиационного контроля (АСРК) в зонах наблюдения Игналинской АЭС, Смоленской АЭС, Чернобыльской АЭС и Ровенской АЭС.

Система радиационного контроля. В Республике Беларусь создана и эффективно действует система радиационного контроля пищевых продуктов, продовольственного и сельскохозяйственного сырья, пищевой и другой продукции леса, производимых на загрязненной радионуклидами территории. Ее основу составляют ведомственные системы контроля.

Система радиационного контроля – комплекс мероприятий, направленных на ограничение облучения работников, населения и потребителей продукции от радиоактивных веществ и других источников ионизирующего излучения.

Зоны радиационного контроля. На территории республики вводятся три зоны радиационного контроля:

– территория радиоактивного загрязнения – территория, где возникло долговременное загрязнение окружающей среды радиоактивными веществами с плотностью загрязнения почвы радионуклидами ^{137}Cs более 1 Ки/км^2 , ^{90}Sr более $0,15 \text{ Ки/км}^2$ – **зона А**;

– территория вероятного радиационного воздействия выбросов АЭС сопредельных государств (Игналинская АЭС) – **зона Б**;

– «чистая» территория – территория, где плотность загрязнения почвы по ^{137}Cs менее 1 Ки/км^2 , ^{90}Sr менее $0,15 \text{ Ки/км}^2$, и на этой территории за последние 3 года не установлено ни одного случая содержания

радионуклидов в продуктах питания, сельскохозяйственной продукции выше действующих нормативных уровней – *зона В*.

Вопросы для самоконтроля

1 Какие основные законы в области радиационной безопасности населения приняты в Республике Беларусь?

2 Назовите основные принципы обеспечения радиационной безопасности.

3 Чему равна предельно допустимая доза облучения персонала и населения?

4 Чему равен допустимый уровень содержания ^{137}Cs в воде?

5 Чему равен допустимый уровень содержания ^{137}Cs в молоке?

6 Что такое система радиационного контроля?

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] : учеб. пособие / И. С. Асаенок, А. И. Навоша. – Минск, 2004. – Режим доступа: <http://www.bsuir.by/rn/12100229165341.pdf>.

Производственно-практическое издание

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

Радиационная безопасность

Практическое руководство

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

Подписано в печать 17.03.2017. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,8.
Уч.-изд. л. 3,1. Тираж 25 экз. Заказ 197.

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

Радиационная безопасность

Гомель
2017