Афанасьева Елена Николаевна
Доцент кафедры естественнонаучных дисциплин,
кандидат физических и математических наук
ФГБОУ ВО «УИ ГА им. Б. П. Бугаева»

Кузнецов Алексей Дмитриевич
Курсант 2 курса, уч. гр. Д-25-3
ФГБОУ ВО «УИ ГА им. Б. П. Бугаева»

Бякина Елизавета Владимировна
Курсант 2 курса, уч. гр. Д-25-2
ФГБОУ ВО «УИ ГА им. Б. П. Бугаева»

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МЕДИЦИНЕ

Аннотация. Рассматриваются виды ионизирующего излучения, механизмы его биологического действия, основные дозиметрические величины на примере прикладных задач, а также принципы защиты – время, расстояние и экранирование.

Ключевые слова: Ядерная медицина, ионизирующее излучение, дозиметрия, радиационная безопасность.

Ядерная медицина, включающая радионуклидную диагностику (РНД) и радионуклидную терапию (РНТ), в последние 15 лет является одной из наиболее активно развивающихся областей медицины в мире. В РФ производство и использование радиофармацевтических лекарственных препаратов в медицинской практике увеличивается ежегодно на 10%, что приводит к росту коллективной дозы от ядерной медицины и случаев радиационных аварий, связанных с ионизирующим излучением [1, с. 6].

Ионизирующее излучение – это излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию ионов разных знаков. Это характерно для лучей в кабинете рентгена. По виду частиц различают три основных вида радиоактивного испускания:

1. Альфа-излучение представляет собой поток ядер атомов гелия, быстро теряющим свою энергию при взаимодействии с атомами вещества. Излучение имеет маленькую проникающую способность и опасно лишь при внутреннем облучении органов и тканей.
2. Бета-излучение – это поток электронов. Из-за более низкой, чем у альфа-частиц, ионизирующей способности может преодолеть большее расстояние.
3. Гамма-излучение представляет собой электромагнитную волну, распространяющуюся со скоростью света. Ионизирующая способность гамма-излучения низка. Проникающая способность – самая большая [2, с. 1].

Живая клетка на 60-70% состоит из воды. Поэтому поток частиц ионизирующего излучения, проникая в организм, взаимодействует, прежде всего, с водой, что приводит к её радиационному разложению. Под действием радиации в клетках живых организмов образуются чужеродные химические соединения. Продукты радиолиза «атакуют» молекулярные структуры клеток, разрушают их, прерывают нормальное течение внутриклеточных процессов. В итоге, нормальное функционирование клеток нарушается, и при определенных дозах они гибнут [2, с. 1].

Происходит поглощение энергии рентгеновского излучения, что приводит к возникновению в биологических тканях различных радиационно-индуцированных эффектов. Основная физическая мера такого радиационного воздействия – доза излучения, которая имеет ряд показателей [3, с. 2].

- **Поглощённая доза.** Это отношение поглощённой в облучаемом веществе энергии излучения к массе этого вещества. В системе СИ единица поглощённой дозы – грей (1 Гр = 1 Дж/кг). В медицине эти показатели чаще всего используют для планирования, проведения лучевой терапии больных и её контроля [3, с. 2]. Рассмотрим задачу и введём необходимые формулы:

Космонавт находится на орбите Земли, экспедиция длится 150 суток. Мощность поглощённой дозы космического излучения в первые 145 суток составляет P = 0,8 мГр/сут, а в оставшиеся 5 – 1,4 мГр/сут. Рассчитайте суммарную поглощённую дозу, которую получит космонавт за время экспедиции. Ответ дайте в миллигреях.

Решение:

1. *Суммарную поглощённую дозу рассчитывают по формуле: D=P·t.*
2. *Подставим значения и сложим два случая: 0,8·145 + 1,4·5 = 123мГр*

 Экспозиционная доза. Это специфическая величина в дозиметрии, введённая лишь для определения дозы фотонного излучения в воздухе. Она представляет собой отношение суммарного электрического заряда ионов в облучённом объёме воздуха к массе воздуха в этом объёме. На практике чаще всего употребляют внесистемную единицу – рентген (Р). Единица в системе СИ – кулон на кг. При этом 1 Кл/кг = 3880 Р [3, с. 2]. Задача:

Точечный источник γ-излучения создаёт на расстоянии r_0=2 м мощность экспозиционной дозы X_0=0,05 Р/ч. Рабочий в течение смены находится в зоне облучения:2ч на расстоянии r_1=4м от источника; 1ч на расстоянии r_2=1м от источника; 3ч на расстоянии r_3=8м от источника. Считать источник точечным, поглощёнием и рассеянием γ-излучения в воздухе пренебречь. Определить суммарную экспозиционную дозу, которую получит рабочий за смену. Ответ выразить в миллирентгенах.

Решение:

1. *Для точечного источника мощность экспозиционной дозы убывает обратно пропорционально квадрату расстояния*

$$X(r) = X_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^2$$

2. *На расстоянии 4 м: $X(r) = 0{,}05 \cdot (\frac{2}{4})^2 = 0{,}0125$ Р/ч.*
3. *За два часа: 0,0125·2 = 0,025 Р*
4. *На расстоянии 1 м: $X(r) = 0{,}05 \cdot (\frac{2}{1})^2 = 0{,}2$ Р/ч.*
5. *На расстоянии 8 м: $X(r) = 0{,}05 \cdot (\frac{2}{8})^2 = 0{,}003125$ Р/ч.*
6. *За три часа: 0,003125·3 = 0,009375 Р*
7. *Суммарная доза: 0,025 + 0,2 + 0,009375 = 0,234375 Р = 234,375 мР*

 Эквивалентная доза. Это произведение поглощённой дозы и коэффициента качества излучения (для фотонов и электронов, в том числе и для рентгеновского излучения, он равен 1), измеряется в зивертах (Зв), 1 Зв = 1 Гр. Этим показателем обычно пользуются для оценки уровней облучения при радиорентгенологических процедурах персонала и пациентов. Также измеряются дозы и в отдельных органах для оценки биологического эффекта воздействия [3, с. 2]. Рассмотрим условие:

В организм мужчины весом 70 кг попало 10 мг ^{55}Fe. Найти значение эквивалентной дозы за 10-летний период. Период полураспада ^{55}Fe = 2,75 года. Энергия, выделяющаяся при одном акте распада Q=0.22 МэВ.

Решение:

1. *Найдём число атомов Fe: $N_0 = \frac{0{,}01}{55} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} \approx 1{,}09 \cdot 10^{20}$*
2. *Доля распавшихся ядер за 10 лет: $\frac{10}{2{,}75} \approx 3{,}64$*
3. *Тогда доля оставшихся: $2^{-3{,}64} \approx 0{,}08$. Значит, распалось: 1 – 0,08 = 0,92*
4. *Итоговое число распавшихся атомов: $1{,}09 \cdot 10^{20} \cdot 0{,}92 \approx 10^{20}$*
5. *Переведём Q из МэВ в Дж: $0{,}22 МэВ = 0{,}22 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-13}$ Дж*
6. *Поглощённую человеком энергию найдём по формуле E = NQ:*

$E = 10^{20} \cdot 0{,}22 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-13} = 3{,}52 \cdot 10^6$ Дж

7. *Тогда поглощённая доза: $D = \frac{E}{m} = \frac{3{,}52}{70} \cdot 10^6 \approx 5 \cdot 10^4$ Гр*

 Эффективная доза. Это основная дозиметрическая величина – взвешенная сумма эквивалентных органных доз. Поскольку при определении такой взвешенной суммы учитывается степень радиобиологического воздействия на все без исключения жизненно важные органы, эффективная доза позволяет учесть его вред на организм человека в целом [3, с. 2]. Условие:

Человек подвёргся равномерному общему облучению, в результате которого эквивалентная доза в лёгких составила H_1=0,043в, в костном мозге – H_2=0,02 Зв, а в остальных органах и тканях в среднем – Н3=0,01 Зв. Согласно рекомендациям радиационной безопасности, весовые коэффициенты равны соответственно w_1=0,12, w_2=0,12 и w_3=0,76. Найдите эффективную дозу облучения Е.

Решение:

1. *Эффективная доза вычисляется по формуле:*

$$E = \sum(w_T \cdot H_T) = w_1H_1 + w_2H_2 + w_3H_3$$

2. *Подставим значения: E = (0,12·0,04) + (0,12·0,02) + (0,76·0,01) = 0,0148 Зв*

Открытие радиоактивности и обнаружение вредного физико-биологического действия радиации на органы человека обусловили формирование нового самостоятельного раздела ядерной физики – дозиметрии ионизирующих излучений. Основными её задачами являются: определение дозы или мощности дозы излучения в средах от различных видов излучений, измерение активности радиоактивных препаратов и определение соотношений между активностью источника излучения и создаваемой им дозой [4, с. 3].

В настоящее время существует ряд методов детектирования ионизирующих излучений, применение каждого из которых определяется типом, энергией излучения и другими факторами. Основными характеристиками детекторов являются:

1. Эффективность – отношение числа частиц, зарегистрированных детектором, к общему числу прошедших через него частиц;
2. Пространственное разрешение – погрешность, с которой детектор может фиксировать положение частицы в пространстве
3. Временное разрешение – минимальный промежуток времени между прохождениями двух частиц, когда сигналы от них ещё не накладываются.

Обширную группу детекторов составляют ионизационные детекторы, основанные на ионизации молекул и атомов газов, производимой первичными или вторичными заряженными частицами. К таким детекторам относится известный всем счетчик Гейгера [4, с. 8].

Наиболее распространённая область его применения в медицинских учреждениях – это, безусловно, регулярный мониторинг радиационной обстановки. Детекторы используются для измерения фонового излучения, контроля загрязнения рабочих поверхностей, одежды персонала и кожных покровов пациентов. Одно из перспективных направлений использования – контроль радиохимической чистоты препаратов на основе технеция. Детектор с зондом для измерения поверхностного загрязнения может служить альтернативой активиметру при определении чистоты, что открывает возможность использования уже имеющегося в распоряжении служб радиационной безопасности оборудования для задач радиофармацевтического контроля, особенно в условиях повышенного фона или при недоступности специализированных приборов [5, с. 1].

В 1901 году Пьер Кюри, пренебрегая опасностью, подверг своё предплечье действию радия, поместив препарат на кожу. Методика была предельно простой: источник излучения (трубка с солью радия) фиксировался на коже предплечья на определённое время, после чего учёный наблюдал и документировал изменения состояния ткани. Результаты эксперимента оказались чрезвычайно важными: вначале облучённое место покраснело, затем появились язвы и струпья, и только через несколько месяцев рана зажила. У физика остался шрам, который он, по свидетельствам, рассматривал как свидетельство биологического действия радиации (рис. 1) [7, с. 15].

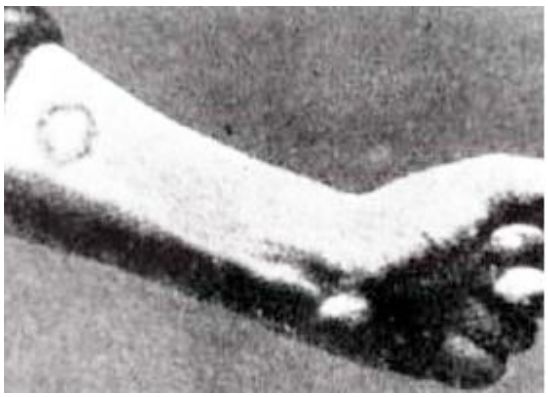


Рисунок 1. «Шрам на руке Пьера Кюри»

Этот эксперимент, с точки зрения физики, имел фундаментальное значение для развития радиационной медицины. Наблюдение за тем, что облучённая ткань разрушается, натолкнуло врачей на мысль использовать радий для разрушения опухолевых тканей. Уже в начале XX века французские врачи-практики с успехом применяли первые опыты этого лечения на своих больных, используя пробирки с эманацией радия. Исследования врачей показали, что при правильном применении радием можно лечить раковые опухоли, волчанку и стригущий лишай. Без этого первого шага было бы невозможно развитие современной ядерной медицины, включающей радионуклидную диагностику и терапию. Радиационная безопасность в медицине базируется на трёх принципах: времени, расстояния и экранирования. Суть принципа времени мы рассматривали выше: поглощённая доза пропорциональна времени облучения, а это значит, что минимизация продолжительности контакта с источником – это самый простой и универсальный способ резкого снижения получаемой дозы [8, с. 119].

Для точечного источника мощность дозы убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Все постинъекционные мероприятия осуществляются на значительно больших расстояниях от пациентов, являющихся источником излучения. Таким образом, принцип расстояния реализуется не только через геометрию помещения, но и через организацию рабочего процесса. Вывод прост и очевиден: чем меньше персонал проводит вблизи облучённого пациента, тем ниже приобретаемая доза [8, с. 123].

Принцип экранирования означает, что между источником излучения и человеком ставят материал, который ослабляет излучение: чем плотнее и толще преграда, тем меньше доза. Однако для разных видов излучения нужны разные экраны. Для гамма-излучения эффективны тяжёлые материалы вроде свинца или бетона, а для бета-излучения – лёгкие, такие как пластик или оргстекло. Необходимы подвижные экраны, защитные фартуки, очки, экраны для шприцев, автоматические инъекторы и дистанционное управление, которые снижают дозу именно там, где она формируется [8, с. 122].

Современная радиационная медицина немыслима без детекторов ионизирующего излучения, физические принципы работы которых также разнообразны. Ионизационные камеры и счётчики Гейгера регистрируют заряд, создаваемый ионизацией газа. В наши дни медицину делают всё более и более безопасной с точки зрения воздействия радиации. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка алмазных детекторов для медицинской дозиметрии. Алмаз обладает уникальной комбинацией физических свойств: он радиационно стоек, химически инертен и обладает высокой чувствительностью. Радиационная безопасность в медицине представляет собой область, где физика с одной стороны, является источником ионизирующего излучения, используемого для диагностики и терапии, с другой – инструментом для защиты от его вредного воздействия. Дальнейшее совершенствование радиационной безопасности в медицине требует тесного взаимодействия физиков и врачей. Именно при совместной работе рождаются решения, позволяющие максимально использовать преимущества ионизирующего излучения, минимизируя его риски для пациентов и персонала.

Список литературы:

1. Чипига, Л. А. Научное обоснование совершенствования системы радиационной защиты в ядерной медицине / Л. А. Чипига. – Санкт-Петербург, 2025. – URL: https://clck.ru/3Wmxid (дата обращения: 23.09.2026). – Текст: электронный.

2. Служба безопасности ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова». – URL: https://clck.ru/3Wmxjv (дата обращения: 23.09.2026). – Текст: электронный.

3. Наркевич, Б. Я. Радиационная безопасность в рентгенодиагностике и интервенционной радиологии / Б. Я. Наркевич, Б. И. Долгушин. – Москва, 2009. – URL: https://clck.ru/3Wmxms (дата обращения: 23.09.2026). – Текст: электронный.

4. Клименков, А. А. Элементы дозиметрии ионизирующих излучений / А.А. Клименков. – Екатеринбург, 2015. – URL: https://clck.ru/3Wmxna (дата обращения: 27.09.2026). – Текст: электронный.

5. Гонсалес, М. М. Разработка и валидация альтернативной процедуры количественного контроля качества анализа радиофармацевтических препаратов с использованием счётчика Гейгера-Мюллера / М. М. Гонсалес, А. Л. Пома, Н. Куэльо, А. Л. Солдати. – Сан-Карлос-де-Барилоче, Рио-Негро, Аргентина, 2024. – URL: https://clck.ru/3WmxpS (дата обращения: 27.09.2026). – Текст: электронный.

6. Черняев, А. П. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом / А. П. Черняев, А. В. Белоусов, Е. Н. Лыкова. – Москва, 2019. – URL: https://clck.ru/3WmxqE (дата обращения: 27.09.2026). – Текст: электронный.

7. Кюри, Е. Мемуары – Париж, 1937. – URL: https://clck.ru/3Wmxr4 (дата обращения: 27.09.2026). – Текст: электронный.

8. Охрименко, С. Е. Проблемы радиационной безопасности персонала при применении диагностических и терапевтических радиофармацевтических препаратов в ЯМ / С. Е. Охрименко, С. А. Рыжов. – Москва, 2026. – URL: https://clck.ru/3WmxsM (дата обращения: 27.09.2026). – Текст: электронный.