КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

Зарипова Ю.А.

РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Сборник лекций для студентов по направлению подготовки
«Физические и химические науки»

Алматы

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1. Источники ионизирующих излучений.

Лекция 2. Основы ядерной физики.

Лекция 3. Радиоактивность.

Лекция 4. Ядерные реакции.

Лекция 5. Взаимодействие радиоактивного излучения с веществом.

Лекция 6. Физические основы дозиметрии.

Лекция 7. Методы измерения ионизирующих излучений.

Лекция 8. Стандарты и нормативные документы в области радиационного контроля.

Лекция 9. Принцип работы радиометрических приборов радиационного контроля.

Лекция 10. Принцип работы спектрометрических приборов радиационного контроля.

Лекция 11. Радиационный мониторинг.

Лекция 1. Источники ионизирующих излучений.

Цель лекции: сформировать у обучающихся общее представление об источниках ионизирующего излучения, их классификации, природе происхождения и роли в формировании радиационного фона, а также ознакомить с основами воздействия ионизирующей радиации на организм человека.

Введение: Ионизирующее излучение представляет собой один из факторов, оказывающих потенциально опасное воздействие на здоровье человека и окружающую среду. Знание его источников и природы является основой для понимания принципов радиационной безопасности. Согласно Санитарным правилам "Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности" (Приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 15 декабря 2020 года № ҚР ДСМ-275/2020): **источник ионизирующего излучения – радиоактивные вещества, аппараты или устройства, содержащие радиоактивные вещества, а также электрофизические аппараты или устройства, испускающие или способные испускать ионизирующее излучение**. Ионизирующие излучения могут иметь как естественное, так и искусственное происхождение. Наибольшая часть радиационного воздействия на человека связана именно с естественными источниками. К ним относятся природные радионуклиды, присутствующие в земной коре, строительных материалах, атмосфере, воде и пище, а также космическое излучение. В среднем около 80% годовой дозы облучения человек получает именно от этих природных факторов, причём значительная часть приходится на внутреннее облучение, вызванное накоплением радиоактивных веществ в организме. Интенсивность естественного излучения может заметно различаться в зависимости от географических и климатических условий, однако среднее значение по планете оценивается примерно в 2,4 мЗв в год. По критерию расположения источников излучения выделяют два основных типа облучения:

- ✓ Внешнее облучение – вызвано источниками, находящимися вне организма человека. К ним относятся космическое излучение и радиация, исходящая от горных пород и строительных материалов.
- ✓ Внутреннее облучение – обусловлено радионуклидами, попавшими в организм с воздухом, водой или пищей, и продолжающими излучать внутри тела.

Радиационный фон нашей планеты формируется из нескольких компонентов: 1) Естественный (природный) радиационный фон – создаётся ионизирующим излучением природного происхождения. Он включает воздействие космических лучей, приходящих из космоса, и излучение земных радионуклидов, содержащихся в горных породах, почве, воздухе, воде и живых организмах. В литературе этот компонент часто называют просто естественным радиационным фоном. 2) Технологически изменённый естественный фон – возникает тогда, когда природные источники радиации начинают воздействовать на человека в результате человеческой деятельности. Иными словами, излучение исходит от тех же природных радионуклидов, но его уровень повышен из-за

технологических процессов – например, при добыче и переработке полезных ископаемых, использовании строительных материалов с повышенной радиоактивностью и т.д. 3) Искусственный радиационный фон – формируется за счёт источников, созданных человеком. К ним относятся медицинские радионуклиды, выбросы от ядерных установок, последствия ядерных испытаний и другие техногенные источники ионизирующего излучения.

Основная часть:

Рассмотрим каждый компонент более детально.

1. **Земные источники излучения**.

Земные источники ионизирующего излучения являются основным фактором естественного радиационного фона, оказывающим влияние как на внешнее, так и на внутреннее облучение человека. 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 1.

В природе существует три основных радиоактивных семейства – урановое (^{238}U), ториевое (^{232}Th) и актиноурановое (^{235}U). В ходе их распада образуется около сорока различных радиоактивных изотопов, которые последовательно превращаются друг в друга, формируя устойчивые цепочки радиоактивных превращений. Средняя эффективная эквивалентная доза внешнего облучения, получаемая человеком от земных источников, составляет примерно 0,35 мЗв в год. Это значение немного выше дозы, обусловленной воздействием космического излучения на уровне моря. Однако распределение природной радиации по поверхности Земли неравномерно. В некоторых районах наблюдаются значительно повышенные уровни излучения. Например, на юго-западе Индии, вдоль узкой прибрежной полосы, расположены песчаные территории, обогащённые торием. Около 70 тысяч человек, проживающих в этом регионе, получают в среднем около 3,8 мЗв в год. Согласно статистическим данным, в таких странах, как Франция, Италия, Япония и США, приблизительно 95% населения подвергаются годовой дозе облучения в диапазоне от 0,3 до 0,6 мЗв, около 3% населения – до 1 мЗв, и примерно 1,5% – получают свыше 1,4 мЗв в год.

Когда человек находится внутри помещения, его доза внешнего облучения изменяется под действием двух противоположных факторов: 1) Экранирующее воздействие здания – стены и перекрытия частично ослабляют поступающее извне ионизирующее излучение, в первую очередь космическое и гамма-излучение от природных источников, находящихся в грунте. 2) Излучение строительных материалов – сами конструкции зданий могут служить источником радиации, поскольку содержат естественные радионуклиды, такие как калий-40 (^{40}K), радий-226 (^{226}Ra) и торий-232 (^{232}Th). Величина дозы облучения внутри помещений зависит от содержания этих изотопов в строительных материалах. Мощность дозы в зданиях обычно изменяется в пределах от $4 \cdot 10^{-8}$ до $12 \cdot 10^{-8}$ Гр/ч. В среднем в каменных, кирпичных и бетонных домах уровень внешнего

облучения примерно в 2-3 раза выше, чем в деревянных постройках, что связано с большей радиоактивностью минеральных материалов.

Таблица 1 – Радиоактивные изотопы, изначально присутствующие на Земле.

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-распад
Калий-40	$3 \cdot 10^{-16}$	$1.3 \cdot 10^{9}$	(β- распад, γ-распад
Ванадий-50	$4.5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{14}$	γ-распад
Рубидий-87	$8.4 \cdot 10^{-5}$	$4.7 \cdot 10^{10}$	β-распад
Индий-115	$1 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{14}$	β-распад
Лантан-138	$1.6 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{11}$	β-распад, γ-распад
Самарий-147	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{11}$	α-распад
Лютеций-176	$3 \cdot 10^{-8}$	$2.1 \cdot 10^{10}$	β-распад, γ-распад

В теле человека постоянно присутствуют природные радионуклиды, поступающие из окружающей среды – в основном через дыхательные пути и органы пищеварения. Главными радиоактивными элементами, встречающимися в земной коре, являются калий-40, рубидий-87, а также изотопы, принадлежащие к двум основным радиоактивным семействам – урановому и ториевому. Эти долгоживущие изотопы существуют с момента формирования Земли и постоянно присутствуют в природной среде.

Особое значение имеет калий-40, который играет важную роль в биологических процессах. Калий является необходимым элементом обмена веществ, поэтому радиоактивный изотоп калия неизбежно участвует во внутреннем облучении организма, воздействуя на ткани и органы. Средняя доза внутреннего облучения человека, обусловленная природными радионуклидами, составляет примерно 1,35 мЗв в год. Наибольший вклад – более 55% – вносит радон (Rn) и продукты его распада. Радон представляет собой тяжёлый инертный газ без цвета, запаха и вкуса, который попадает в лёгкие при дыхании и вызывает облучение их слизистой оболочки. Радон выделяется из земной коры практически повсюду, однако его концентрация в воздухе сильно варьирует в зависимости от геологических условий. Наиболее значительное облучение человек получает внутри помещений, особенно если они плохо проветриваются: концентрация радона в закрытых домах в среднем примерно в восемь раз выше, чем на открытом воздухе. Дополнительными источниками радона являются строительные материалы, особенно те, что содержат природные радионуклиды – например, гранит, пемза, кальций-силикатные блоки, шлаки и некоторые другие. Газ может проникать в здания из грунта, через трещины в стенах и перекрытиях, вентиляционные каналы, а также поступать вместе с природным газом и водой.

В среднем эффективная доза внутреннего облучения, связанная с поступлением природных радионуклидов в организм, составляет около 1,35 мЗв в год. Это примерно в два раза больше, чем доза внешнего облучения, обусловленная воздействием тех же источников, которая равна приблизительно 0,65 мЗв в год. Таким образом, суммарная среднегодовая доза облучения человека от естественных источников радиации достигает около 2 мЗв/год. Для некоторых групп населения, проживающих в районах с повышенным естественным фоном, эта величина может быть существенно выше – иногда превышая среднее значение почти на порядок. Следовательно, именно земные источники радиации играют основную роль в формировании естественного радиационного фона человека. Их вклад оценивается примерно в 70% от общей годовой дозы, получаемой от всех природных источников излучения.

2. **Космическое излучение**.

Космическое излучение – это поток высокоэнергетических частиц, приходящих из космоса, часть которых достигает поверхности Земли и становится причиной внешнего и внутреннего облучения. Различают космическое излучение галактического и солнечного происхождения. При этом выделяют первичное космическое излучение, поступающее в околоземное пространство, и вторичное излучение, возникающее при взаимодействии космического излучения с атмосферой Земли. Первичное космическое излучение состоит из излучения галактического и солнечного. Первичные космические лучи представляют собой поток частиц высоких энергий, приходящих на Землю из космоса и возникающих в процессе термоядерных реакций в недрах Солнца и звезд. Первичное космическое излучение состоит из протонов (ядра водорода) – 85%, альфа-частиц (ядра гелия) – 13%, ядер атомов лития, бериллия, углерода, азота и кислорода и др. кроме того в состав космического излучения входят электроны, позитроны, гамма-кванты и нейтрино. Лишь немногие первичные космические лучи достигают поверхности Земли, т.к. они взаимодействуют с атомами воздуха, рождая потоки частиц вторичного космического излучения. Первичные космические частицы обладая огромной энергией (в среднем 10 ГэВ) и скоростью, взаимодействуют с ядрами атомов, составляющих атмосферу, и рождают вторичное излучение.

Вторичное космическое излучение включает в себя поток электронов, нейтронов, мезонов и фотонов, возникающих при взаимодействии первичных космических лучей с атмосферой Земли. Максимум интенсивности этого излучения наблюдается на высотах 20-30 км, тогда как у поверхности Земли его уровень составляет всего около 0,05% от первоначальной величины. На уровне моря поглощённая мощность дозы космического излучения в воздухе равна примерно 32 нГр/ч, причём основная доля этого излучения связана с мюонами. Вклад нейтронов при этом значительно меньше – около 0,8 нГр/ч по мощности поглощённой дозы, что соответствует эквивалентной дозе около 2,4 нЗв/ч. В целом за счёт космического излучения человек получает примерно 0,35 мЗв в год.

Космическое излучение воздействует на всю поверхность планеты, но его интенсивность неодинакова и зависит от нескольких факторов:

- высоты над уровнем моря – с увеличением высоты доза возрастает;
- географической широты – максимальные значения фиксируются в полярных районах, минимальные – вблизи экватора;
- солнечной активности, которая влияет на плотность потока космических частиц.

Такое распределение связано с действием магнитного поля Земли, которое отклоняет заряженные частицы, ограничивая их проникновение в экваториальные области.

В результате взаимодействия космических лучей с веществом атмосферы и земной коры возникают космогенные радионуклиды – радиоактивные изотопы, образующиеся при ядерных реакциях. Наибольшее значение для человека имеют ^{3}H(тритий), ^{7}Be(бериллий-7), ^{14}C(углерод-14) и ^{22}Na(натрий-22). Эти изотопы поступают в организм с пищей, водой и воздухом, где подвергаются бета-распаду. Особенно важную роль играют тритий (период полураспада – 12,3 года) и углерод-14 (период полураспада – 5730 лет). Последний включается в состав органических соединений организма и распределяется равномерно по тканям. Период биологического полувыведения углерода-14 составляет около 200 суток. Распад углерода-14 сопровождается превращением его в стабильный азот-14, что вызывает трансмутационные изменения в молекулах ДНК. Такие процессы могут нарушать структуру азотистых оснований, изменяя генетический код клетки. По оценкам, около 10% всех спонтанных мутаций связано именно с воздействием углерода-14.

Таблица 2 - Среднее годовое поступление космогенных радионуклидов в организм человека.

Радионуклид	Поступление,Бк/год	Годовая эффективная доза, мкЗв
^{3}H	250	0.004
^{7}Be	50	0.002
^{14}C	20000	12
^{22}Na	50	0.15

С помощью углерода-14 можно определить по останкам людей или животных время их смерти. Пока человек или животное живые, то идет постоянный процесс обновления углерода. После смерти этот процесс прекращается и начинается процесс распада углерода-14. Зная начальное количество и период полураспада можно определить время, прошедшее после смерти животного или 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. Космическое излучение – второй по значимости естественный источник радиационного облучения человека, особенно актуальный для летного состава, горных регионов и жителей высоких широт.

Зарипова Ю.А. Yuliya.Zaripova@kaznu.edu.kz

3. **Антропогенные источники излучения**.

Антропогенные (техногенные) источники ионизирующего излучения возникли в результате научно-технического прогресса. Их роль в радиационном воздействии на человека особенно заметна в медицине, промышленности и при авариях. За счет производственной деятельности люди дополнительно получают облучения от антропогенных источников. В одних случаях отдельные категории населения, в других – значительная часть населения. В ряде случаев могут возникнуть чрезвычайные ситуации, вызванные выбросом радиоактивных веществ. К таким источникам можно отнести:

· тепловые электростанции;

· склады минеральных (фосфорных) удобрений, имею-щих повышенное содержание радионуклидов уранового и торие-вого рядов;

· пожарные дымовые детекторы;

· рентгеновские установки для проверки пассажиров и их багажа в аэропортах;

· установки для контроля качества и структуры сплавов;

· установки для холодной стерилизации перевязочного материала и медицинского инструмента;

· рентгеновские аппараты и установки для диагностики заболеваний человека;

· радиоизотопные материалы для исследования в медицине;

· радиационная терапия для лечения онкологических заболеваний;

· установки для облучения автомобильных шин с целью увеличения срока их пробега;

· установки для контроля толщины некоторых изделий при их производстве;

· приборы для определения толщины покрытий из золота и серебра, наносимые на отдельные изделия;

· установки для контроля износа некоторых деталей технических устройств;

Кроме того, на отдельных объектах содержится значительное количество радиоактивных веществ, в том числе и в местах захоронения радиоактивных отходов, которые представляют опасность для большого числа людей в случае аварий и катастроф.

Ниже приведены в таблице 3 некоторые искусственные источники ионизирующих излучений, используемые в различных отраслях. Уголь, который сжигается на тепловых электростанциях и в котельных содержит значительное количество таких радионуклидов, как: калий-40, уран-238, торий-232 и продукты их распада, что составляет от 7 до 52 Бк/кг. При сгорании

угля радионуклиды выбрасываются в атмосферу в количестве, которое зависит от степени очистки фильтрами.

Источники, используемые в медицинских исследованиях и терапии, стали одним из основных способов антропогенного облучения человека. Вот некоторые примеры: рентгенография зуба – (0,03-3) мЗв, рентгеноскопия желудка – до 0,25 Зв, флюорография – (0,1-0,5) мЗв, рентгеноскопия грудной клетки – (0,1-1) мЗв.

Радиоизотопы используются для исследования различных процессов, протекающих в организме человека. Оценка функции щитовидной железы выполняется с помощью радиоактивного йода, который в незначительных количествах вводится в организм человека, но накапливается в щитовидной железе. По ряду характеристик делается вывод о работе щитовидной железы. Натрий-24 – позволяет определять скорость кровотока и проницаемости сосудов; калий-42 – индикатор биологических процессов; стронций-85 – используется в ампликаторах при лечении кожных и глазных болезней; технеций-99 – применяется для визуализации внутренних органов (изучение функционального состояния щитовидной железы, слюнных желез, сердца, крупных сосудов, скелета, опухолей головного мозга, для исследования печени, почек и др.). Полученная при этом доза примерно равна дозе от рентгеновского излучения при рентгеновских исследованиях; кобальт-60 – применяется в терапии и как индикатор; цезий-137 – применяется в терапии; углерод-14 – медико-биологические исследования; индий-111, 113 – используется для диагностики путем сканирования печени (при диагностике гепатита и церроза), полостей сердца, ангиография почек.

Таблица 3 – Область применения и вид используемых закрытых источников ионизирующего излучения в различных областях.

Область применения	**Вид источника излучения**
Медицина и биология	Ускорители заряженных частиц, рентгеновские и гамма-аппараты, гамма и бета-источники
Сельское хозяйство	Мощные гамма-установки, химические удобрения
Пищевая промышленность	Мощные гамма-установки, радиоизотопные приборы (уровнемеры)
Химическая и легкая промышленность	Мощные гамма-установки, радиоизотопные приборы (уровнемеры, толщиномеры, приборы для снятия статических зарядов)
Металлургия	Ускорители заряженных частиц, рентгеновские аппараты, аппараты для гамма-дефектоскопии, радиоизотопные приборы (уровнемеры)
Строительная индустрия	Ускорители заряженных частиц, рентгеновские аппараты, аппараты для гамма-дефектоскопии

Геология	Нейтронные и гамма-источники, радиоизотопные приборы (уровнемеры)
Научные исследования	Ускорители заряженных частиц, рентгеновские аппараты, мощные гамма-установки, нейтронные и бета-установки
Ядерная энергетика	Нейтронные источники

Наиболее опасными антропогенными источниками ионизирующих излучений являются атомные электростанции в результате аварий на них и возможные взрывы ядерных боеприпасов. Антропогенные источники могут давать значительный вклад в облучение отдельных групп населения. Особенно высоки дозы при диагностических и лечебных процедурах, а также в условиях радиационных аварий.

Заключение:

Таким образом, основные источники ионизирующего излучения делятся на естественные (земные и космические) и антропогенные. Вклад каждого из них в годовую дозу облучения может значительно варьировать в зависимости от условий окружающей среды, образа жизни, профессиональной деятельности и состояния здоровья. Знание характеристик источников необходимо для эффективного обеспечения радиационной безопасности.

Контрольные вопросы:

1) Какие источники ионизирующего излучения считаются естественными, а какие — искусственными? Приведите примеры.
2) Какой природный радионуклид вносит наибольший вклад во внутреннее облучение человека и почему?
3) Назовите состав космического излучения.
4) Дайте краткую характеристику космогенных радионуклидов.
5) Калий-40, степень его опасности для здоровья человека.
6) Примеры использования радиоизотопов в медицине.
7) Какова средняя годовая суммарная доза облучения человека от естественных источников и какие компоненты в неё входят?

Список использованных источников:

1. Санитарные правила "Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности" (Приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 15 декабря 2020 года № ҚР ДСМ-275/2020).
2. Естественные источники радиации http://nuclphys.sinp.msu.ru/radiation/rad_6.htm
3. Щепетова В.А. Радиационная экология: учеб. пособие. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 136 с.

4. Мурзин В.С. Астрофизика космических лучей: Учебное пособие для вузов. – М.: Университетская книга; Логос, 2007. – 488 с.

5. Дворник, А. М., Аверин В.С., Гулаков А.В. Радиационная безопасность: практическое руководство. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2017. – 46 с.

6. Ким Д., Геращенко Л. А. Радиационная экология: учеб. пособие. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – 213 с.

7. Бекман И.Н. Ядерная индустрия. – М.: МГУ. – https://profbeckman.narod.ru/NI.htm