

Радиация (лекция для студентов – 2017).

(лектор – не специалист в области радиоэкологии, информация взята из литературы, в основном, из интернет-литературы, опыта работы с источниками радиации, общения с людьми «радиационных» профессий и т.п.). Следует критически относиться к приведенным цифрам, взятым из интернета, в лекции, на картинках и в таблицах. Цифры из разных источников могут несколько различаться и не всегда верны (заслуга не очень грамотных представителей СМИ). Пример газетной статьи об измерении радиационного фона вплотную к радиоактивному источнику, используемому на каком-то производстве. Неправильные размерности величин радиационного фона – очень частое явление в СМИ. Ионизирующие излучения не воспринимаются органами чувств человека. Для их обнаружения необходимы специальные приборы: радиометры, дозиметры и т.п., с которыми Вы ознакомитесь при выполнении данного физпрактикума. Рассказ об одном сотруднике исследовательского реактора Киевского института физики во время прохождения мною преддипломной практики, который «чувствовал» наличие или отсутствие мощного радиоактивного источника, находящегося в свинцовом контейнере возле двери лаборатории (мои гипотезы: запах ионизированного воздуха или снятие электризации волос на ногах).

1. Необходимость элементарного радиоэкологического образования для населения Украины – основная цель данной беседы, (студенты и школьники, прослушавшие данную лекцию при изучении основ ядерной физики, могут быть распространителями этих, хотя бы элементарных знаний среди населения: родственники, друзья, соседи и т.п.). Это обусловлено нижеследующими обстоятельствами.

1.1. Атомная электроэнергетика дает Украине более 50% общей электроэнергии в настоящее время (середина второго десятилетия 21 века), планируется в ближайшие 20 – 30 лет рост этого вклада более чем вдвое из-за отсутствия в стране значительных запасов углеводородов – уход от энергетической зависимости. Возможно, этому будет препятствовать разработка добычи сланцевого газа.

1.1.1. Наличие в Украине значительных (6-е место в мире) запасов урановой руды (район Желтых Вод и Александрии, другие районы Украины – всего 9 урановых месторождений, разрабатываются пока два, третье вводится в строй). Руда сравнительно дорогая (по среднемировым ценам) из-за глубокого залегания, но своя (недавнее решение руководства отрасли о расширении добычи руды и ее накоплении для собственных нужд не только с химическим обогащением, а и, возможно, с предполагаемым в дальнейшем, хотя и дорогим, но изотопным обогащением).

1.1.2. Наличие в Украине значительных запасов циркониевой руды (Вольногорск). Цирконий широко используется для изготовления корпусов ТВЭЛов (тепловыделяющих элементов) для атомных реакторов, так как изотопы циркония меньше активируются нейтронами. Украина начинает строить свой завод в Кировоградской обл. по изготовлению ТВЭЛов с использованием урана, обогащенного изотопом уран-235, пока в других странах (в основном из России и США).

1.2. Чернобыльская катастрофа, которая еще очень долго будет сказываться на жизни Украины. С другой стороны Чернобыльская зона может служить местом радиационноопасных технологий (изотопное обогащение урана, радиационные могильники и т.п., радиационными могильниками могут служить и отработанные урановые шахты). Основные радиоактивные изотопы, оказавшие наиболее существенное вредное влияние на население Украины, Белоруссии и соседних областей России это изотопы йода-131, стронция-90 и иттрия-90, углерода-14 и др., которые достаточно долго не выводятся из человеческого организма.

Сравнительно высокими были дозы облучения щитовидной железы, особенно у детей, радиоизотопами йода, поступившего в основном с молоком. Отмечено около 1800 случаев рака щитовидной железы. Радиогенного рака других органов у населения не зарегистрировано.

Рассказ о разговоре, подслушанном мною на автовокзале в Киеве о коровьем молоке, о детском питании на молочной кухне, рассказ сотрудницы киевского реактора о клубнике, рассказ об измерениях активности мясных продуктов в минском НИИ ядерной физики. Сплетня или правда о действиях военных по плутонию, инициировавших взрыв реактора. Рассказ об измерениях радиационного фона нашими выпускниками, работавшими в Киеве в то время.

1.3. Украинский гранитный кристаллический щит, расположенный под значительной площадью страны с многочисленными выходами на поверхность. Некоторые местности этого щита включают заметное, а в ряде случаев значительное, вплоть до промышленного, содержание урана (**Желтоводское месторождение, месторождения Кировоградской обл. и др.**). Добываемые в Украине в некоторых районах полезные ископаемые также содержат заметные включения радиоактивных изотопов, например, **в некоторых железорудных шахтах Криворожья** и др. (ранее, особенно **послевоенное, строительство малых домов из доменных шлаков и, соответственно, высокий уровень радиационного фона в таких домах**). В Днепропетровской области имеется ряд гранитных карьеров, например, **Токовский карьер в Апостоловском районе**, изготавливаемые гранитные изделия которого запрещены к применению в населенных пунктах, за исключением кладбищ, бывший гранитный **карьер Красного камня в Днепропетровске** и т.п. Рассказ о плиточках гранита Токовского карьера на лестнице библиотеки ДНУ и поведении жителей села вблизи карьера (ситуация с кражей местным населением полированных гранитных плит Токовского карьера для обустройства своих погребов, дорожек во дворах и т.п.). Рассказ о молодых отдыхающих на скалах вокруг озера карьера Красного камня и результатах дипломной работы по гранитам Днепропетровска.

Пылинки радиоактивного гранита, попадающие внутрь организма (дыхание, еда и т.п.), радиоактивный изотоп радона и продукты его распада (дыхание) – нежелательны, особенно для детей, беременных женщин, кормящих матерей, несмотря на сравнительно малую вероятность неблагоприятных последствий (см. ниже). Гранит красного цвета в Украине, как правило, может содержать в большей или меньшей степени соединения урана (памятники, мемориальные объекты, в т.ч. **гранитный мемориал возле входа в библиотеку ДНУ**). Возможны также граниты и других цветов, серые, желтые (в частности, в других странах) с заметным содержанием соединений и урана и тория. Необходимо отметить также наличие **примесей черных монацитовых песков, содержащих радиоактивный торий, на некоторых пляжах Азовского моря, особенно после штормов (район Мариуполя и др.)**. Радиоактивное семейство урана – **238** (основной изотоп урана, более 99% в естественной смеси изотопов этого элемента) приводит к появлению в атмосферном воздухе радона и продуктов его распада, обуславливающих примерно половину дозы естественного фона ионизирующих излучений для жителя Украины. Применяемые в лечебных целях радоновые ванны должны быть обеспечены хорошей приточно-вытяжной вентиляцией.

В настоящее время на Земле сохранились 23 долгоживущих радиоактивных изотопа, имеющих период полураспада больше 10^7 лет. Наиболее распространенные из них это U^{238} , Th^{232} и K^{40} . Изотопы урана и тория образуют радиоактивные семейства, в которых после нескольких последовательных распадов образуются радиоактивные ядра изотопов инертных газов радона, в основном Rn^{222} , вносящий главный вклад в природное облучение человека. Заканчиваются эти семейства стабильными ядрами изотопов свинца. Небольшой, но все-таки заметный вклад в облучение человека, вносит и изотоп K^{40} , содержащийся в самом его теле и в продуктах питания. *При близком контакте люди слегка облучают друг друга. Конечно, получаемые при этом дозы облучения, существенно ниже фоновых. Полезен и необходим такой контакт или нет, люди решают сами.*

2. Радиофобия или «радиофилия» по отношению к естественной, техногенной и медицинской радиации – необходим разумный подход к этим проблемам.

Радиофобия – боязнь радиации в любых ее проявлениях безотносительно истинного уровня опасности.

«Радиофилия» – здесь под этим подразумевается **непродуманное беззаботное пренебрежение радиационной опасностью.**

Все живое на Земле, в том числе и человек, существует под воздействием естественного радиационного фона, влияние которого невозможно исключить. В различных районах земного шара уровень естественного фона, связанный с содержанием радиоактивных изотопов в земной коре района, отличается более, чем в 10 раз. Эволюция приспособила к влиянию фона все живое, и человека также. Использование радиации в науке, технике, медицине, вооружениях, усилившаяся в последние десятилетия миграция населения по Земле приводят к дополнительному облучению населения. Влияние на человека значительных доз облучения бесспорно вредно, а влияние малых доз пока не очень понятно науке, но исключить малые дозы невозможно.

2.1. Радиофобия в смысле исключения радиоактивности и ионизирующих излучений из жизни человека бессмысленна. Придется менять не только земной шар, но и всю нашу Вселенную и

законы природы. **Радиофобии** способствуют как объективные факторы (крупные радиационные аварии), так и субъективные факторы (некомпетентность, тенденциозное, с нагнетанием страха изложение фактов, и искаженная картина событий в средствах массовой информации, например, – неправильные единицы измерения дозиметрических величин, ошибочные обозначения радиоактивных изотопов, примеры показаний дозиметров при размещении их вплотную к точечным источникам излучения, наведенная радиоактивность облученных тел, как правило, отсутствующая для альфа-, бета-, гамма-излучений, и т.п.). При этом не принимаются во внимание следующие обстоятельства.

2.1.1. Необходимость сравнительного подхода. Например, ценой за использование автомобиля являются десятки тысяч людей, погибающих в мире в авариях при ДТП (в современной Украине около 4 – 5 тыс. в год, точные статистические данные в СМИ отсутствуют) и значительно больше получающих травмы, страдающих от загрязнения выхлопными газами автомобилей, от химических загрязнений, нарушений экологии, смертность от алкоголя порядка 10 тыс. в год, и т.п. Некоторые исследования воздействия радиации на людей в результате атомных бомбардировок Японии в 1945 году и аварии на Чернобыльской АЭС показали, что неблагоприятные последствия радиации для здоровья выживших равносильны (или даже несколько уступают) последствиям более распространенных зол: загрязнения воздуха, курения, ожирения.

2.1.2. Экономическая необходимость использования АЭС в современном мире (до создания термоядерных установок), обусловленная ограниченностью и ростом стоимости углеводородных энергоносителей для тепловых электростанций, меньшими радиоактивными (при безаварийной эксплуатации) и значительно более низкими химическими загрязнениями окружающей среды, гораздо меньшими объемами транспортных перевозок для АЭС на единицу производимой электроэнергии, получением редкоземельных элементов из продуктов деления и т.п. Единственный недостаток – относительная дороговизна безопасных хранилищ радиоактивных отходов и весьма незначительное выделение радиоактивных выбросов, в основном, инертных газов.

Годовая эффективная эквивалентная доза излучения населения Земли от обычных выбросов атомных электростанций мира более, чем на порядок, ниже аналогичной дозы от рентгеновских установок, применяемых в медицине.

Количество блоков АЭС: США – более 100 (суммарная мощность около 10^5 МВт), Франция, Япония – более 50 (общая суммарная мощность около 10^5 МВт), Россия – 30 (суммарная мощность около $2 \cdot 10^4$ МВт), Украина – 15 (суммарная мощность около $1,2 \cdot 10^4$ МВт) и др. страны. Всего, по данным МАГАТЭ, в 30 странах мира действуют около 450 реакторов. Каждый гигаваттгод энергии (такова средняя производительность энергоблока в год) обходится в 30 тонн радиоактивных отходов, т.е. около 15 тыс. тонн/год по всему земному шару или 4 – 5 товарных составов по 50 вагонов.

2.1.3. Необходимость широкого использования радиоактивных изотопов и жесткого электромагнитного излучения (рентгеновское и тормозное излучения) в науке и медицине, промышленности и сельском хозяйстве и т.п., без которого невозможно развитие этих отраслей.

Следует отметить, что радиация – это не самая главная причина для постоянного беспокойства. Например, по разработанной в США шкале относительной опасности различных видов антропогенного воздействия на человека, радиация в США по степени вредности находится на 26-м месте, а первые два места занимают тяжелые металлы и химические токсиканты. Согласно экспертным оценкам, вклад Чернобыля в суммарную коллективную дозу радиации, которую получают украинцы, белорусы и россияне, проживающие на загрязненных территориях, в предстоящие, например, с 2000 г. 50 лет, составит всего 2%, тогда как около 60% дозы будут определяться естественной радиоактивностью – радон, а остальное – строительной индустрией и медицинской рентгенотехникой.

2.2. «Радиофилия», в смысле беззаботного, пренебрежительного отношения к ионизирующим излучениям в обычной жизни, также нежелательна. Следует иметь в виду, что радиация, связанная с нормальным развитием ядерной энергетики, составляет лишь малую долю радиации, в жизнедеятельности человека. Значительно большие дозы, чем от ядерной энергетики, мы получаем от других источников, хотя и вызывающих меньше нареканий у радиофобов. Применение рентгеновских лучей в медицине, сжигание угля, газа и нефти, добыча различных полезных ископаемых, (все, что находится в земной коре в той или иной мере содержит радиоактивность), использование воздушного транспорта (интенсивность космического излучения существенно растет с высотой), потребление в быту артезианских вод, длительное пребывание в непроветриваемых, и особенно подвальных помещениях (см. ниже – радон), могут привести к значительному увеличению уровня облучения. В этом плане не стоит пренебрежительно относиться к

возможному дополнительному облучению, ограничивая его разумным образом (см. ниже – «Биологическое действие ионизирующих излучений»). Отметим, что зарождение жизни на Земле и ее последующая эволюция протекали в условиях постоянного воздействия естественной радиации (радиоактивность пород земной коры, космическое излучение).

3. Ионизирующие излучения – состав, действие на вещество (см. «Введение в физпрактикум»).

Основные виды ядерных излучений: α , β , γ – это излучение природных и техногенных радиоактивных изотопов, а также нейтроны, протоны и осколки атомных ядер при ядерных реакциях. Космич. излучение – это все вышеперечисленное + мезоны и другие элементарные частицы. Таким образом, ионизирующие излучения – это корпускулярное излучение и жесткое (значительная энергия) электромагнитное излучение (γ – излучение при ядерных переходах из возбужденного состояния в менее возбужденное или основное, рентгеновское (характеристическое) излучение при атомных переходах в электронной оболочке, тормозное излучение при движении заряженных частиц с ускорением). Характеристическое и тормозное излучения сопровождают работу рентгенустановок (рентгеновское излучение), тормозное – характерно для ускорителей заряженных частиц, эти виды излучений присутствуют и в космическом излучении.

Альфа-излучение имеет малую длину пробега частиц в веществе и характеризуется слабой проникающей способностью. Оно не может проникнуть даже сквозь кожные покровы тела. Пробег альфа-частиц в воздухе, с характерной для них энергией порядка нескольких МэВ, составляет единицы см, а в биологической ткани лишь десятки микрон. **Альфа-излучающие нуклиды представляют большую опасность только при поступлении внутрь организма через органы дыхания (радон и продукты его распада) и пищеварения, открытые раны и ожоговые поверхности.** Бета-излучение обладает большей, чем альфа-излучение, проникающей способностью. Пробег бета-частиц в воздухе может достигать нескольких метров (в зависимости от их энергии), а в биологической ткани нескольких сантиметров. Так пробег электронов со сравнительно большой энергией порядка нескольких МэВ в воздухе составляет 10 – 20 м, а в биологической ткани 2 – 3 см. При меньших энергиях электронов пробег существенно падает. Гамма-излучение имеет значительно более высокую проникающую способность. Под его действием происходит облучение всего организма, в т.ч. и внутренних органов.

Отметим, что большинство обычных дозиметров со счетчиками Гейгера-Мюллера и сцинтилляционными детекторами регистрируют только гамма-излучение и возможно еще жесткое бета-излучение. Альфа-излучение и мягкое бета-излучение для обычных бытовых дозиметров – «невидимо». Оно может регистрироваться только специальными детекторами, конструкция которых обеспечивает проникновение этих излучений внутрь чувствительного объема детектора.

Взаимодействие с веществом для всех видов ядерных излучений сводится в конечном итоге к взаимодействию с ним первичных движущихся заряженных частиц (α , β , – излучение, протоны и др. заряженные частицы) или вторичных движущихся заряженных частиц (электроны фото- и комптон-эффекта для гамма-, рентгеновского и тормозного излучений, ядра отдачи или осколки ядер при ядерных реакциях с нейтронами, электроны и позитроны рождения пар и т.п.). Результатом такого взаимодействия является, в основном, ионизация атомов вещества вдоль траектории первичной или вторичной заряженной частицы в процессе ее постепенного торможения, за счет неупругих столкновений с атомами. Именно в связи с этим **ядерные излучения и называют ионизирующими, так как основной эффект взаимодействия ядерных излучений с веществом – ионизация вещества.** Регистрация ядерных излучений детекторами основана на ионизационном эффекте и ионизационный эффект является главным в биологическом действии ядерных излучений на живые организмы.

4. Измерение действия ионизирующих излучений. Дозы излучения. Мощности доз излучения (доза в единицу времени), (см. также лаб. раб. №3 и Таблицы основных факторов радиационной нагрузки человека).

В радиологии принято характеризовать степень воздействия ионизирующих излучений на вещество или биологический объект величиной полученной дозы излучения. При этом различают следующие понятия доз: экспозиционная доза, поглощенная доза, эквивалентная доза и эффективная доза и, соответственно, мощности этих доз (доза равна: мощность умножить на время нахождения объекта под этой мощностью, экспериментально различные обычные дозиметры и

радиометры измеряют мощность дозы). В целом для населения страны или Земли говорят и о коллективной эффективной дозе. Исторически первой величиной, отражающей воздействие ионизирующих излучений на вещество явилась **экспозиционная доза, отражающая степень ионизации модельной среды – атмосферного воздуха при нормальных условиях под действием радиации, единица меры которой получила название – рентген (Р)**. Отметим, что экспозиционная доза, т.е. степень ионизации воздуха, сравнительно легко и точно экспериментально измеряется по степени его проводимости. **В настоящее время рентген – это внесистемная единица (относительно системы СИ, где единица экспозиционной дозы это кулон на килограмм, Кл/кг), но по-прежнему широко применяемая в практике радиационных измерений (в т.ч. санитарными службами, МЧС и военными)**. Рентген, как мера радиации, был введен в начале 20-го века при измерении ионизирующего излучения от радия, полученного Марией Кюри. Доза в 1 рентген, по уточненным в дальнейшем данным, соответствует образованию $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов одного знака в 1 см^3 атмосферного воздуха при нормальных условиях (температура 0°C , давление 760 мм рт.ст.). **Рентген – мера, так называемой, экспозиционной дозы излучения (X), определяемой зарядом частиц (ионов) одного знака (dQ), образующихся в элементарном объеме вещества массой (dm), при полном торможении всех (первичных и вторичных, образованных излучением) заряженных частиц: $X = dQ/dm$** . С учетом величины элементарного заряда и плотности атмосферного воздуха при нормальных условиях легко определить, что $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$. Понятие экспозиционной дозы применяется, в основном, только для гамма-излучения. Основная масса как бытовых, так и профессиональных дозиметров измеряют мощность экспозиционной дозы (величина экспозиционной дозы легко пересчитывается по времени пребывания в месте измерения), хотя дополнительно градуируются предприятием-изготовителем и в единицах мощности поглощенной и эквивалентной дозы (см. ниже) с помощью внутриприборного пересчета (чаще всего недостаточно точного). Отметим, что **именно гамма-излучение (и сравнительно жесткое бета-излучение для бета-активных изотопов) преобладают в излучении любого радиоактивного источника уже на расстоянии порядка $1 \div 2$ м от него**, остальное возможное излучение (альфа- и мягкое бета-излучение) из-за низкой проникающей способности поглощается атмосферным воздухом (и, дополнительно, одеждой и верхним слоем кожи человека). **Природный, внешний для человека, радиационный фон также обусловлен, главным образом, гамма-излучением (может присутствовать и жесткое бета-излучение)**.

Именно интенсивность гамма-излучения или мощность экспозиционной дозы излучения (единицы измерения – Р/с или Кл/(кг·с)) определяются обычно при радиационных измерениях бытовыми или промышленными дозиметрами, в которых детекторами чаще всего служат счетчики Гейгера-Мюллера – трубка катода из сравнительно тонкого (доли мм) металла, по оси которой расположена тонкая проволока анода. Счетчик заполнен газом, в основном инертным, с некоторыми добавками для гашения самостоятельного разряда, возникающего в газе при его ионизации движущимися к аноду электронами. Факт регистрации гамма-кванта – электрический импульс. Первичный электрон фотоэффекта или комптон-эффекта попадает внутрь счетчика из материала катода (с газом гамма-квант практически не взаимодействует из-за малой его плотности).

Отметим, что излучение 1 г радия (Ra^{226}) на расстоянии 1 м создает мощность экспозиционной дозы примерно 1 Р/час (историческое обоснование этой единицы измерения).

Большинство эффектов воздействия ионизирующих излучений на вещество (физические, химические, биологические и др.) принято определять, главным образом, поглощенной веществом энергией излучения, преобразованной в среде в другие виды энергии. Эту энергию принято считать основной мерой для оценки влияния ионизирующих излучений на вещество. Энергия излучения, поглощенная веществом, складывается, в основном, из энергии, затраченной на ионизацию и возбуждение атомов и молекул среды, из энергии, затраченной на химические, структурные и ядерные превращения в среде, а также из энергии, идущей на увеличение теплового движения, облучаемые тела нагреваются, но весьма незначительно.

В системе СИ основной величиной, характеризующей воздействие ионизирующего излучения на вещество является *поглощенная доза излучения (D)*, определяемая энергией (dE), переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе (dm) вещества в этом объеме: $D = dE/dm$. Если принять среднюю энергию образования 1 пары электрон-ион в атмосферном воздухе под действием движущихся электронов, вызванных гамма-излучением,

равной примерно 34 эВ (не путать со средним потенциалом ионизации, равным для молекул воздуха примерно 14 эВ, налетающий на атом электрон должен иметь достаточную энергию, чтобы удалиться от иона вместе с выбитым им электроном), то при экспозиционной дозе 1 Р атмосферному воздуху массой 1 кг будет передана энергия $88 \cdot 10^{-4}$ Дж.

Единицей поглощенной дозы излучения в системе СИ является единица, называемая Грэй (Гр) или джоуль на килограмм (Дж/кг). $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$ (Л. Грэй – английский радиобиолог). Широко используется также внесистемная единица дозы – «рад» (от слова – радиация), соответствующая поглощению энергии излучения в сто раз меньшей: $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр} = 10^{-2} \text{ Дж/кг}$.

Поглощенная доза излучения, отнесенная к единице времени, есть мощность поглощенной дозы. Единицы мощности поглощенной дозы: $\text{Гр/с} = \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{с})$ и, соответственно, рад/с .

Поглощенная доза излучения может быть найдена из физических соображений, если известны определенные параметры излучения (состав и энергетический спектр) и облучаемого объекта (элементный состав, форма и размеры, плотность, кристаллические свойства и т.п.), а также характеристики взаимодействия с веществом, как первичного излучения, так и вторичного излучения, образованного в среде. Однако такие расчеты в большинстве случаев сложны и не обладают достаточной точностью.

Величины поглощенных доз обычно определяют экспериментально, как для неорганических соединений (важно для конструкций в атомных реакторах, подвергающихся интенсивному радиационному воздействию), так и для биологических объектов (эксперименты на животных, облучение моделей человека, выполненных из тканеэквивалентных материалов и т.п.). Существенную роль в последствиях радиационного воздействия, особенно на животных и человека, играет не только величина поглощенной дозы, но и ее распределение во времени. Одна и та же доза излучения, полученная человеком за сравнительно небольшой период, влияет на организм значительно сильнее, чем та же доза, полученная постепенно, например, за всю жизнь.

Эквивалентная доза излучения (Н). Понятие эквивалентной дозы излучения вводится, главным образом, для биологических объектов, в основном, для человека.

Совокупный эффект, вызываемый воздействием ионизирующего излучения на человека, на его отдельные органы, не полностью характеризуется величиной поглощенной дозы D, а определяется действием еще ряда причин, главными из которых являются вид ионизирующего излучения и его энергетический спектр. Влияние этих причин учитывается, в основном, по результатам многочисленных экспериментов в виде безразмерного коэффициента к величине поглощенной дозы, называемого фактором преобразования энергии или фактором качества, а в радиобиологии – фактором относительной биологической эффективности или радиационным взвешивающим фактором W.

Значительное влияние на последствия облучения имеют также распределение плотности потока излучения и поглощенной дозы по облучаемому объекту, зависящей от материала, структуры и формы облучаемого тела, распределение поглощенной дозы во времени и т.п.

Различное действие того или иного вида ядерных излучений на биологическую ткань связано, прежде всего, с различием в плотности ионизации, создаваемой в веществе вдоль пути заряженной частицы первичного или вторичного излучения, определяемой ЛПЭ излучения (линейная потеря энергии). Так как удельная ионизирующая способность частиц зависит от их заряда и массы, то, соответственно, и радиационный взвешивающий фактор велик для частиц большего заряда и большей массы. **При большой плотности ионизации велико влияние неблагоприятных биохимических реакций, так как велика концентрация свободных радикалов.** Гамма-излучение и нейтронное излучение непосредственно ионизации в среде не вызывают, поэтому поглощение энергии излучения этого вида связано с ионизацией вещества вторичными частицами, для γ -квантов – электронами, для нейтронов – ядрами отдачи и продуктами распада активированных нейтронами ядер. Соответственно и радиационный взвешивающий фактор для γ и нейтронного излучения учитывает ионизирующую способность вторичных частиц, а для нейтронного излучения еще и некоторое активирование облучаемого объекта, т.е. образование радиоактивных изотопов за счет ядерных реакций нейтронов с ядрами атомов вещества объекта.

Произведение поглощенной дозы на соответствующий фактор преобразования энергии есть дозовый эквивалент или эквивалентная доза излучения Н. По определению: $H = D \cdot W$. Дозовый эквивалент с известной полнотой характеризует эффект воздействия ионизирующих излучений на облученный объект. Именно эквивалентная, а не поглощенная доза, определяет степень

радиационного повреждения организма в целом или его отдельного органа. Одинаковая поглощенная доза излучения разного вида и энергии приводит к значительно отличающимся последствиям радиационного воздействия.

Единицей эквивалентной дозы излучения в системе СИ является единица, называемая **зиверт (Зв)**, (Г. Зиверт – шведский радиобиолог). Физическая размерность зиверта такая же, как и у грэя, т.е. Дж/кг, $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$, но численное значение эквивалентной дозы определяет радиационный взвешивающий фактор, различный для различных ионизирующих излучений. **Широко используется также внесистемная единица эквивалентной дозы – «бэр» (биологический эквивалент рада). $1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Зв}$.**

Эквивалентная доза излучения, отнесенная к единице времени, есть мощность эквивалентной дозы. Единицы мощности эквивалентной дозы: $\text{Зв/с} = \text{Гр/с} = \text{Дж/(кг}\cdot\text{с)}$ и, соответственно, **бэр/с**.

Значения радиационного взвешивающего фактора, полученные в результате наблюдений радиационных повреждений человека и принятые в мировой практике радиобиологии (см. таблицы):

Рентгеновское и гамма-излучение, все энергии	1
Бета-частицы (электроны, позитроны), мюоны, все энергии	1
Тепловые нейтроны	5-10
Быстрые нейтроны	10-20-10-5
Протоны с энергией > 2 МэВ	5
Альфа-излучение, ядра отдачи	20

Таким образом, поглощенная данным человеческим органом или организмом в целом доза, например, в 1 Гр от α -излучения (эквивалентная доза 20 Зв) вызовет в 20 раз более серьезное радиационное поражение, чем такая же поглощенная доза в 1 Гр от γ - или β -излучения (эквивалентная доза 1 Зв). Имеется, конечно, определенная приближенность в приведенном соотношении уровней радиационных поражений, связанная со свойствами конкретных организмов, их состоянием и т.п.

Отметим еще особенность радиационного воздействия, связанную не только с внешним, а и с возможным внутренним (более опасным) облучением при попадании радиоактивных веществ, особенно источников α -излучения, внутрь организма при дыхании (например, атмосферный радон и продукты его распада), питания (работа в условиях радиоактивного заражения местности, работа с радиоактивными веществами в открытом виде) и т.п. Очевидно, что внешнее и внутреннее облучение человека одинаковыми потоками ионизирующего излучения одинакового состава и энергии приведут к разным эквивалентным и, соответственно, эффективным (см. далее) дозам.

Эффективная доза излучения. Различные органы человека имеют разную чувствительность к влиянию ионизирующих излучений, что учитывается с помощью понятия **эффективной дозы излучения E** для всего организма человека в целом. $E = \sum H_i \cdot W_{ti}$, где суммирование проводится по всем отдельным органам человеческого тела. H_i эквивалентная доза, полученная данным органом, W_{ti} безразмерный **тканевый взвешивающий фактор** для данного органа. Разные части тела и органы человека могут находиться от источника излучения на разных расстояниях, могут по разному экранироваться защитными приспособлениями, по разному адсорбировать радиоактивные вещества, попадающие внутрь организма и, соответственно, получить различные эквивалентные дозы H_i . Величины W_{ti} определены опытом радиобиологии. Не приводя конкретных, принятых в радиобиологии, значений W_{ti} отметим, что **наиболее чувствительными к ионизирующим излучениям являются некоторые клетки половых органов (гонады), красный костный мозг, легкие, желудок и некоторые части кишечника, хрусталик глаза, а наименее чувствительными – кисти рук, стопы, кожа.** Эффективная доза, как и эквивалентная, измеряется в СИ в зивертах (или, соответственно, в бэрах). **Именно величина эффективной дозы определяет медицинские мероприятия по лечению облученного человека.**

5. Характерные величины эквивалентных (эффективных) доз в жизни человека.

Приведем характерные величины эквивалентных доз и мощностей эквивалентных доз, встречающихся в радиобиологии. **Уровень естественного, природного фонового облучения человека, создаваемый радиоактивными веществами, содержащимися в окружающей природе, в теле самого человека (например, радиоактивный изотоп K^{40}), а также космическим излучением, зависит от района Земли, высоты над уровнем моря и составляет величину порядка 0,01-0,02**

мбэр/ч (или 10 – 20 мкР/ч, т.к. естественный фон обусловлен, в основном, гамма- и бета-излучением) для разных местностей Украины и до 0,1 мбэр/ч, и даже выше, для некоторых, в т.ч. населенных, районов Индии, Бразилии, Ирана, Франции, Швеции и др. Удовлетворительных доказательств того, что излучение в этом диапазоне мощностей эквивалентных доз вредно (а может даже полезно) для природы человека, пока нет. Значительные дозы ионизирующих излучений, безусловно, опасны для организма человека. В соответствии с этим санитарными правилами Украины для лиц, профессионально связанных с облучением (персонал категории «А» облучаемых лиц), установлена предельно допустимая эквивалентная (эффективная) доза облучения или лимит дозы величиной в 20 мЗв за год (кроме возможных доз облучения, обусловленных естественным и техногенным фоном, а также возможными медицинскими процедурами) из расчета 1700 рабочих часов за этот период времени при 6-ти часовом рабочем дне (можно рассчитать предельно допустимую мощность эквивалентной дозы на рабочем месте). В соответствии с законами Украины лимит годовой дозы от техногенных и медицинских источников радиации (дополнительный к естественному фону) для любых лиц из всего населения, равен 1 мЗв, что примерно соответствует половине годовой дозы от природного радиационного фона (можно также рассчитать дополнительную к естественному фону допустимую для любого гражданина страны мощность эквивалентной дозы излучения в повседневной жизни).

Необходимо отметить, что еще в 60-х годах в СССР, а в некоторых европейских странах с высоким уровнем радонового фона и в настоящее время, лимит дозы для «профессионалов» в 2,5 – 3 раза выше, чем сейчас в Украине.

Согласно различным нормативным документам Украины по радиации в строительстве, принятым в начале 90-х годов и Нормам радиационной безопасности Украины НРБУ-97, (принятие этих документов, по-видимому, инициировано аварией на ЧАЭС и работой над радоновой проблемой в США и Европе) уровень экспозиционной дозы в домах новой постройки не должен превышать 30 мкР/ч, а в домах старой постройки 50 мкР/ч. В таких домах постоянно, 24 часа в сутки проживают беременные женщины, кормящие матери, грудные младенцы. Радиационный фон в домах обусловлен, в основном, применяемой часто «плохой» гранитной щебенкой в железобетонных перекрытиях, а также материалом стен, часто содержащих шлаки металлургических заводов применяющих, возможно, радиоактивные железные руды, например криворожские.

Отметим, что согласно Основным санитарным правилам Украины (ОСПУ 2005 г.) на рабочем месте оператора рентгеновской установки дополнительная к естественному фону (в корпусе 12 – 15 мкР/ч, в чем можно убедиться, выполняя лаб. раб. по дозиметрии) мощность экспозиционной дозы не должна превышать 10 мкР/ч при 6-часовом рабочем дне (сравнить со строительными нормативами).

Средствами обычной современной медицины в организме человека практически нельзя обнаружить вредные детерминированные (не стохастические) последствия длительного облучения при допустимой дозе 20 мЗв за год (2 бэра за год), что за 30 лет рабочего стажа дает суммарную дозу 0,6 Зв или 60 бэр. Такая же доза общего облучения, полученная за несколько минут, часов, дней или недель, приводит к небольшим, но заметным признакам лучевого поражения. Доза общего облучения в 6 Зв (600 бэр) за короткий период, без соответствующего лечения, считается фактически смертельной (эти данные подчеркивают роль в эквивалентной дозе фактора, учитывающего распределение этой дозы во времени). Приведенные величины эффективных доз указаны для всего организма человека в целом. Применяемые в медицине эквивалентные дозы для частей тела или отдельных органов могут быть значительно выше (флюорография, рентгенография и рентгеноскопия, томография, облучение при онкозаболеваниях и т.п.).

Необходимо отметить, что современная радиационная медицина предполагает рост вероятности неблагоприятных стохастических последствий ионизирующего облучения с ростом дозы, даже в области небольших доз, сравнимых с дозами от естественного фона, избежать влияния которого не представляется возможным, хотя и появились работы (пока что недостаточная статистика), утверждающие определенную полезность малых доз радиации для тренировки биопроцессов в организме человека по уничтожению поврежденных радиацией клеток. *Эти соображения и должны формировать разумное поведение человека в вопросах радиационной безопасности.*

10. Связь экспозиционной, поглощенной и эквивалентной доз. Керма.

Единицы экспозиционной дозы рентгеновского и γ -излучения легко сопоставить с энергетическими единицами поглощенной и эквивалентной дозы, используя тот факт, что средняя работа ионизации в воздухе (средняя энергия образования одной пары электрон-ион) для γ -излучения со спектром энергий до 3 МэВ приблизительно постоянна и равна 34 эВ. Тогда при экспозиционной дозе 1 Р в 1 см³ воздуха поглощается $1,132 \cdot 10^{-8}$ Дж энергии, а в 1 кг воздуха соответственно 8,8 мДж, т.е. экспозиционной дозе 1 Р соответствует поглощенная доза 8,8 мГр (0,88 рад) или эквивалентная доза 8,8 мЗв (0,88 бэр) для атмосферного воздуха [16]. Экспериментально установлено, что в среднем в 1 кг мягкой ткани человека или животного при облучении экспозиционной дозой 1 Р поглощается 9,3 мДж энергии, т.е. экспозиционной дозе рентгеновского и γ -излучения в 1 Р соответствует поглощенная доза 9,3 мГр (0,93 рад) или эквивалентная доза 9,3 мЗв (0,93 бэр) для тела человека (радиационный взвешивающий фактор для рентгеновского и γ -излучения равен 1). Аналогичные соотношения в отношении поглощенной и эквивалентной доз справедливы и для β -излучения. Расчет эффективной дозы может быть произведен с учетом тканевого взвешивающего фактора сравнительно точно для γ -излучения и менее точно для β -излучения [17]. Таким образом, по измерениям мощности экспозиционных доз в местах нахождения тела человека и времени его пребывания там, легко установить поглощенную, эквивалентную и эффективную дозу. **Для грубых оценочных расчетов по радиационной безопасности человека в т.ч. и в данной лабораторной работе, для рентгеновского и γ -излучения, а также β -излучения, можно считать, что 1 Р экспозиционной дозы соответствует 1 раду поглощенной дозы и 1 бэру эквивалентной дозы.**

В последние годы в радиологии для нейтрального излучения (γ -излучение и нейтроны) вместо понятия экспозиционной дозы и ее мощности предпочитают пользоваться физически более строгими понятиями керма (от англ. kinetic energy released into material) и мощность кермы.

Керма – суммарная начальная кинетическая энергия заряженных частиц, образованных в единице массы облучаемой среды под действием косвенно ионизирующего излучения. Для рентгеновского и γ -излучения в условиях электронного равновесия в пренебрежении тормозным излучением керма фактически является энергетическим эквивалентом экспозиционной дозы. В системе СИ единица кермы – грей. Внесистемная единица кермы – рад. При больших энергиях излучения керма существенно превышает поглощенную дозу, так как часть энергии покидает облучаемое тело в виде тормозного излучения и быстрых электронов. Отметим, что экспериментальная простота измерения степени ионизации воздуха по его проводимости и соответствующая градуировка дозиметров в единицах экспозиционной дозы, пока конкурирует с энергетическими (калориметрическими и т.п.) измерениями для градуировки дозиметров в единицах поглощенной дозы.

6. Биологическое действие ионизирующих излучений (соматические и стохастические эффекты). Проблема вредности или полезности малых доз.

В органах и тканях биологических объектов, как и в любой среде, при облучении, в результате поглощения энергии ионизирующих излучений, идут процессы ионизации и возбуждения атомов. Эти процессы лежат в основе и физического (в неживой среде), и биологического (в живых организмах), действия излучений, мерой которого служит количество поглощенной в среде или организме энергии (см. единицы измерения ионизирующих излучений).

Главным результатом биологического воздействия ионизирующих излучений на организм человека (и животных) является ионизация с образованием свободных радикалов и перекисей.

Свободные радикалы вызывают разрушения целостности цепочек макромолекул белков и нуклеиновых кислот, что может привести как к массовой гибели клеток (лучевая болезнь), так и канцерогенезу (онкозаболевания, рак) и мутагенезу (генетические дефекты в последующих поколениях). Наиболее подвержены воздействию ионизирующего излучения активно делящиеся клетки (эпителиальные - меланома, стволовые, эмбриональные), особенно клетки молодых растущих организмов (детей, в т.ч. в утробе матери, молодежи).

Так как основным веществом человека является вода (около 80%), то эти радикалы есть, в основном, H^+ , OH^- и др. подобные, а также перекись водорода H_2O_2 , которые и нарушают естественную биохимию в клетках тканей, приводя к стохастическим (вероятностным) эффектам при небольших дозах излучения (онкозаболевания и генетические мутации), и к детерминированным соматическим эффектам при значительных дозах (лучевые поражения различных органов, лучевая болезнь, местные лучевые поражения: ожоги, некрозы, помутнение хрусталика глаза и др. и общие лучевые поражения, такие, как острая лучевая болезнь).

Детерминированные, или пороговые эффекты с неизбежностью возникают при превышении определённого порога эквивалентной дозы во всём организме или в каком-либо органе и ткани. Например, порог появления симптомов острой лучевой болезни у человека составляет 1-2 Зв на всё тело.

Вероятностные эффекты сказываются особенно сильно в молодых организмах человека, от эмбриона до возраста порядка 10 и более лет, что связано с большой частотой деления клеток в молодом организме. Иммунная система организма не успевает уничтожить поврежденные радиацией (свободными радикалами) клетки.

Стохастические (вероятностные) эффекты, такие как злокачественные новообразования, генетические нарушения, могут возникать при любых дозах облучения. С увеличением дозы повышается не тяжесть этих эффектов, а вероятность (риск) их появления.

Поэтому дополнительное к естественному (природный радиационный фон), техногенное и медицинское облучение беременных и кормящих грудью женщин, а также детей, желательно не допускать.

Отмечено, что неблагоприятное влияние радиации существенно усиливается при одновременном воздействии различных химических токсикантов, промышленных выбросов и т.п., например, у курильщиков, подвергающихся облучению в не очень больших дозах, риск заболеть раком легких значительно возрастает по сравнению с некурящими при тех же дозах.

В радиобиологии пока что четко не определено понятие «малые дозы радиации» и значение этого понятия в жизни человека. Существует широкий спектр гипотез о степени опасности малых доз радиации: от линейно-беспороговой, когда опасными считаются любые сколь угодно малые дозы радиации, дополнительные к естественному радиационному фону, до гипотезы радиационного гормезиса (полезная стимуляция какой-либо системы организма внешними воздействиями, имеющими силу, недостаточную для проявления вредных факторов), также подтверждаемой многочисленными статистическими и экспериментальными данными, когда малые дозы радиации считаются полезными для живых организмов (например, радоновые ванны при усиленной вентиляции воздуха). Согласно одним воззрениям фоновое облучение вредно, согласно другим, оно является необходимым фактором возникновения и дальнейшей эволюции жизни на Земле.

7. Радон. Радону посвящена отдельная лабораторная работа физпрактикума.

Интерес к радиологическому воздействию радона на население возник в мире в конце 70-х и в начале 80-х годов (США, Швеция, Германия, Франция и др.), хотя вредное влияние радона (тогда еще неизвестного газа) на человеческий организм было замечено еще в XVI веке, когда таинственная горная болезнь шахтеров (добыча серебра) в Германии (район г. Шнееберг) и Чехии (район г. Яхимов, из яхимовской серебряной руды Мария и Пьер Кюри в 1898 г. впервые выделили два новых химических элемента – полоний и радий) длительное время привлекала внимание средневековых медиков: смертность от заболеваний (теперь понятно, что рака) легких среди рудокопов была в 50 раз выше, чем среди прочего населения этих районов. Знаменитый врач и алхимик Парацельс (Филипп фон Гогенгейм, 1493–1541) предполагал, что симптомы «шнеебергской чахотки» (по названию местности) связаны с вдыханием рудной пыли.

В 1899 г. Э.Резерфорд в Канаде открыл «эманацию тория» (Rn^{220}), а Ф.Э.Дорн в Германии – «эманацию радия» (Rn^{222}), позднее названные соответственно тороном и радоном. Это было и открытие явления изотопии химических элементов.

Необходимо отметить, что еще в 1907 г., выступая на одной из первых конференций по радиоактивности, Резерфорд сказал: «Мы все должны осознать, что постоянно вдыхаем эманации радия и тория, их продукты и ионизированный воздух. Надо полагать, что наличие радиоактивной материи и ионизированного воздуха может играть некоторую роль в физиологических процессах» Таким образом, Э.Резерфорда следует считать основоположником не только ядерной физики, но и радиационной экологии.

С 1989 г. ведется мониторинг радона на Украине. Очень высокий уровень активности этого газа (1000 Бк/м^3 и выше) в зданиях зарегистрирован в некоторых районах Украинского кристаллического гранитного массива. Эффективная доза облучения населения Украины от всех источников ионизирующих излучений составляет $\approx 5 \text{ мЗв}$ ($\approx 0,5 \text{ бэр}$) в год, из которых около половины этой дозы приходится на радон и продукты его распада. Это примерно в 300 раз больше той дозы, которую население Украины получает вследствие аварии на ЧАЭС. В днепропетровской горсанэпидстанции (лаборатория измерения физических факторов) имеется прибор для измерения концентрации радона в воздухе (приобретен в начале 90-х годов, благодаря содействию бывшего мэра города Куличенко И.И.).

В настоящее время в странах Европейского союза экспертами по радиационной защите рекомендованы следующие нормативные значения активности радона: 200 Бк/м^3 – для новых жилых зданий и 400 Бк/м^3 – для старых, а в Украине значительно меньше, до 50 Бк/м^3 для новых жилых и производственных зданий и до 100 Бк/м^3 для старых (см. нормативные документы), необходимо отметить, что принятые нормативы не всегда выполняются.

По данным НКДАР (Научный комитет по действию атомной радиации при ООН), не менее 10% регистрируемых ежегодно в мире заболеваний раком легких вызваны радоновой радиацией.

Радон – это инертный газ без цвета и запаха, почти в 10 раз тяжелее воздуха, хорошо растворяется в воде (радоновые ванны). **Радон (Rn^{222}) – главный изотоп в радоновой проблеме облучения населения, является дочерним продуктом радиоактивного урана (U^{238})**. Радон, как и его “родители”, альфа-излучатель. В процессе распада он продуцирует семейство других альфа-излучателей, которые в целом называют дочерними продуктами распада, причем в отличие от радона они представляют собой не газы, а твердые вещества – нестабильные изотопы полония, свинца, висмута и др., которые сами по себе являются мощными источниками альфа-излучения. **Важнее альфа-радиоактивность не самого радона, с периодом полураспада около 4-х суток, а альфа-радиоактивных продуктов его распада: Po-218, Po-214 и Pb-214 с весьма небольшими периодами полураспада.** Радон присутствует, как и его материнские нуклиды, во всех строительных материалах и горных породах, содержащих уран. Образующийся в процессе распада инертный (не взаимодействует с другими атомами) газ тотчас же диффундирует через капилляры грунта, микротрещины пород и материалов, и захватывается потоками атмосферного воздуха, которым мы дышим.

Не только под самим Кировоградом, Александрией и Желтыми Водами, где расположены основные урановые шахты Украины, но и в сотнях населенных пунктов от Чернигова до Одессы, от Хмельницкого до Полтавы наша земля где слабо, а где сильнее (в местах разломов гранитного щита) дышит радоном. По большому счету, «радоновая» проблема эксклюзивной для Кировоградщины, как, впрочем, и для других территорий Украины, не является. В некоторых районах Ровенской или Киевской области этот показатель иногда превышает кировоградский.

По всему миру средняя концентрация радона на открытом воздухе находится на уровне порядка 15 Бк/м³. В центре уранового щита Украины эта величина вдвое-втрое выше. Эти показатели естественно считать фоновыми.

Так как радон тяжелый газ, то его концентрация в подвалах и первых этажах зданий значительно превосходит концентрацию на вторых и выше этажах. Не случайно медики фиксируют повышенный уровень очень серьезных заболеваний у тех жильцов первых этажей, которым открытые форточки не по душе и не по карману, особенно в зимний период, когда необходимо сравнительно дорогое отопление. В Западной Европе и Америке во всех городских зданиях в основном первыми этажами для постоянного проживания служат наши «вторые», да и на просторах «кантри», в сельской местности, в коттеджах и фермерских домах внизу располагают только системы жизнеобеспечения, а вся благоустроенная человеческая жизнь — наверху, (отметим наши подвальные и полуподвальные интернет-клубы и др. заведения, где многие из молодежи проводят значительное время). Конечно, на первых этажах обычной пыли больше, чем на более высоких этажах. Этот фактор также играет роль в экологии жизни.

Воспоминания преподавателя о выполнении лаб. раб. №3 при абсолютном штиле.