

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

О.В. САВВІН, М.В. СУХАРЕВА, А.Г. МЄШКОВА, С.Є. СУЛІМЕНКО

РАДІОЕКОЛОГІЯ

Частина I

Друкується за Планом видань навчальної та методичної літератури,
затвердженим Вченою радою НМетАУ
Протокол № 1 від 22.01.2021

Дніпро НМетАУ 2021

УДК 57.043:63:37.022

Саввін О.В., Сухарева М.В., Мешкова А.Г., Суліменко С.Є. Радіоекологія. Частина I : конспект лекцій. Дніпро : НМетАУ, 2021. 81 с.

Розглянуто історію розвитку радіоекології, та основні її положення. Наведено відомості про фізику іонізуючого випромінювання, дозиметричні одиниці в радіоекології та біологічну дію випромінювання. Особливу увагу приділено питанням захисту населення від іонізуючого випромінювання та нормам радіаційної безпеки в Україні.

Призначений для студентів спеціальностей 101 – екологія та 183 – технології захисту навколишнього середовища (бакалаврський рівень).

Лл. 10. Бібліогр.: 19 найм.

Друкується за авторською редакцією.

Відповідальний за випуск О.О. Єр'омін, д-р техн. наук, проф.

Рецензенти: М.В. Губинський, д-р техн. наук, проф. (НМетАУ)
В.М. Куваєв, д-р техн. наук, проф. (НТУ «Дніпровська політехніка)

© Національна металургійна академія
України, 2021

© Саввін О.В., Сухарева М.В.,
Мешкова А.Г., Суліменко С.Є., 2021

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ОСНОВИ ДОЗИМЕТРІЇ.....	6
1.1 Вступ до радіоекології.....	6
1.2 Сучасні проблеми радіобіології.....	14
1.3 Фізика іонізуючого випромінювання.....	18
1.4 Дозиметричні одиниці в радіоекології.....	29
1.5 Джерела радіаційного забруднення навколишнього середовища...	45
2 БІОЛОГІЧНА ДІЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	53
2.1 Основи біологічної дії іонізуючого випромінювання.....	53
2.1.1 Чутливість біологічних систем і організмів до радіації.....	53
2.1.2 Зовнішнє опромінення.....	55
2.1.3 Внутрішнє опромінення.....	56
2.1.4 Токсичність радіонуклідів.....	60
2.1.5 Радіотоксикологічні характеристики деяких радіонуклідів.....	61
2.2 Захист населення від іонізуючого випромінювання.....	65
2.3 Норми радіаційної безпеки.....	71
2.3.1 Удосконалення системи нормування та радіаційного захисту.....	71
2.3.2 Вимоги норм радіаційної безпеки в Україні.....	73
2.3.3 Поділ забрудненої території України на радіоекологічні зони.....	76
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	79

ВСТУП

Радіоактивність та іонізуючі випромінювання, що її супроводжують, існували на Землі задовго до зародження на ній життя й були наявні в космосі ще задовго до виникнення самої Землі. Радіація постійно наповнює космічний простір. Радіоактивні матеріали увійшли до складу Землі із самого її виникнення. Навіть людина злегка радіоактивна, тому що у всякій живій тканині наявні в надзвичайно малих кількостях радіоактивні речовини. Одним з наймолодших нових розділів екології вважається радіоекологія, яка отримала активний розвиток після аварії на Чорнобильській атомній електростанції.

Предметом вивчення дисципліни «Радіоекологія» є процеси, пов'язані з потраплянням і накопиченням радіоактивних речовин живими організмами та їх міграції у біосфері.

Метою вивчення дисципліни є формування цілісного уявлення про радіаційний фон навколишнього середовища, поширення, міграцію і вплив природних та штучних радіоактивних елементів в біосфері, вивчення дії радіації на людину та довкілля.

Основними завданнями вивчення дисципліни є отримання системи знань про джерела радіоактивних забруднень та характер міграції радіонуклідів в екосистемах; механізми дії радіації на живі організми і, особливо, людину; формування системи вмінь та навичок, які дозволять прогнозувати вплив радіаційного випромінювання на довкілля; базових відомостей про природні радіохімічні процеси, що перебігають у біосфері; ознайомлення студентів із сучасними методами радіоекологічних досліджень, методиками вимірювання доз, діагностичними, лікувальними, побутовими та селекційними методами застосування іонізуючого випромінювання.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні *знати*:

- фізичні основи іонізуючого випромінювання;
- дозиметричні одиниці в радіоекології;
- шляхи надходження радіонуклідів до екосистем;
- вплив радіоактивного випромінювання на живі організми;
- радіочутливість основних видів рослин та тварин;
- норми радіаційної безпеки;

- характер міграції радіонуклідів в екосистемах;
- принципи захисту живих організмів від випромінювання та забруднення радіоактивними речовинами;
- методи вимірювання радіоактивного випромінювання в елементах екосистем.

вміти:

- користуватися основними радіобіологічними поняттями, дозиметричними та радіометричними одиницями;
- здійснювати оперативний радіоекологічний моніторинг місцевості в умовах радіоактивного забруднення і оцінювати міру безпеки проживання та виробничої діяльності людини на таких територіях;
- будувати схеми та карти радіоактивного забруднення навколишнього середовища;
- визначати характер міграції радіонуклідів у водних і наземних екосистемах;
- прогнозувати надходження радіоактивних речовин у організм тварин і людини по трофічним ланцюгам;
- ефективно використовувати контрзаходи в умовах радіоекологічної аномалії.

Навчальна дисципліна «Радіоекологія» відноситься до вибіркового компонента фахового переліку дисциплін підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр», що навчаються за освітньо-професійними програмами спеціальностей 101 – Екологія та 183 – Технології захисту навколишнього середовища.

Вивчення дисципліни базується на знаннях, отриманих при вивченні дисциплін «Фізика», «Хімія», «Біологія», «Загальна екологія та неоекологія». Набуті знання студенти використовуватимуть при вивченні таких дисциплін, як «Ландшафтна екологія», «Моделювання та прогнозування стану довкілля», «Захист повітряного басейну» тощо.

1 ОСНОВИ ДОЗИМЕТРІЇ

(Змістовий модуль 1)

1.1 Вступ до радіоекології

Одного разу рабу Езопу його господар Ксантос наказав купити на базарі те, що найкраще. Езоп, відомий своєю мудрістю, купив язик. Здивованому господарю він пояснив, що немає нічого краще, ніж язик, бо він допомагає людям розуміти одне одного, служить ключем до пізнання, джерелом правди і мудрості.

На інший день Ксантос наказав своєму слугі принести з базару найгіршу річ. Езоп знову приніс язик, стверджуючи, що в світі немає нічого гіршого, бо язик – джерело брехні, винуватець пліток, колиска сварок, помилок і наклепу. (Езоп – напівлегендарна особистість давньогрецької літератури, по можливості знайдіть і прочитайте інші його притчі).

Отже, радіація має також двоїстий характер, її неможна тільки вихвалити або тільки проклинати. Філогенез – процес розвитку органічного світу, перетворення і вдосконалення живої речовини – був би немислимим без Сонця, яке живить своєю енергією біологічні ланцюги.

Кожна жива істота на Землі постійно піддається впливу радіації; вона надходить до нас з об'єктів глибокого космосу (Deep Sky), Сонця з глибин Землі і навіть від живих організмів. Кожен живий організм, включаючи людину, що протягом свого індивідуального життя (онтогенезу) і в ході всього розвитку живої природи (тобто в процесі філогенезу) від нижчих форм до сучасної людини, піддається дії природного радіаційного фону. У наші дні люди піддаються дії радіації від штучних джерел, інтенсивність яких безперервно зростає.

Радіоекологія, або радіаційна екологія, – це розділ радіобіології, який виник на стику з екологією. Іноді її вважають розділом екології. Однак останнім часом її все більше виділяють як окрему науку.

Радіобіологія – це наука, яка вивчає дію іонізуючого випромінювання на живі організми та їх угруповання.

Радіоекологія вивчає концентрації та міграцію радіоактивних речовин в навколишньому середовищі та вплив їхнього іонізуючого випромінювання на живі організми та їх угруповання.

Завдання радіоекології полягає у з'ясуванні шляхів міграції та закономірностей накопичення радіонуклідів у біогеоценозах, а також пізнання закономірностей, зміни угруповань і популяцій організмів, що мешкають в умовах підвищеного фону іонізуючої радіації.

Прерогативою радіоекології, як правило, є зовсім незначні потужності хронічного опромінення організмів іонізуючим випромінюванням за рахунок радіаційного фону, а також за рахунок забруднення біосфери штучними радіонуклідами. Проте багато рослин і тварин здатні накопичувати у життєво важливих органах значну кількість радіоактивних речовин, внаслідок чого можливе істотне внутрішнє опромінення організму. Впливаючи на генетичний апарат, це додаткове опромінення зумовлює зростання темпів мінливості клітин і всього організму. Вищі дози можуть знижувати їх життєздатність і навіть спричиняти загибель найбільш чутливих до іонізуючого випромінювання, і за рахунок цього, змінювати структуру біоценозів і збіднювати їх міжвидові взаємовідношення.

Виявлення закономірностей, що лежать в основі цих процесів, має важливе значення для багатьох галузей народного господарства. Особливо важливими є вирішення в галузі радіоекології таких завдань:

- виявлення територій суші і акваторій з підвищеним вмістом радіонуклідів;
- дослідження шляхів міграції радіонуклідів харчовими ланцюгами і, насамперед, у ланці ґрунт → рослини → тварини → людина;
- припинення чи послаблення екологічних зав'язків на будь-якій ділянці цього шляху або створення спеціальних засобів запобігання тому, щоб вони не потрапили у рослини, тваринні і людські організми;
- прогнозування поведінки радіонуклідів у природних об'єктах і дозових навантажень на живі об'єкти, в тому числі на основі математичних моделей і комп'ютерних систем.

Першим вченим, який «побачив» незвичайні промені, ще невідомі науці, був німецький фізик Вільгельм Конрад Рентген (27 березня 1845 – 10 лютого 1923). У 1895 році весь науковий світ був схвилюваний його відкриттям. Промені вільно проходили через непрозорі предмети. Ці промені були названі рентгенівськими. Не минуло й року, як було зроблено нове відкриття: у 1896 р. французький вчений Антуан Анрі Беккерель (15 грудня 1852 – 25 серпня 1908),

займаючись вивченням природи рентгенівських променів, виявив, що також солі урану випромінюють невидимі промені.

Незабаром цим явищем зацікавилася Марія Склодовська-Кюрі (7 листопада 1867 – 4 липня 1934), молодий хімік, полька за походженням, яка і ввела в ужиток слово «радіоактивність». У 1898 році П'єр Кюрі (15 травня 1859 – 19 квітня 1906) і Марія Склодовська-Кюрі виявили, що уран після випромінювання таємничим чином перетворюється в інші хімічні елементи. Один з цих елементів подружжя назвали полонієм, а ще один – радієм, оскільки з латині це слово означає «випускає промені». Це було найбільше відкриття. Видатний французький фізик Поль Ланжевен (23 січня 1872 – 19 грудня 1946), з приводу цього відкриття сказав: «Відкриття радіоактивності за своїм значенням в історії цивілізації, може бути, буде поставлено на ряду з відкриттям вогню». І цей новий «вогонь» спочатку обпік людей, замість того, щоб їх зігріти.

Хімією урану і виділенням радію багато займалися П'єр і Марія Кюрі. Ось що виглядало загадковим: випромінювання урану, що робить повітря електропровідним, неможливо було змінити ніякими впливами. Марія Кюрі нагрівала і охолоджувала його солі, тримала їх у темряві, направляла на них пучки світла і ніякого впливу. Незалежно від фізичного стану урану, перебував чи не перебував він у магнітному полі, випромінювання не змінювалося. Значить, воно йшло з глибини елемента – з атома. Цю, нову властивість Марія Кюрі запропонувала назвати радіоактивністю, виходячи з латинського слова «радіус» – промінь. Перед смертю Марія Кюрі сказала: «Не виключено, що головна причина моєї хвороби – радій». П'єр Кюрі говорив: «Який би я не був сміливий, я не увійшов би в кімнату, в якій знаходиться шматок радію завбільшки з кулак».

На всесвітній виставці в Брюсселі можна було бачити незабутній експонат: автоматичний пристрій періодично наближав поживклий листок паперу до лічильника ядерних частинок. Цей лічильник починав буквально захлинатися від перевантаження, яке було викликано підвищеною радіоактивністю. Листок віддалявся – швидкість рахунку падала, листок наближався – нова черга перевантаження лічильника. Цей листок був листком з блокнота дослідниці радіоактивності, двічі лауреата Нобелівської премії Марії Склодовської-Кюрі. Записи на аркуші були зроблені ще в кінці дев'ятнадцятого

століття у період робіт по виділенню нового елемента – радію. Навіть важко уявити, яка же велика була ця радіоактивність у лабораторії дослідниці, якщо листок випромінює до наших днів. Коли Беккерель поїхав у Лондон читати лекцію про своє чудове відкриття, він поклав у кишеню запаяну трубочку з крупицею радію (радій був виділений з урану, він в мільйон разів активніший, ніж уран). Додому Беккерель повернувся з опіком на грудях. Ураження, що викликані радіоактивним випромінюванням були названі променевою хворобою. Першовідкривачі радіоактивності не знали про існування променевої хвороби, але шкідливу дію сильного опромінення гамма-променями вони випробували на собі. У квітні 1936 р. у Гамбурзі (Німеччина) був відкритий пам'ятник на честь загиблих від наслідків впливу рентгенівського випромінювання. На пам'ятнику значилися імена 110 осіб. Щороку до них додавалися нові жертви науки. Без перебільшення можна сказати, що весь перший загін дослідників радіоактивних речовин та іонізуючого випромінювання загинув в результаті розвитку променевої хвороби або злоякісних новоутворень.

Елементи радіоекології можна знайти в роботах з біогеохімії радіоактивних речовин В.І. Вернадського (12 березня 1863 – 6 січня 1945), у монографії чеських учених Ю. Стокласа й Ж. Пенкава «Біологія радію й урану» (1932). Остаточно радіоекологія сформувалася до середини 50-х рр. ХХ ст. у зв'язку зі створенням атомної промисловості й експериментальними вибухами ядерних бомб, що викликали глобальне забруднення навколишнього середовища радіонуклідами стронцію, цезію, плутонію, вуглецю й ін.

Виявлення закономірностей, що лежать в основі процесів радіоактивного розпаду, має велике значення для багатьох галузей народного господарства. Так, особливий практичний інтерес становлять: міграція радіонуклідів у харчових ланцюгах організмів (у т. ч. сільськогосподарських тварин і людини); обрив або ослаблення екологічних зав'язків; дезактивація сільськогосподарських земель, водойм тощо, забруднених радіонуклідами; пошук родовищ радіоактивних руд (за радіоактивністю рослин-індикаторів); виявлення територій суходолу й акваторій, забруднених штучними радіонуклідами.

Результати радіоекологічних досліджень дуже вплинули на прийняття міжнародних конвенцій, спрямованих на обмеження випробувань ядерної зброї

й відмову від її застосування в умовах війни. На основі рекомендацій радіоекології у промисловості розробляються й впроваджуються замкнені цикли охолодження ядерних реакторів, уловлювачі радіоактивних аерозолів, методи зберігання й знешкодження радіоактивних відходів, що виключають їх потрапляння в навколишнє середовище.

Ще не так давно слова «атомна енергетика» і «науково-технічний прогрес» зливалися в нерозривне ціле. Відкривалася дуже райдужна перспектива вирішення енергетичних проблем, в першу чергу, заміни традиційних видів палива принципово іншим – компактним, «бездимним» і, що особливо важливо, практично невичерпним. Проте, з часом ситуація почала змінюватися. Події на «Три Майл Айленд» (1979 р. Пенсільванія, США) і особливо наш Чорнобиль сколихнули громадську думку всього світу. Аварія же на японській АЕС «Фукусіма», коли внаслідок цунамі вийшли з ладу циркуляційні насоси, ще більше змусила фахівців переглянути деякі принципові позиції, які ще недавно здавалися непорушними. Змінилося наше уявлення про мирний атом. Сьогодні близько 10,7 % енергії, що виробляється на нашій планеті припадає на АЕС. США – 19,3 %, Китай – 4,2 %, Великобританія – 17,7 %, Канада – 14,9 %, Росія – 17,9 %. При цьому у Франції на частку атомних станцій припадає понад 71,7 % електроенергії.

Після остаточної зупинки енергоблоків ЧАЕС потужністю по 1000 МВт з реакторами РВПК-1000 в 2000 році, в Україні залишилося працювати 13 найбільш сучасних енергоблоків типу ВВЕР-1000 потужністю 1000 МВт та 2 енергоблоки типу ВВЕР-440 потужністю 440 МВт. За кількістю і потужністю ядерних енергоблоків Україна займає 8 місце у світі, 3-є в Європі. В Україні працює найпотужніша в Європі (6000 МВт) Запорізька АЕС.

На АЕС виробляється більше 53 % усієї електроенергії в Україні при встановленій потужності 25 %. Вартість електроенергії на АЕС нижче, ніж на теплових електростанціях. Це обумовлено тим, що в собівартість електроенергії на АЕС не включені витрати на: підвищення безпеки; зняття з експлуатації; на розвиток ядерно-паливного циклу; страхування відповідальності за можливу ядерну шкоду; будівництво нових потужностей замість тих, які виводяться з експлуатації. Дешева електроенергія АЕС – істотний фактор стабілізації економіки України в умовах, коли енергоємність національного продукту значно вищі, ніж у розвинених європейських країнах. Починаючи з 1984 р.

внесок ЗАЕС в енергетику України зріс з 2 до 20,4 %. В останні роки станція виробляє майже половину всієї електроенергії, виробленої атомними станціями України. 10 млн жителів України живуть і працюють завдяки електроенергії Запорізької АЕС.

Китайська Народна Республіка здійснює наймасштабнішу програму будівництва нових АЕС, також значні програми розвитку атомної енергетики мають Індія, Росія, Південна Корея і в меншій мірі ще близько півтора десятка країн світу. На перші три країни припадає трохи більше половини (а саме – 32) реакторів що будуються.

У той же час в світі існує протилежні тенденції, виражені в стагнації і навіть відмові від ядерної енергетики. Як деякі лідери атомної енергетики (США, Франція, Японія), так і деякі інші країни закрили ряд АЕС. Італія стала єдиною країною, яка закрила всі наявні АЕС і повністю відмовилася від ядерної енергетики. Бельгія, Німеччина, Іспанія, Швейцарія, Швеція здійснюють довгострокову політику щодо відмови від ядерної енергетики. Азербайджан, Грузія, Литва, Казахстан відмовилися від ядерної енергетики багато в чому через розпад СРСР, причому на території двох останніх країн вже діяли АЕС, побудовані в рамках єдиної радянської енергетики. Австрія, Куба, Лівія, КНДР, В'єтнам, Польща з політичних, економічних або технічних причин зупинили свої ядерні програми перед пуском своїх перших АЕС, хоча Польща в довгостроковій перспективі не виключає можливості будувати АЕС знову. Раніше відмовлялася від атомної енергетики Вірменія, проте потім її єдина АЕС була пущена в експлуатацію знову. Тайвань заморозив будівництво нової АЕС і планує закриття всіх трьох діючих станцій до 2025 року. Ті, хто має АЕС Нідерланди і Швеція планували відмовитися від атомної енергетики, хоча поки призупинили такі заходи. Перспективи заявленого будівництва нових АЕС в деяких країнах також викликають сумніви. Показова в цьому відношенні позиція США: припинивши будівництво нових АЕС, там широко розгорнули науково-дослідні і конструкційні роботи в галузі атомної енергетики. Створюється хороший заділ, щоб у потрібний момент приступити до розвитку атомної енергетики на якісно іншому рівні.

Причиною виникнення аварії в Чорнобилі були помилки обслуговуючого персоналу. Масштаби аварії на Три Майл Айленд, США обумовлені тим фактом, що засувки на напорі аварійних насосів були закриті. Це було

пов'язано з плановим ремонтом, що закінчився на блоці за кілька днів до аварії. Основна причина аварії на Фукусіма 1 – це землетрус та цунамі, які призвели до затоплення підвальних приміщень, де розташовувалися розподільні пристрої, резервні генератори і батареї. Це призвело до повного знеструмлення станції і відмови систем аварійного охолодження. Але грамотні дії операторів та аварійних служб могли би значно зменшити наслідки цієї аварії. Згідно з висновком комісії, відповідальність лежить на операторах АЕС Tokyo Electric Power Company (TEPCO) і державних службах з контролю над атомною енергетикою. Однак, цілком і повністю відносити аварії на рахунок злочинно безграмотних дій було б не правильно. Реактор повинен бути сконструйований так, щоб володіти внутрішньою безпекою.

Все це ставить на сучасному етапі розвитку радіоекології такі важливі завдання:

- 1) широкий систематичний радіаційний моніторинг різних сфер господарювання, який включає оцінку вмісту основних дозоутворюючих природних і штучних радіонуклідів в основних об'єктах навколишнього середовища: атмосфері, ґрунті, водоймах, сільськогосподарських та лісних угіддях;
- 2) вивчення особливостей міграції радіонуклідів у ґрунтах різних типів, ланцюжок ґрунт → рослини → продуктивні тварини → людина. З наступною кількісною оцінкою накопичення радіонуклідів в окремих ланках трофічних ланцюгів;
- 3) дослідження особливостей формування поглинених доз іонізуючої радіації в рослинах, організмі тварин і людини за рахунок внутрішнього опромінення інкорпорованих радіонуклідів, а також їх біологічної дії на окремі види і угруповання;
- 4) розробка заходів по мінімізації накопичення радіонуклідів в продукції рослинництва і тваринництва і рекомендацій по веденню сільськогосподарського виробництва на забруднених територіях;
- 5) створення математичних моделей і комп'ютерних систем, які інтегрують накопичену експериментальну інформацію і дозволяють здійснювати довгострокове прогнозування поведінки радіонуклідів в природних об'єктах і оцінювати дозові навантаження на живі організми;

б) оцінка ролі споживання продукції мешканцями забруднених радіонуклідами територій як джерела додаткового опромінення людини.

Вирішення цих завдань пов'язане з впровадженням і використанням точних кількісних методів досліджень і, перш за все, з розробкою методів радіометрії і радіаційної дозиметрії об'єктів навколишнього середовища. Труднощі радіометрії і дозиметрії у таких складних природних об'єктах, як агроценози цілком очевидні. Розрахунки доз хронічного опромінення окремих компонентів ценозу за рахунок інкорпорованих радіонуклідів, необхідні для оцінки будь-якого радіобіологічного ефекту, спряжені з дослідженням складних дозових полів в агроценозах, характер котрих залежить від великої кількості найрізноманітніших чинників: видового складу рослин, їх біологічних особливостей, співвідношення рослин; типу ґрунту і, відповідно, його агрохімічних характеристик, які визначаються не тільки природними показниками, але й є наслідком застосування агротехнічних прийомів; особливостями радіонуклідів і їх кількістю, тобто типом випромінювача і режимом опромінення і багатьма іншими. При екологічній дозиметрії доводиться враховувати і просторово-часову міграцію радіонуклідів біологічними ланцюжками між компонентами ценозу, можливу локалізацію окремих радіонуклідів у певних частинах рослин і органах тварин. Ігнорування цих особливостей може призвести до заниженої оцінки величин поглинених доз окремими представниками і в цілому агроценозом.

Останнє завдання, головною метою якої є забезпечення радіаційної безпеки населення, об'єднує радіоекологію і радіаційну гігієну. Кількісна оцінка дозових навантажень на людину обов'язково передбачає одержання великого об'єму даних про рух радіонуклідів трофічними ланцюжками до людини. І першорядний інтерес для радіаційної гігієни являють відомості, що одержує радіоекологія про розподіл радіонуклідів в агропромисловій сфері, де можлива дія радіаційного фактора.

Отже, кінцевим завданням радіоекології, як і радіобіології в цілому, є захист людини від вражаючої дії іонізуючого випромінювання.

Контрольні запитання:

1. *Визначення радіоекології як науки.*
2. *Основні завдання радіоекології.*

3. *Етапи розвитку радіоекології.*
4. *Історія відкриття радіоактивного випромінювання.*
5. *Атомна енергетика у світі.*
6. *Місце АЕС в енергетиці України.*
7. *Найбільш серйозні аварії на атомних електростанціях. Причини та наслідки.*
8. *Масштаби радіоактивного забруднення території України внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС.*
9. *Вплив аварії на Чорнобильській АЕС на розвиток радіоекології.*
10. *Сучасні завдання радіоекології.*

1.2 Сучасні проблеми радіобіології

Основні проблеми, що виникли перед радіобіологією в 1950–1960 рр. у зв'язку з ймовірністю застосування ядерної зброї і використання атомної енергії в мирних цілях вирішені далеко не повністю та не втратили своєї актуальності у теперішній час. Крім того аварії на АЕС змусили переглянути ці проблеми і розставити нові акценти у відношенні їхньої пріоритетності. Головні проблеми радіобіології на сучасному четвертому етапі такі:

- особливості дії на живі організми малих доз іонізуючої радіації;
- специфіка дії на живі організми хронічного опромінення;
- профілактика і терапія гострих і хронічних радіаційних уражень;
- радіаційне порушення імунітету;
- віддалені наслідки опромінення;
- спільна дія на організм іонізуючого випромінювання та інших факторів;
- міграція штучних радіоактивних речовин у компонентах біоценозу;
- особливості дії на живі організми випромінювання інкорпорованих радіоактивних речовин;
- мінімізація надходження і нагромадження радіоактивних речовин у рослинах, організмі тварин і людини;
- виведення радіоактивних речовин з організму людини.

Крім системи радіаційно-гігієнічних регламентів для забезпечення прийнятних рівнів опромінення як для окремої людини, так і суспільства взагалі, проблема дії на живі організми, так званих, малих доз іонізуючої

радіації (таких, що перевищують рівень природного радіаційного фону) у даний час є однією з центральних проблем радіобіології. Протягом усіх трьох етапів своєї історії радіобіологи в основному займалися вивченням дії на організм високих доз, що викликають променеви хворобу, загибель організму. Після аварії на Чорнобильській АЕС мільйони людей зазнали опромінення і продовжують опромінюватися в малих дозах. Українською мало є даних, про те, як впливають малі дози на імунну реакцію організму, на його генетичний статус. Практично немає інформації про радіостимулюючу дію малих доз на тканини, органи і, в цілому, на організм людини, відсутні відомості про можливу трансформацію клітин при малих дозах, що може призвести до канцерогенезу.

З проблемою дії малих доз межує проблема впливу хронічного, тобто постійного, опромінення. Усі живі організми на величезних територіях опинилися в умовах хронічної дії іонізуючої радіації. Як вона впливає на рослинний і тваринний світ, їх видовий та кількісний склад, як відіб'ється на мільйонах людей, що проживають у таких умовах?

Надзвичайно актуальною для радіобіології залишається її традиційна проблема профілактики та терапії радіаційних уражень та наслідків. Понад сімдесят років пройшло з моменту відкриття перших радіопротекторів, у тому числі і найефективнішого з них цистаміну гідрохлориду. Однак дотепер не знайдено досить прийнятних радіопротекторних препаратів, що змогли б суттєво збільшити супротив організму. Практично немає засобів, що захищали б організм при хронічному опроміненні. Ще складніше справа з терапією наслідків дії радіаційного опромінення.

Одним з найтяжчих наслідків дії іонізуючого випромінювання на організм є ушкодження системи імунітету. При цьому страждають неспецифічні захисні реакції і фактори специфічного імунітету, змінюються алергійні реакції, розвивається аутоалергія. Наслідком пригнічення імунологічної реактивності є ендогенна й екзогенна інфекції, що можуть стати причиною численних захворювань і загибелі опромінених навіть при невисоких дозах.

Проблема вивчення віддалених наслідків радіаційного ураження організму, що можуть проявитися через довгі роки і навіть у наступних поколіннях (виникнення лейкозів і злоякісних новоутворень, прискорення старіння і скорочення тривалості життя, мутагенна дія і деяких інших), а також

їхнього запобігання відноситься до числа найменш досліджених. Важливість її очевидна. Маловивченість пояснюється незначним експериментальним матеріалом, отриманим у даній області. У людини переважна більшість віддалених наслідків, як правило, реалізується через багато років після опромінення, тому вимагає досить тривалих часових інтервалів для виявлення.

На живі організми крім різних природних несприятливих факторів навколишнього середовища діє величезна кількість штучних. Це не тільки додаткові рівні опромінення іонізуючою радіацією, але і фактори хімічної природи – викиди і відходи промислових підприємств, вихлопи двигунів внутрішнього згоряння, мінеральні добрива, пестициди, гербіциди, кислотні дощі, руйнування озонового шару, яке збільшує ультрафіолетове випромінювання. Теоретично, у певних ситуаціях, вони можуть послабляти дію іонізуючого випромінювання, але частіше підсилюють. Спільна вражаюча їх дія може значно перевищувати сумарний ефект. Саме тому аналіз комбінованої дії на організм іонізуючої радіації й інших факторів, у тому числі і неіонізуючого випромінювання, є ще однією з найважливіших проблем радіобіології.

Актуальною проблемою, особливо в останні роки, стало вивчення закономірностей міграції радіоактивних речовин, радіонуклідів, зокрема штучних, в об'єктах навколишнього середовища. Необхідно також досліджувати їхній перехід з різних типів ґрунтів у рослини і далі по харчових ланцюгах в організм сільськогосподарських тварин і людини, місця нагромадження і концентрації в окремих органах в залежності від хімічних властивостей радіоактивних сполук й особливостей обміну речовин різних видів організмів.

З названою проблемою безпосередньо зв'язане дослідження особливостей дії на організм радіоактивних речовин, що проникли всередину і включилися в органи і тканини – тобто інкорпоровалися. В процесі метаболізму вони можуть замінити звичайні стабільні елементи, накопичуватися в деяких органах у великих кількостях і обумовлювати їхнє локальне опромінення у високих дозах. Досить проблематичною є дозиметрія випромінювання у таких ситуаціях.

У зв'язку з останнім надзвичайно важливого значення набувають проблеми запобігання надходження і нагромадження радіоактивних речовин в організмі людини та їхнього виведення. Перша з них представляє комплексну задачу, що вирішується на окремих ланках харчових ланцюгів фахівцями

різних напрямів. На початкових етапах виробництва продукції рослинництва і тваринництва основна роль належить фахівцям сільського господарства. Вміло враховуючи фізико-хімічні властивості меліорантів і добрив, змінюючи набір рослин у сівозміні і режим зрошення посівів, умови утримання і годівлі тварин, можна значно знизити кількість радіоактивних речовин у продукції. В процесі технологічних переробок можна також істотно зменшити їхню концентрацію в багатьох продуктах харчування. Один з цих методів – розбавлення було активно використано фахівцями колишнього СРСР, коли м'ясо тварин з чорнобильської зони було розподілене між великою кількістю м'ясокомбінатів та потрохи додавалося у продукцію. Однак, це вже задачі працівників харчової промисловості. Нарешті, правильно складений лікарями-гігієністами, фахівцями в області медичної радіобіології раціон харчування, збагачений білками, певними вітамінами, макро- і мікроелементами, спеціальними біологічно активними сполуками, може сприяти блокуванню надходження й всмоктування радіоактивних речовин організмом.

Деякі радіоактивні речовини, що потрапили в організм із продуктами харчування, водою, повітрям порівняно швидко виводяться з нього природними шляхами. Однак інші можуть міцно зв'язуватися в окремих органах, наприклад, у кістках, м'язах або рівномірно розповсюджуватися в організмі піддаючи їх і прилеглі тканини постійному опроміненню. Тому проблема виведення радіоактивних речовин у комплексній терапії уражень, викликаних внутрішнім опроміненням, займає особливо важливе місце.

Зовсім очевидно, що в рішенні перерахованих проблем беруть участь не тільки біологи і медики, але і велике коло дослідників інших напрямів. На сучасному етапі розвитку радіобіологія уже вийшла за межі нагромадження фактів про реакції на опромінення окремих систем організму, різних біологічних видів і має потребу в їхньому глибокому, всебічному аналізі й узагальненні. Великі і тісні її зв'язки з іншими науками, різнобічні, часом нетрадиційні підходи до рішення багатьох питань дозволяють сподіватися на нові відкриття в цій області біології у найближчі роки.

Контрольні запитання:

- 1. Сучасні проблеми радіобіології.*
- 2. Теоретичне і практичне значення радіобіології.*

3. Необхідність широкої пропаганди радіобіологічних знань.
4. Перспективи розвитку радіобіології.
5. Суть методу розбавлення та доцільність його використання.

1.3 Фізика іонізуючого випромінювання

Відомо, що для отримання рентгенівських променів використовується рентгенівська трубка, будова якої дуже проста. Схематичне зображення рентгенівської трубки представлено на рисунку 1.1.

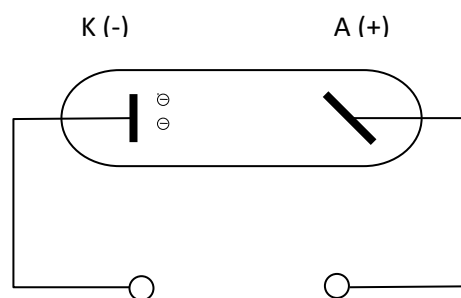
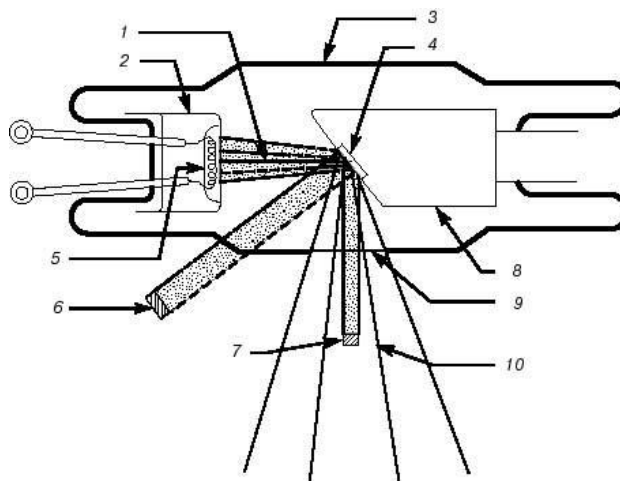


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення рентгенівської трубки

Між катодом (мінус) та анодом (плюс) прикладається різниця потенціалів, яка прискорює рух електронів. Ці прискорені електрони вдаряються об анод і дуже швидко гальмуються. При гальмуванні електронів і утворюється рентгенівське випромінювання. Оскільки окремі електрони гальмуються, то і випромінювання носить переривчастий характер, воно відбувається як би порціями. Гальмується один електрон – вилітає одна або кілька порцій, гальмується другий – нові порції випромінювання і так далі. Ці порції називаються квантами або фотонами випромінювання. Більш детально процес отримання рентгенівських променів зображено на рисунку 1.2. Для отримання суцільного спектру рентгенівського випромінювання напругу змінюють від 1 до 500 кВ та використовують, як правило, аноди з вольфраму або золота. Звичайно частота опромінення залежить від багатьох факторів.

Квант випромінювання – це найменша кількість даного виду випромінювання. Величина енергії кожного кванта залежить від того, наскільки прискорюється рух електронів. Чим більше енергія електрона, тим більше енергія рентгенівського кванта. Енергію електрона зазвичай висловлюють в

електрон-вольтах (Ев). E_e – це енергія електрона після проходження ним різниці потенціалів в один вольт. В електрон-вольтах вимірюється енергія не тільки прискорених електронів, але і енергія рентгенівських квантів, що виходять з рентгенівської трубки.



1 – електронний пучок; 2 – катод (мінус); 3 – скляна оболонка (трубка); 4 – вольфрамова мішень (антикатод); 5 – нитка розжарення катода; 6 – реально опромінена площа; 7 – ефективна фокальна пляма; 8 – мідний анод (плюс); 9 – вікно; 10 – розсіяне рентгенівське випромінювання.

Рисунок 1.2 – Рентгенівська трубка Куліджа

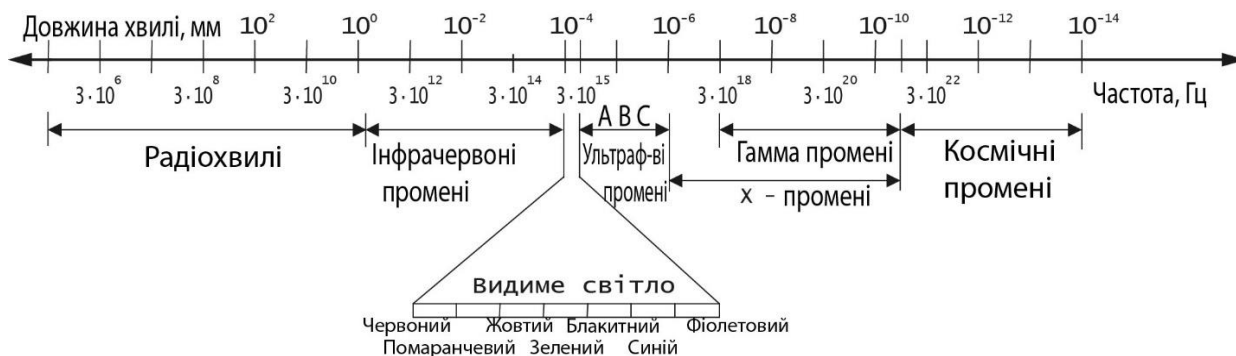


Рисунок 1.3 – Сонячна радіація, що надходить до Землі

Гамма-промені утворюються при радіоактивному розпаді атомних ядер. Джерелом таких променів є особливі радіоактивні речовини. За своєю природою рентгенівські і гамма-промені являють собою такі ж електромагнітні коливання, як світло або радіохвилі (рисунок 1.3), тільки енергія рентгенівського або гамма-кванта у багато разів більше енергії світлового

кванта. Чим більше енергія, тим більше частота коливань і менше довжина хвилі даного виду випромінювання. Якщо видиме світло має довжину хвилі порядку 10^{-5} см, то для рентгенівських променів вона менше 10^{-8} см.

Сонце випускає широкий спектр випромінювання: від радіохвиль – включаючи області теплового випромінювання видимого світла – до гамма-випромінювання, що володіє дуже високою проникаючою здатністю. Наша Земля теж випускає випромінювання, оскільки вона містить радіоактивні речовини, такі як уран, радій, торій та інші. Радіоактивні ізотопи (калію, вуглецю та інші) присутні і в організмі людини, тому ми самі теж є джерелами радіації. Наші органи чуття сприймають лише малу частину у вигляді сонячного світла і тепла, зірок і Місяця. Інші види випромінювання (ультрафіолетове, рентгенівське, космічне, радіоактивне) ми можемо виявити тільки за допомогою приладів. Дії кожного виду випромінювання на живі організми визначається не тільки тривалістю опромінення та інтенсивністю поглинання, але і специфічними властивостями, характерними для даного виду випромінювання.

При опроміненні рентгенівськими та гамма-променями фотографічна пластинка чорніє, якщо навіть вона знаходиться в щільній світлонепроникній касеті. Опромінення рентгенівськими променями повітря між двома різнойменно зарядженими електродами приводить до появи електричного струму між ними, тому що повітря стає електропровідним. Подібна електропровідність також може з'явитися під дією рентгенівських променів і в деяких твердих тілах.

В основі цих і інших властивостей рентгенівських і гамма-променів лежать елементарні процеси взаємодії квантів випромінювання з середовищем, в якому вони поширюються. Результатом такої взаємодії є іонізація та збудження молекул і атомів.

З першого погляду здається незвичним, що різні види випромінювання – радіохвилі, світло, рентгенівські і гамма-промені, які мають одну і ту ж природу, в той же час дуже сильно розрізняються за своїми властивостями. Наприклад, для того, щоб захиститися від світла, достатньо листа звичайного паперу, в той час як для захисту від рентгенівських і гамма-променів необхідно застосовувати листи металу значної товщини. У чому ж тут справа?

У нашому повсякденному житті доводиться зустрічатися з різними тілами і речовинами: сталеві виливки і дерев'яні вироби, пластмаси, рідини, гази і т. п. Однак, якщо до цих тіл і речовин підходити з точки зору їх мікро-будови, то ми знаємо, що всі вони обов'язково мають ядро і його навколишню оболонку, що складається з рухомих електронів навколо ядра. Все різноманіття властивостей оточуючих нас предметів обумовлено розбіжностями у масах ядер та кількістю електронів в атомі. Головним об'єктом дослідження вчених був сам атом, вірніше – його будова. Атом схожий на сонячну систему в мініатюрі: навколо крихітного ядра рухаються по орбітах «планети» – електрони. Це, так звана, планетарна модель, що була запропонована Ернестом Резерфордом (30 серпня 1871 – 19 жовтня 1937) у 1911 році (рисунок 1.4).

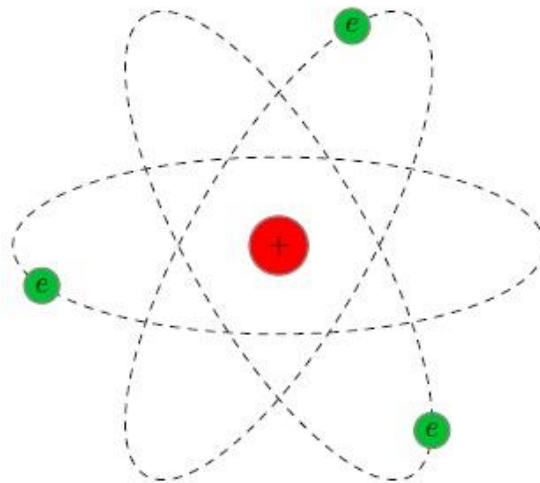


Рисунок 1.4 – Планетарна модель атома

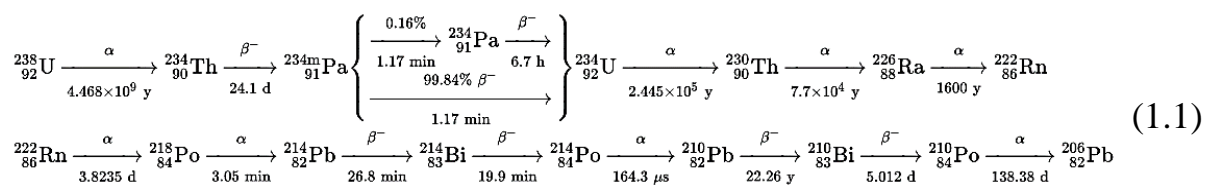
Однак сьогодні ця модель – перший крок до розуміння будови атому. Проблема цієї теорії полягає в тому, що електрон – це заряджена частинка. Якщо він рухається навколо ядра по якійсь кульовій або еліптичній орбіті, то він повинен рухатися з доцентровим прискоренням. Згідно з ж відомою теорією Джеймса Максвелла – заряджена частинка, що рухається з прискоренням повинна випромінювати. Таким чином кінетична енергія електрона поступово перетворювалась би у випромінювання та електрон просто впав би на атом. Такий атом майже не існував би у часі. Розрахунки показують, що час життя такого електрона був би менш, ніж 10^{-6} с. Планетарна модель атома Резерфорда була змінена на модель Нільса Бора (7 жовтня 1885 – 18 листопада 1962). Він

виявив, що навколо атома існує кілька квантових орбіт, по яких переміщається електрон. Він припустив, що електрон випромінює енергію не весь час, а тільки переміщаючись з однієї орбіти на іншу. А слідом за борівською моделлю атома з'явився принцип невизначеності Гейзенберга, який нарешті пояснював, чому падіння електрона на ядро неможливе. Вернер Карл Гейзенберг (5 грудня 1901 – 1 лютого 1976), якого вважають одним із засновників квантової механіки, виявив, що в збудженому атомі електрон знаходиться на далеких орбітах, а в момент, коли він випромінює фотон, він падає на основну орбіту, втративши свою енергію. Атом же переходить у стійкий стан, при якому електрон буде обертатися навколо ядра до тих пір, поки його ніщо не збуджує зовні. Це стабільний стан, далі якого електрон падати не буде.

Ще більше відповідей про будову мікроміру можна знайти в роботах з квантової механіки. Квантова механіка – це розділ теоретичної фізики, що описує фізичні явища, дію яких можна порівняти зі Сталою Планка. Але, нажаль, більш детальний аналіз квантової фізики виходить за рамки дисципліни, що викладається. Єдине, на щоб хотілось звернути вашу увагу так це на то, що навіть в нашій галактиці є інші форми матерії. Навіть найяскравіша зірка на зоряному небі – Сіріус (α – Великого Пса), маса якої в два рази більше Сонячної, повертається навколо спільного центра мас с зіркою, яку дуже важко побачити навіть в професійні телескопи. Ця маленька зірочка отримала назву «Цуценя». Її радіус у 203 рази менш, ніж у Сіріуса. За розміром вона не більше нашої Землі, але її маса величезна та дуже сильно впливає на рух системи цих двох зірок. Уявіть собі щоб Сонце поверталось навколо Землі. Виявляється таке цілком можливо. Справа тут у величезній щільності речовини. Наприклад, склянка води важить 200 грамів, склянка ртуті 3 кг, а склянка речовини з Цуценя мала б масу 20 тонн. Але є ще більш щільна речовина у всесвіті. Наперсток речовини з нейтронних зірок може мати більшу масу, ніж потяг з 60 навантаженими вагонами. Щільність такої речовини перевищує щільність атомного ядра.

Для розуміння основ радіоекології можна спочатку зупинитися на планетарній моделі атома. Розміри ядра в сто тисяч разів менші за розміри самого атома, але щільність його дуже велика, оскільки маса ядра майже дорівнює масі всього атома. Ядро, як правило, складається з декількох більш дрібних частинок, які щільно зчеплені одна з одною. Деякі з цих частинок

того самого хімічного елемента і називаються *ізотопами* даного елемента. Щоб відрізнити їх один від одного, до символу елемента приписують число, що дорівнює сумі всіх частинок у ядрі даного ізотопу. Так, уран-238 містить 92 протони й 146 нейтронів; в урані-235 теж 92 протони, але 143 нейтрони. Ядра всіх ізотопів хімічних елементів утворюють групу «*нуклідів*». Деякі нукліди стабільні, тобто без зовнішнього впливу ніколи не зазнають ніяких перетворень. Більшість же нуклідів нестабільні, вони увесь час перетворюються в інші нукліди. Як приклад, візьмемо хоча б атом урану-238, у ядрі якого протони й нейтрони ледь утримуються разом силами зчеплення. Час від часу з нього виривається компактна група із чотирьох частинок: двох протонів і двох нейтронів (α -частинка). Уран-238 перетворюється таким чином у торій-234, у ядрі якого утримуються 90 протонів і 144 нейтрони. Але торій-234 також нестабільний. Його перетворення відбувається, однак не так, як у попередньому випадку: один з його нейтронів перетворюється у протон, і торій-234 перетворюється в протактиній-234, у ядрі якого 91 протон і 143 нейтрони. Ця метаморфоза, що відбулася в ядрі, позначається й на електронах, що рухаються по своїх орбітах: один з них стає неспареним і вилітає з атома. Протактиній дуже нестабільний і йому потрібно зовсім небагато часу на перетворення. Далі відбуваються інші перетворення, що супроводжуються випромінюванням і весь цей ланцюжок, зрештою, закінчується стабільним нуклідом свинцю:



При кожному такому акті розпаду вивільняється енергія, яка й передається далі у вигляді випромінювання. 1 г урану при розпаді може виділити 24 тис. кВт теплової енергії.

Необхідно зазначити (хоча це й не зовсім строго), що випускнення ядром частинки, що складається із двох протонів і двох нейтронів – це *альфа-випромінювання*; випускнення електрона, як у випадку розпаду торію-234 – це *бета-випромінювання*. Часто нестабільний нуклід виявляється настільки збудженим, що випускнення частинки не призводить до повного зникнення енергії збудження; тоді він викидає порцію чистої енергії, що називається

гамма-випромінюванням (гамма-квантом). Як і у випадку рентгенівських променів (багато в чому подібних до гамма-випромінювання), при цьому не відбувається випускнення яких-небудь частинок.

Ядра нестабільних атомів виділяють надлишкову енергію у вигляді іонізуючого випромінювання. Такі атоми називають радіоактивними. У міру розпаду радіоактивних ядер рівень активності зменшується. Увесь процес мимовільного розпаду нестабільного нукліда називається *радіоактивним розпадом*, а сам такий нуклід – *радіонуклідом*. Але хоча всі радіонукліди нестабільні, одні з них більш нестабільні, ніж інші. Наприклад, протактиній-234 розпадається майже моментально, а уран-238 – дуже повільно. Половина всіх атомів протактинію в якому-небудь радіоактивному джерелі розпадається за час трохи більше хвилини, у той же час половина всіх атомів урану-238 перетвориться в торій-234 за чотири з половиною мільярди років.

Час, за який розпадається в середньому половина всіх радіонуклідів даного типу в будь-якому радіоактивному джерелі, називається *періодом напіврозпаду* відповідного ізотопу. Цей процес триває безупинно. За час, що дорівнює одному періоду напіврозпаду, залишаться незмінними кожні 50 атомів із 100, за наступний аналогічний проміжок часу 25 із них розпадуться, і так далі за експоненціальним законом.

Хотілося б зробити невеличкий відступ та привести приклад практичного застосування ізотопних методів дослідження в екології. Як можна визначити скільки років древньому коралу або молюску? Розглянемо лише один метод датування – Уранове-торієвий. Справа у тому, що уран розчинний у природних водах а торій ні. Отже практично всі морські мешканці містять уран, а торій ні. Розглянемо сучасний молюск він може містити $2 \cdot 10^{-6}$ г урану та зовсім не містити торію. Зростання співвідношень $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ служить мірою віку. Ще хороший приклад – радіовуглецеве датування. Справа у тому, що в повітрі підтримується стала концентрація ^{14}C . Джерелом є ядерна реакція, яка відбувається у верхніх шарах атмосфери при бомбардуванні Землі космічними променями:



Упродовж життя організму рослини чи тварини вуглець у ньому весь час поновлюється і співвідношення $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ залишається сталим. Після загибелі обмін із середовищем припиняється, а радіоактивний розпад ^{14}C триває далі. Тому відносна частка радіоактивного вуглецю зменшується. Оскільки період напіврозпаду ^{14}C приблизно складає 5730 років то час від моменту загибелі організму можна встановити в лабораторії.

Кількісною характеристикою будь-якого джерела іонізуючого випромінювання є його активність (радіоактивність), якісною – вид і енергія випромінювання, проникна здатність, період напіврозпаду.

Види іонізуючого випромінювання. Розрізняють корпускулярне і фотонне іонізуючі випромінювання. У першому випадку при радіоактивному перетворенні ядра атома з нього вилітають частинки – альфа, бета, нейтрони, протони, мезони тощо. При фотонному (електромагнітному) випромінюванні утворюється квант енергії – рентгенівське або гамма-випромінювання радіоактивних елементів. Різні види випромінювання супроводжуються вивільненням різної кількості енергії і мають різну проникну здатність.

Альфа-розпад характерний для радіоактивних елементів з великими порядковими номерами (урану, плутонію, америцію тощо). При цьому з ядра атома вилітає α -частинка, яка складається з двох протонів і двох нейтронів і являє собою ядро атома гелію. Альфа-розпад призводить до зменшення порядкового номера атома на дві одиниці, а масового числа – на чотири.

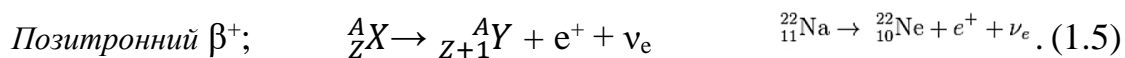
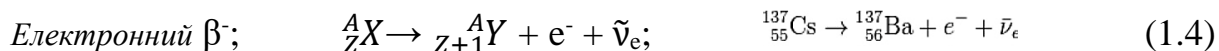
Схема альфа-розпаду має такий вигляд:



Альфа-випромінювання, що являє собою потік важких частинок, що складається із нейтронів і протонів, практично не здатне проникнути через зовнішній шар шкіри, утворений відмерлими клітинами і затримується, наприклад, аркушем паперу. Тому воно не становить небезпеки до того часу, поки радіоактивні речовини, що випускають α -частинки, не потрапляють усередину організму через відкриту рану, з їжею або з повітрям. Тоді вони стають надзвичайно небезпечними.

Бета-розпад існує у двох різновидах – електронний і позитронний. У першому випадку з ядра радіоактивного атома вилітає електрон, що має

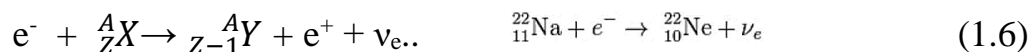
негативний заряд, у другому – позитрон, що несе позитивний заряд. Схематично бета-розпад можна подати так:



Пробіг бета-частинки в повітрі – до 1 м, у біологічній тканині – від 0,2 до 3 см. Щільність іонізації в сотні і тисячі разів менша, ніж у альфа-випромінювання. Цим обумовлюється і менший негативний ефект бета-випромінювання. Маючи меншу іонізуючу здатність, бета-частинки мають більшу проникну здатність. Однак одяг людини поглинає до 50 % бета-частинок, а віконне або автомобільне скло і металеві екрани товщиною в кілька міліметрів затримують їх практично повністю.

До радіоактивних перетворень поряд з альфа- і бета-розпадом відносять також К-захоплення, поділ ядер і ядерний синтез.

К-захоплення – захоплення ядром одного з електронів з найближчої К-оболонки атома. У цьому випадку має місце таке саме перетворення ядра, як і при позитронному розпаді:



Поділ ядер (мимовільний і вимушений) характерний для елементів з великим атомним номером при захопленні їхніми ядрами нейтронів. У результаті поділу утворюються радіоактивні уламки.

Ядерний синтез відбувається при температурі більше декількох мільйонів градусів. У цих умовах ядра легких елементів об'єднуються в ядра більш важких. Прикладом штучно створеної ядерної реакції синтезу є воднева бомба.

Гамма-випромінювання являє собою потік електромагнітних хвиль, що випускаються окремими порціями (квантами) і поширюються зі швидкістю світла. Гамма-промені не несуть електричного заряду, але завдяки високій швидкості переміщення здатні вибивати електрони з атомів будь-яких хімічних елементів (фотоелектрична дія). Маючи велику проникну здатність, гамма-промені становлять небезпеку для живих організмів, насамперед, при зовнішньому опроміненні.

Рентгенівське випромінювання належить також до електромагнітних і являє собою потік електромагнітних хвиль. Фотони рентгенівського випромінювання мають енергію від 100 еВ до 250 кеВ, що відповідає випромінюванню із частотою від $3 \cdot 10^{16}$ Гц до $6 \cdot 10^{19}$ Гц і довжиною хвилі 0,005-10 нм (загально визнаної межі діапазону рентгенівських променів на шкалі довжин хвиль не існує). М'який рентген характеризується найменшою енергією фотона та частотою випромінювання (і найбільшою довжиною хвилі), а жорсткий рентген має найбільшу енергію фотона та частоту випромінювання (і найменшу довжину хвилі). Жорсткий рентген використовується переважно у промислових цілях. Рентгенівські промені виникають при сильному прискоренні заряджених частинок або при високоенергетичних переходах в електронних оболонках атомів або молекул. В процесі прискорення-гальмування лише близько 1 % кінетичної енергії електрона йде на рентгенівське випромінювання, 99 % енергії перетворюється на тепло. На Землі електромагнітне випромінювання в рентгенівському діапазоні утворюється в результаті іонізації атомів випромінюванням, яке виникає при радіоактивному розпаді, а також космічним випромінюванням. Радіоактивний розпад також призводить до безпосереднього випромінювання рентгенівських квантів, якщо викликає перебудову електронної оболонки атома, що розпадається (наприклад, при електронному захопленні). Рентгенівське випромінювання, яке виникає на інших небесних тілах не досягає поверхні Землі, тому що повністю поглинається атмосферою. Рентгенівські промені можуть проникати крізь речовину, причому різні речовини по-різному їх поглинають. Поглинання рентгенівських променів є найважливішою їх властивістю в рентгенівській зйомці. Рентгенівське випромінювання є іонізуючим. Воно впливає на тканини живих організмів і може бути причиною променевої хвороби, променевих опіків і злоякісних пухлин. Через це при роботі з рентгенівським випромінюванням необхідно дотримуватися заходів захисту. Рентгенівське випромінювання є мутагенним чинником. Рентгенівські промені здатні викликати у деяких речовин світіння (флюоресценцію). Цей ефект використовується в медичній діагностиці при рентгеноскопії (спостереження зображення на флуоресціюючому екрані) і рентгенівській зйомці (рентгенографії). Виявлення дефектів у виробках (рейках, зварювальних швах тощо) за допомогою рентгенівського випромінювання називається

рентгенівською дефектоскопією. У матеріалознавстві, кристалографії, хімії й біохімії рентгенівські промені використовуються для з'ясування структури речовин на атомному рівні за допомогою дифракційного розсіювання рентгенівського випромінювання (рентгеноструктурний аналіз). Відомим прикладом є визначення структури ДНК. Крім того, за допомогою рентгенівських променів може бути визначений хімічний склад речовини. В електронно-променевому мікрозонді (або ж в електронному мікроскопі) аналізована речовина опромінюється електронами, при цьому атоми іонізуються й випромінюють характерне рентгенівське випромінювання. Замість електронів може використовуватися рентгенівське випромінювання. Цей аналітичний метод називається рентгенофлуоресцентним аналізом.

Контрольні запитання:

- 1. Як працює рентгенівська трубка?*
- 2. Що таке квант випромінювання? Чому є найменша кількість даного виду випромінювання?*
- 3. Які види сонячної радіації надходять до Землі?*
- 4. Планетарна модель атома Резерфорда, її суть та недоліки.*
- 5. Які сучасні моделі мікроміру вам відомі?*
- 6. Що таке радіоактивний розпад?*
- 7. Що таке ізотопи та нукліди?*
- 8. Які види іонізуючого випромінювання ви знаєте?*
- 9. Що таке активність джерела випромінювання?*
- 10. Де застосовуються іонізуючі випромінювання у діяльності людини?*
- 11. У чому принципова різниця між корпускулярним і фотонним випромінюванням?*

1.4 Дозиметричні одиниці в радіоекології

Основною одиницею в радіоекології є доза опромінення – міра енергії іонізуючого випромінювання, яка передана речовині, або міра біологічних ефектів іонізуючого випромінювання в тілі людини, його органах і тканинах.

Опромінення – це вплив на людину чи будь-який об'єкт іонізуючого випромінювання.

Зовнішнє опромінення – опромінення тіла людини чи будь-якого живого об'єкта джерелами іонізуючого випромінювання, які знаходяться поза ним.

Внутрішнє опромінення – опромінення тіла людини чи будь-якого живого об'єкта, окремих органів та тканин від джерел іонізуючого випромінювання, що знаходяться в самому об'єкті.

Ефективна доза зовнішнього опромінення та ефективна доза внутрішнього опромінення за рахунок радіонуклідів можуть підсумовуватися.

Число розпадів за секунду в радіоактивному зразку називається його *активністю*. Активністю нукліда (A) в радіоактивному джерелі, називається величина, яка дорівнює відношенню кількості атомів, що розпалися ΔN до проміжку часу Δt розпаду цього числа частинок:

$$A = \Delta N / \Delta t. \quad (1.7)$$

Одиницею активності ізотопів є Беккерель (Бк). 1 Бк дорівнює активності такої кількості, в якій за 1 секунду відбувається один ядерний розпад. Експериментально встановлено, що швидкість радіоактивного розпаду речовини пропорційна її кількості в даний момент часу. Математично це описується так:

$$dN / dt = - \lambda N. \quad (1.8)$$

Знак мінус показує, що кількість речовини з часом зменшується. Вирішуючи це рівняння, отримуємо основний закон радіоактивного розпаду:

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

де N_0 – число радіоактивних ядер (маса) в довільно обраний початковий момент часу, прийнятий за початок відліку $t = 0$; N – кількість ядер, що розпалися до моменту часу t ; λ – постійна, яка характеризує ймовірність розпаду ядра за одиницю часу: $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$, де $t_{1/2}$ – період напіврозпаду.

Таким чином, вирішивши дане диференціальне рівняння ми отримаємо, що кількість радіоактивних ядер $N(t)$ даного ізотопу зменшується з часом за законом:

$$N(t) = N_0 \exp^{(-\ln 2 / t_{1/2}) t} = N_0 \exp^{(-0.693 t / t_{1/2})}, \quad (1.9)$$

де N_0 – число радіоактивних ядер в момент часу $t = 0$, $t_{1/2}$ – період напіврозпаду – час, протягом якого розпадається половина радіоактивних ядер.

Приклад побудови графіка зменшення радіоактивного I^{131} за допомогою EXCEL зображено на рисунку 1.6.

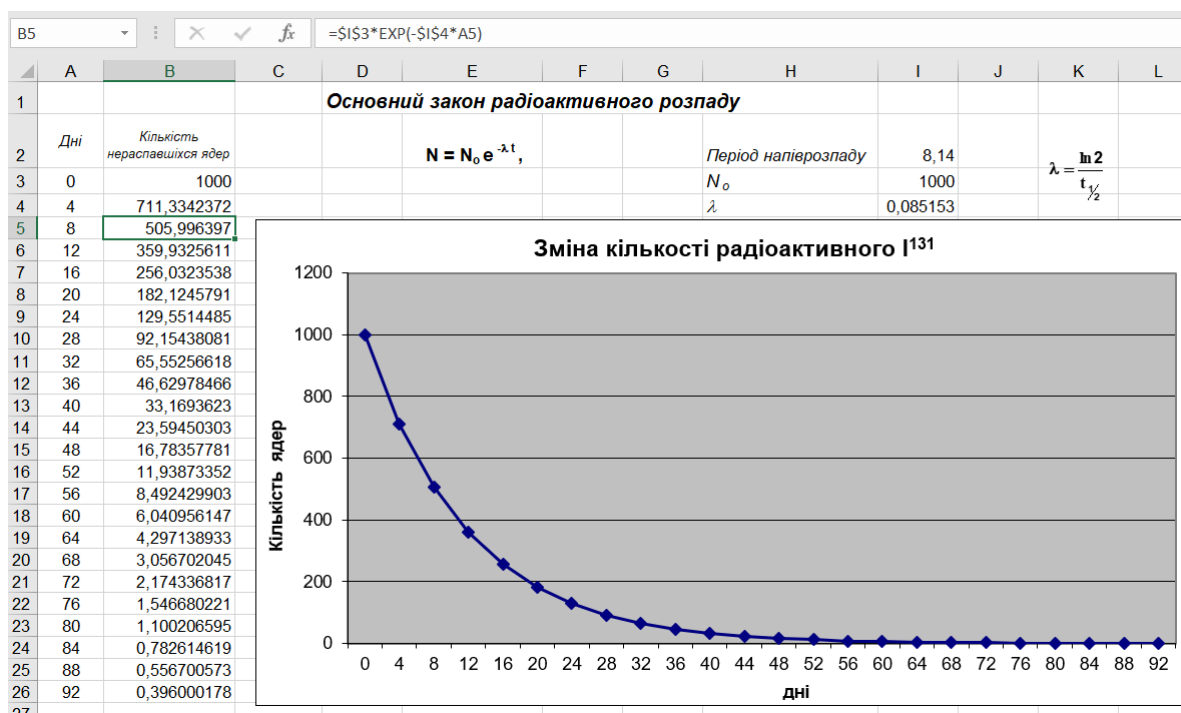


Рисунок 1.6 – Приклад побудови графіка зменшення радіоактивного I^{131} за допомогою EXCEL

Масу m активності радіонукліда A можна розрахувати за формулою:

$$m = 2.4 \cdot 10^{-24} \cdot M \cdot t_{1/2} \cdot A, \quad (1.10)$$

де M – масове число радіонукліда, A – активність в Беккерелях, $t_{1/2}$ – період напіврозпаду в секундах. Маса виходить у грамах.

Позасистемною одиницею є Кюрі (Кі) – активність ізотопу, у якому в 1с відбувається $3,7 \cdot 10^{10}$ актів розпаду:

$$1\text{Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{Кі}. \quad (1.11)$$

Загальна радіоактивність, внесена в світовий океан людством, оцінюється у $5,5 \cdot 10^{19}$ Бк. Під час чорнобильської аварії в атмосферу було викинуто $5 \cdot 10^7$ Кі радіоактивності. Загальна площа України, що забруднена цезієм більше 1 Кі/км², складає 36 млн га, понад 5 Кі/км² – 470 тис. га., понад 15 Кі/км² – 75 тис. га.

Під питомою активністю розуміють активність, віднесену до одиниці маси або об'єму.

Процеси взаємодії випромінювання з речовиною відбуваються по-різному і залежать від виду іонізуючого випромінювання, а також від складу опромінюваної речовини. Проте спільним є те, що при взаємодії з ядрами, електронами, атомами та молекулами речовини енергія іонізуючого випромінювання перетворюється в інші види енергії. Результатом такої взаємодії є поглинання частини енергії випромінювання речовиною.

Найважливіша задача дозиметрії – визначення дози випромінювання в різних середовищах і особливо в тканинах живого організму. В радіаційному захисті, радіоекології та радіобіології розрізняють п'ять основних видів доз іонізуючого випромінювання: експозиційну, поглинену, еквівалентну, ефективну і колективну.

Виміряти іонізацію безпосередньо в глибині тканин живого організму важко. У зв'язку з цим для кількісної характеристики рентгенівського і гамма-випромінювання, що діють на об'єкт, визначають так звану експозиційну дозу, яка характеризує іонізуючу здатність рентгенівських і гамма-променів у повітрі.

Експозиційна доза фотонного випромінювання (D_{exp}) є відношенням сумарного заряду всіх іонів одного знаку (dQ), утворених у повітрі, до маси повітря в зазначеному об'ємі (dm):

$$D_{\text{exp}} = dQ/dm. \quad (1.12)$$

У системі SI за одиницю експозиційної дози прийнято *кулон на кілограм* (Кл/кг; C/kg). Позасистемною одиницею експозиційної дози є Рентген (Р; R): $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$.

Рентген – це така кількість іонізуючого випромінювання, яка утворює в 1 см^3 сухого повітря при нормальних умовах близько 2 млрд пар іонів. Похідними від рентгену є 1 мілірентген (мР) = $1 \cdot 10^{-3} \text{ Р}$ та 1 мікрорентген (мкР) = $1 \cdot 10^{-6} \text{ Р}$. Співвідношення між Кл/кг та рентгеном: $1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$.

Потужність експозиційної дози фотонного випромінювання (потужність експозиційної дози) (P_{exp}) – відношення приросту експозиційної дози (dD_{exp}) за інтервал часу dt до цього інтервалу часу:

$$P_{\text{exp}} = dD_{\text{exp}}/dt. \quad (1.13)$$

Експозиційна доза розраховується за формулою:

$$D_{\text{exp}} = \int_0^t P_{\text{exp}}(t) dt, \quad (1.14)$$

або

$$D_{\text{exp}} = P_{\text{exp}} \cdot t \text{ при } P_{\text{exp}}(t) = \text{Const}, \quad (1.15)$$

де t – час опромінення.

В системі SI за одиницю потужності експозиційної дози прийнято *ампер на кілограм* (А/кг). Позасистемною одиницею потужності експозиційної дози є рентген за секунду (Р/с): $1 \text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$; $1 \text{ Р/год} = 1000 \text{ мР/год} = 10^6 \text{ мкР/год}$.

Потужність експозиційної дози фотонного випромінювання (Р) від точкового джерела даного радіонукліду пропорційна його активності А (мКі) і обернено пропорційна квадрату відстані від нього r (см):

$$P \approx A \cdot \Gamma/r^2, \quad (1.16)$$

де Γ – повна гамма-стала, що дорівнює, наприклад, для:



$$\Gamma = 3,242 \text{ Р} \cdot \text{см}^2 / (\text{год} \cdot \text{мКі}).$$

Приймаючи до уваги відсутність цілочислового співвідношення між Дж/кг і Р, а також поступову відмову від практичного використання експозиційної дози на користь поглиненої дози, визнано доцільним для експозиційної дози (D_{exp}) та потужності експозиційної дози (Р) зберегти лише позасистемні одиниці й не користуватися одиницями системи SI.

У колишньому СРСР гранично допустима доза (ГДД) опромінення всього тіла людини у виробничих умовах був 0,1 Р за тиждень. Для населення всіх вікових категорій ГДД була 0,001 Р за тиждень. Це відносно безпечні рівні опромінення. Миттєвий вплив радіації на організм людини вже можливий при одноразових дозах опромінення від 25 до 50 Р. Така радіація вже може призвести до змін у крові. При дозах до 200 Р відбувається порушення нормального стану – з'являється слабкість. Дози до 400 Р призводять до втрати працездатності, при цьому для 50 % постраждалих можлива смерть. Доза опромінення 600 Р є абсолютно смертельною. Ці цифри допоможуть оцінити небезпеку чорнобильської трагедії. Відразу після аварії при під'їзді до ЧАЕС, недалеко від розбитого 4-го блоку, фон опромінення досягав від 20 до 200 Р за годину і більше. Стрілки на дозиметрах «зашкалювали».

У радіобіології, клінічній радіології та радіаційному захисті *поглинена доза* (D) є базовою фізичною величиною, яка використовується для всіх видів іонізуючого випромінювання і будь-якої геометрії випромінювання. Поглинена доза визначається як відношення середньої енергії (dE), що передана іонізуючим випромінюванням речовині в елементарному об'ємі, до маси речовини в цьому об'ємі (dm). Поглинена доза випромінювання дорівнює енергії, поглинутій одиницею маси речовини. Всі інші величини, пов'язані з поглиненою дозою випромінювання (дозові поля та ін.) є мірою впливу на об'єкт, що опромінюється:

$$D = dE/dm. \quad (1.17)$$

У системі SI за одиницю поглиненої дози прийнято *Грей* (Гр; Gy); розмірність поглиненої дози – джоуль на кілограм; 1 Грей = 1 Дж/кг. Похідними величинами є 1 мГр = $1 \cdot 10^{-3}$ Гр і 1 мкГр = $1 \cdot 10^{-6}$ Гр.

Позасистемною одиницею поглиненої дози є *рад*. Співвідношення між Греєм та радом є таким: $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$; $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр} = 1 \text{ сГр}$ (сантиГрей).

Існують певні співвідношення між одиницями наведених доз для гамма-випромінювання. Так, приблизно $1 \text{ мкГр/год} = 113,64 \text{ мкР/год}$. Експозиційна доза 1 Р у повітрі відповідає поглиненій дозі $0,88 \text{ Гр}$; $1 \text{ мкЗв/год} = 1 \text{ мкГр/год}$.

Вплив на організм людини поглиненої дози опромінення нам допоможуть зрозуміти наступні цифри та спостереження:

- дуже великі дози опромінення порядку 100 Гр викликають настільки серйозні ураження центральної нервової системи (ЦНС), що смерть, як правило, настає протягом декількох годин або днів;
- при дозах опромінення від 10 до 50 Гр при опроміненні всього тіла поразка ЦНС може виявитися не настільки серйозною, щоб призвести до летального результату, однак опромінена особа все одно помре через $1-2$ тижні від крововиливів в шлунково-кишковому тракті;
- при ще менших дозах може не відбутися серйозних ушкоджень шлунково-кишкового тракту або організм з ними впорається, і, тим не менш, смерть може настати через $1-2$ місяці з моменту опромінення, головним чином, через руйнування клітин червоного кісткового мозку – головного компонента кровотворної системи організму;
- від дози $3-5 \text{ Гр}$ при опроміненні всього тіла вмирає приблизно половина всіх опромінених;
- червоний кістковий мозок та інші елементи кровотворної системи найбільш уразливі при опроміненні та втрачають здатність нормально функціонувати вже при дозах опромінення $0,5-1 \text{ Гр}$. Але вони мають також чудову здатність до регенерації, і якщо доза опромінення не настільки велика, щоб викликати пошкодження всіх клітин, кровотворна система може повністю відновити свої функції. Якщо ж опроміненню піддалося не все тіло, а якась його частина, то уцілілих клітин червоного кісткового мозку буває достатньо для повного відшкодування ушкоджених клітин;
- очі також відрізняються підвищеною чутливістю до опромінення. Найбільш вразливою частиною ока є кришталік. Загиблі клітини стають непрозорими, а розростання помутнілих ділянок призводить спочатку до катаракти, а потім і до повної сліпоти. Помутнілі ділянки можуть утворюватися при дозах опромінення 2 Гр і менше. Професійне опромінення очей ($0,5-2 \text{ Гр}$),

отримане протягом 10-20 років, призводить до збільшення щільності та помутніння кришталіка;

- діти вкрай чутливі до дії радіації;
- більшість тканин дорослої людини відносно мало чутливі до дії радіації.

Нирки витримують сумарну дозу близько 23 Гр, отриману протягом 5 тижнів без особливої шкоди; печінка – 40 Гр за місяць; сечовий міхур – 55 Гр за 4 тижні; легені – надзвичайно складний орган – набагато більш уразливий, а в кровоносних судинах незначні, але, можливо, істотні зміни можуть відбуватися вже при відносно невеликих дозах.

Потужність поглиненої дози іонізуючого випромінювання (потужність дози випромінювання) P_{abs} – це відношення приросту поглиненої дози (dD) за інтервал часу (dt) до цього інтервалу часу:

$$P_{abs} = dD/dt. \quad (1.18)$$

В системі SI за одиницю потужності поглиненої дози прийнято Гр/с. Позасистемною одиницею є рад/с, 1 Гр/с = 100 рад/с.

При необхідності переходу від потужності експозиційної дози фотонного випромінювання у повітрі (P_{abs}) до потужності поглиненої дози в повітрі (повітряної керми, P_{exp}) слід використовувати наступні співвідношення:

$$P_{abs} \text{ (нГр/год)} = 8,88 P_{exp} \text{ (мкР/год)}. \quad (1.19)$$

Середня, в органі або тканині, поглинена доза (доза в органі, D_T) дорівнює відношенню сумарної енергії (E_T), що виділилася в органі чи тканині (T) до маси органа чи тканини (m_T):

$$D_T = E_T/m_T. \quad (1.20)$$

Керма (від англ. «*kerma*» – *kinetic energy released into material*) – відношення суми первинних кінетичних енергій (dWK) всіх заряджених частинок, утворених під впливом непрямого іонізуючого випромінювання в елементарному об'ємі речовини, до маси (dm) речовини в цьому об'ємі (dWK/dm). Одиниця вимірювання керми є Грей.

Еквівалентна доза в органі або тканині (H_T) – це величина, яка визначається як добуток поглиненої дози (D_T) в окремому органі або тканині (T) та радіаційного зважуючого фактора (W_R):

$$H_T = D_T \cdot W_R. \quad (1.21)$$

Одиницею еквівалентної дози у системі SI є Зіверт (Зв; Sv). Зіверт – це енергія будь-якого виду іонізуючого випромінювання, поглиненого 1 кг біологічної тканини, при якій біологічний ефект тотожний поглиненій дозі 1 Гр контрольного рентгенівського або гамма-випромінювання.

Позасистемною одиницею еквівалентної дози є бер (біологічний еквівалент рада). $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бер}$, $1 \text{ мЗв} = 0,001 \text{ Зв} = 100 \text{ мбер} = 0,1 \text{ бер}$, $1 \text{ мкЗв} = 10^{-6} \text{ Зв} = 100 \text{ мкбер} = 0,1 \text{ мбер} = 10^{-4} \text{ бер}$.

При опроміненні живих об'єктів, у тому числі людини, одна і та ж поглинена доза викликає різний біологічний ефект залежно від виду випромінювання. Тому прийнято порівнювати біологічні ефекти від різних видів випромінювання з ефектами, викликаними рентгенівським або слабоенергетичним гамма-випромінюванням.

Радіаційний зважуючий фактор (коефіцієнт якості), W_R – коефіцієнт, що враховує відносну біологічну ефективність різних видів іонізуючого випромінювання. Використовується винятково при розрахунках ефективної та еквівалентної доз (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Значення радіаційного зважуючого фактора (коефіцієнта якості) W_R для різних видів випромінювання

Види випромінювання	W_R	
	МКРЗ, 1991	МКРЗ, 2007
Фотони, всі енергії	1	1
Електрони і мюони, всі енергії	1	1
Протони з енергією > 2 МеВ	5	2
Нейтрони з енергією < 10 кеВ	5	$W_R = \begin{cases} 2.5 + 18.2 \cdot e^{-[\ln(E_n)]^2/6} & E_n < 1\text{MeV} \\ 5.0 + 17.0 \cdot e^{-[\ln(2E_n)]^2/6} & 1\text{MeV} \leq E_n \leq 50\text{MeV} \\ 2.5 + 3.25 \cdot e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6} & E_n > 50\text{MeV} \end{cases}$
Нейтрони з енергією 10-100 кеВ	10	
Нейтрони з енергією від 100 кеВ до 2 МеВ	20	
Нейтрони з енергією 2-20 МеВ	10	
Нейтрони з енергією > 20 МеВ	5	
α -випромінювання, ядра віддачі	20	20

В рекомендаціях Міжнародної комісії з радіаційного захисту (МКРЗ) радіаційний зважуючий фактор для нейтронів у залежності від їх енергії замінений із ступінчастої на неперервну функцію. При заданій еквівалентній

дозі опромінення вірогідність виходу стохастичних наслідків залежить від опромінюваної їм тканини або органу. Тому, був введений ще один коефіцієнт, що враховує специфіку різних тканин з точки зору вірогідності індукції в них стохастичних наслідків опромінення, – тканинний зважувачий фактор (W_T). Значення W_T представлені в таблицях 1.2 та 1.3. Зважувачі тканинні фактори введені, виходячи з концепції безпорогової дії випромінювання, а їх величини відповідають виходу стохастичних наслідків для різних органів і тканин, отриманому на основі лінійної екстраполяції наявних даних з області великих доз опромінення (оскільки реальний вихід стохастичних наслідків в області малих доз невідомий).

Для врахування нерівномірного впливу іонізуючого випромінювання на організм розрізняють ефективну дозу.

Таблиця 1.2 – Значення тканинних зважувачих факторів (W_T), рекомендовані МКРЗ в 1991 році і використані в НРБУ-97

Тканина або орган	W_T	ΣW_T
Гонади	0,20	0,20
Кістковий мозок (червоний), товста кишка, легені, шлунок	0,12	0,48
Сечовий міхур, молочна залоза, печінка, стравохід, щитоподібна залоза	0,05	0,25
Шкіра, поверхня кістки	0,01	0,02
«Решта органів» (надниркова залоза, головний мозок, дихальні шляхи позагрудної області, тонка кишка, нирки, м'язи, підшлункова залоза, селезінка, тимус і матка)	0,05	0,05
Разом		1

Таблиця 1.3 – Значення тканинних зважувачих факторів (W_T), рекомендовані МКРЗ в 2007 році

Тканина або орган	W_T	W_T
Кістковий мозок (червоний), кишечник, легені, шлунок, молочна залоза, «решта органів» (надниркова залоза, екстраторакальний відділ, жовчний міхур, серце, нирки, лімфовузли, м'язи, слизова оболонка рота, підшлункова залоза, простата, тонка кишка, селезінка, тимус, матка, шийка матки)	0,12	0,72
Гонади	0,08	0,08
Сечовий міхур, печінка, стравохід, щитоподібна залоза	0,04	0,16
Шкіра, поверхня кістки, головний мозок, слинні залози	0,01	0,04
Разом		1

Ефективна доза (E) – сума добутоків еквівалентних доз H_T в окремих органах і тканинах на відповідні тканинні зважуючі фактори W_T :

$$E = H_T \cdot W_T. \quad (1.22)$$

Використання поняття ефективної дози допускається при значеннях еквівалентних доз нижчих за поріг виникнення стохастичних ефектів (0,1 Зв при гострому опроміненні чи хронічному протягом року). Одиниця ефективної дози в системі SI – Зіверт (Зв, Sv). Позасистемна одиниця – бер.

Ефективна доза в радіаційній безпеці визначає ступінь впливу іонізуючого випромінювання на тіло людини з врахуванням відмінностей дії різних видів іонізуючого випромінювання на тканини та органи. Ефективна доза дозволяє вирівняти ризик опромінення безвідносно до того, опромінюється все тіло рівномірно чи ні. Це досягається за допомогою коефіцієнтів відношення шкоди від опромінення окремого органу або тканини до шкоди при рівномірному опроміненні всього тіла однаковими еквівалентними дозами. Ефективна доза зовнішнього опромінення тіла людини та ефективна доза внутрішнього опромінення за рахунок радіонуклідів у тілі людини, таким чином, можуть додаватися.

Тканинний зважуючий фактор – коефіцієнт, який відображає відносну ймовірність стохастичних ефектів в тканині (органі). Сума всіх зважуючих факторів по всіх органах дорівнює одиниці: $\sum W_T = 1$. Використовується винятково при розрахунку ефективної дози (див. табл. 1.2). В останніх рекомендаціях МКРЗ значення тканинних зважуючих факторів (W_T) були уточнені (див. табл. 1.3).

За необхідності переходу від потужності експозиційної дози гамма-випромінювання радіонуклідів природного походження в повітрі (P_{abs} , мкР/год) до потужності ефективної дози (dE/dt , нЗв/год) слід користуватися наступним співвідношенням:

$$dE/dt = 6,46 P_{exp}. \quad (1.23)$$

Поглинена доза може розподілятися в біологічних об'єктах рівномірно і нерівномірно. Відомо, що кожний орган і кожна тканина мають різне значення

в життєзабезпеченні всього організму. *Критичний орган* – це орган або тканина, частина тіла або все тіло, опромінення яких завдає найбільшої шкоди організму. Аналогічно критичні (життєве важливі) елементи можуть бути виділені й у кожній окремій клітині, а не тільки в цілому організмі.

Практично існують три способи виділення критичних органів:

- за найбільшою радіочутливістю у певній системі організму;
- за найбільшою поглиненою дозою випромінювання;
- за вибіркоvim накопиченням підвищених концентрацій певного радіонукліда (для іншого радіонукліда критичним може бути зовсім інший орган).

Кожний із цих способів прийнятний для різних ситуацій. Перший спосіб є зручним у разі загального рівномірного зовнішнього опромінення, другий – при нерівномірному опроміненні, третій – при поглинанні радіонуклідів у різних тканинах і органах. Відомо, що такий радіонуклід, як ^{131}I вибірково накопичується в щитоподібній залозі хребетних, і тому дозу оцінюють із розрахунку на цей орган. ^{90}Sr зосереджується в поверхневих шарах кісток, і дозу потрібно перераховувати на цю тканину тощо.

У випадках опромінення великих популяцій людей, особливо при аваріях, доцільно виділяти критичні групи населення. *Критична група* – це сукупність осіб серед певного контингенту людей, які за умовами проживання, віком або станом здоров'я зазнають найбільшого ризику опромінення. Для оцінки ризику опромінення однієї людини або певної групи людей введено поняття індивідуальної та колективної еквівалентної дози, відповідно. Слід завжди пам'ятати, що ефективна доза розраховується для «умовної людини», а не для конкретного індивіда. Основна область застосування ефективної дози – це проведення перспективних оцінок при плануванні й оптимізації радіаційного захисту, а також для підтвердження дотримання граничних доз при проведенні регулювання. Не рекомендується використовувати ефективну дозу ні для проведення епідеміологічних оцінок, ні для проведення детальних ретроспективних досліджень індивідуального опромінення та ризику.

Колективна ефективна (еквівалентна) доза – це сума індивідуальних ефективних (еквівалентних) доз опромінення певної групи населення за певний період часу, або сума добутків середньогрупових ефективних доз на число осіб у відповідних групах, що утворюють колектив, для якого вона розраховується:

$$S = \sum E_i \cdot N_i, \quad (1.24)$$

де E_i – середня ефективна (еквівалентна) доза на підгрупу населення i ;
 N_i – число осіб в підгрупі.

Одиниця вимірювання – людино-Зіверт (люд.-Зв). Позасистемна одиниця – людино-бер. 1 люд.-Зв = 100 люд.-бер.

Величина колективної ефективної дози є інструментом для оптимізації і для порівняння різних радіаційних технологій і процедур захисту, переважно в контексті професійного опромінення. Колективна ефективна доза не є інструментом для епідеміологічних оцінок ризику, а також для прогнозування ризику. Підсумовування дуже низьких індивідуальних доз за дуже тривалий проміжок часу є неприпустимим. Зокрема, слід утримуватися від розрахунків числа випадків смерті від раку на основі колективних ефективних доз, отриманих шляхом простого додавання індивідуальних доз.

З метою оцінки ризику виникнення небажаних біологічних ефектів залежно від часу, протягом якого була одержана доза, введена *очікувана*, або *напіввікова, еквівалентна доза внутрішнього опромінення* (E_{50}). Вона є сумою еквівалентних доз, які людина одержує за певний період. При E_{50} період часу прийнято за 50 років для дорослих – середня тривалість періоду професійної діяльності людини, і 70 років для дітей (E_{70}). Одиниця очікуваної еквівалентної дози – Зіверт. Для кращого розуміння еквівалентної дози опромінення спробуйте приблизно розрахувати кількість опромінення, яка була отримана вашим організмом у минулому році. Для цього заповнить таблицю 1.4.

Порівняйте результати ваших розрахунків з наведеними нижче цифрами в таблиці 1.5 та оцініть ступінь тієї небезпеки, яку вносить в ваше життя радіація.

Співвідношення між одиницями виміру дози іонізуючого випромінювання наведені в таблиці 1.6. Для створення десяткових кратних і часткових одиниць радіоактивності в радіоекології широко використовують спеціальні символи (таблиця 1.7).

Еквівалентна та ефективна доза в тканинах тіла та організмі людини не можуть бути виміряні безпосередньо. В зв'язку з цим, система захисту включає в себе поняття операційних величин, які можуть бути виміряні та виходячи з яких, можна оцінити еквівалентну та ефективну дози.

Таблиця 1.4 – Приблизний розрахунок еквівалентної дози отриманої людиною за рік

Джерело іонізуючого випромінювання	Річна доза
КОСМІЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ:	
на рівні моря	0,3 мЗв
додайте на кожні 100 м над рівнем моря	0,03 мЗв
ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗЕМЛІ:	
у зоні вапняків	0,3 мЗв
у зоні осадових порід	0,5 мЗв
у зоні гранітів	1,2 мЗв
ВАШЕ ЖИТЛО:	
з дерева	0,01 мЗв
з цегли	0,1 мЗв
з бетону	0,5 мЗв
якщо ви живете в 30-км зоні АЕС, додайте	0,02 мЗв
якщо ви живете в 30-км зоні вугільних ТЕС, додайте	0,06 мЗв
ВАША ЇЖА:	
природні радіоізотопи, що містяться в продуктах (мінерали, м'ясо, овочі, риба тощо)	0,02 мЗв
ВАШІ ПОЛЬОТИ НА ЛІТАКАХ:	
на кожні 500 км додайте	0,04 мЗв
ВАША ВІДПУСТКА:	
тиждень відпустки в горах на висоті 2000 м	1 мЗв
ВАШЕ ЗДОРОВ'Я:	
рентгенографія легень	1 мЗв
рентгенографія зубів	0,2 мЗв
Флюорографія (одна процедура)	0,025 мЗв
Абдомінальна томографія	15 мЗв
РЕЗУЛЬТАТ ВАШОГО РОЗРАХУНКУ:	

Таблиця 1.5 – Найбільш ймовірні ефекти при різних значеннях доз опромінення цілого тіла

Величина дози	Коментар
10000 мЗв (10 Зв)	При короткочасному опроміненні спричинили б негайну хворобу та подальшу смерть протягом декількох тижнів
Між 2000 і 10000 мЗв (2-10 Зв)	При короткочасному опроміненні заподіяли б гостру променеви хворобу з імовірним фатальним результатом
1000 мЗв (1 Зв)	При короткочасному опроміненні, ймовірно, заподіяли б тимчасове нездужання, але не привели б до смерті. Оскільки доза опромінення накопичується протягом часу, то опромінення в 1000 мЗв ймовірно призвело б до ризику появи ракових захворювань багатьма роками пізніше
50 мЗв/за рік	Найнижча потужність дози, при якій можлива поява ракових захворювань. Опромінення при дозах вище цієї призводить до збільшення ймовірності захворювання на рак
10 мЗв/за рік	Максимальний рівень потужності дози, одержуваний шахтарями, які видобувають уран
3 мЗв/за рік	Нормальний радіаційний фон від природних джерел іонізуючого випромінювання, включаючи потужність дози майже в 2 мЗв/за рік від радону в повітрі. Ці рівні радіації близькі до мінімальних доз, одержуваних усіма людьми на планеті
0,1-0,6 мЗв/за рік	Типовий діапазон потужності дози від штучних джерел випромінювання, головним чином медичних
0,05 мЗв/за рік	Рівень фонові радіації, необхідний за нормами безпеки, поблизу ядерних електростанцій. Фактична доза поблизу ядерних об'єктів набагато менше

Таблиця 1.6 – Співвідношення між одиницями виміру дози іонізуючого випромінювання

Величина, її позначення	Одиниця, позначення		Співвідношення між одиницями
	SI	Позасистемна	
Активність радіонуклідів, A	Бекерель (Бк)	Кюрі (Кі)	1 Кі = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк
Експозиційна доза фотонного випромінювання, D_{exp}	Кулон на кілограм (Кл/кг)	Рентген (Р)	1 Р = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг
Потужність експозиційної дозы фотонного випромінювання, P_{exp}	Ампер на кілограм (А/кг)	Рентген за секунду (Р/с)	1 Р/с = $2,58 \cdot 10^{-4}$ А/кг
Поглинена доза випромінювання, D	Грей (Гр)	Рад (рад)	1 рад = 0,01 Гр
Потужність поглиненої дозы випромінювання, P_{abs}	Грей за секунду (Гр/с)	Рад за секунду (рад/с)	1 рад/с = 0,01 Гр/с
Керма, K	Грей (Гр)	Рад (рад)	1 рад = 0,01 Гр
Еквівалентна (ефективна) доза випромінювання, H_T (Е)	Зіверт (Зв)	Бер (бер)	1 бер = 0,01 Зв
Потужність еквівалентної (ефективна) дози випромінювання, $PH(E)$	Зіверт за секунду (Зв/с)	Бер за секунду (Бер/с)	1 Бер/с = 0,01 Зв/с
Коллективна ефективна (еквівалентна) доза, S	людино-Зіверт (люд.-Зв).	людино-бер (люд.-бер)	1 люд.-бер = 0,01 люд.-Зв
Енергія, e	Джоуль (Дж)	Електронвольт (eВ)	1 eВ $\approx 1,60 \cdot 10^{-19}$ Дж (приблизно)

Таблиця 1.7 – Префікси для утворення десяткових кратних і часткових одиниць активності радіонуклідів та їхні символи

Множник	Префікс	Символ префіксу		Множник	Префікс	Символ префіксу	
		міжна- родний	українсь- кий			міжна- родний	українсь- кий
10^{18}	Екса	E	Е	10^{-1}	Деци	d	д
10^{15}	Пета	P	П	10^{-2}	Сантис	c	с
10^{12}	Тера	T	Т	10^{-3}	Мілі	m	м
10^9	Гіга	G	Г	10^{-6}	Мікро	μ (micro)	мк
10^6	Мега	M	М	10^{-9}	Нано	n	н
10^3	Кіло	k	к	10^{-12}	Піко	p	п
10^2	Гекто	h	г	10^{-15}	Фемто	f	ф
10	Дека	da	да	10^{-18}	Ато	a	а

Контрольні запитання:

1. У чому принципова різниця між зовнішнім та внутрішнім опроміненням?
2. Дайте визначення активності нукліда в радіоактивному джерелі.
3. У яких одиницях вимірюються активності нукліда?
4. Побудуйте за допомогою EXCEL графік зменшення радіоактивного I^{131} .
5. Чому для опису загальної радіоактивності, що була внесена в світовий океан людством, або при оцінці кількості радіоактивності, що була викинута під час чорнобильської аварії використовують «Активність нукліда»
6. Дайте визначення експозиційної дози випромінювання.
7. У яких одиницях вимірюється експозиційна доза випромінювання?
8. Як впливають на організм людини різні дози випромінювання?
9. Дайте визначення потужності експозиційної дози.
10. Дайте визначення поглиненої дози випромінювання.
11. Як впливають на організм людини різні дози поглиненого опромінення?
12. Дайте визначення еквівалентної дози в органі або тканині.
13. Як впливають на організм людини різні дози еквівалентного опромінення?
14. Як змінюється радіаційно зважуючий фактор (коефіцієнт якості) для різних видів випромінювання?
15. Що таке тканинний зважуючий фактор?
16. Проведіть приблизний розрахунок еквівалентної дози, що була отримана вами за минулий рік. Порівняйте отриманий результат з таблицею 1.5.
17. Пригадайте префікси, які часто використовуються для утворення десяткових кратних і часткових одиниць активності радіонуклідів та їхні символи.

1.5 Джерела радіаційного забруднення навколишнього середовища

Джерела радіації поділяються на природні і штучні (створені людиною).

Природні джерела іонізуючого випромінювання (ІВ). Природну радіацію утворюють космічні промені, що падають на Землю з космосу, і радіоактивні речовини, що знаходяться в земних породах, повітрі, воді і продуктах харчування. Потужність космічних променів, що досягають поверхні Землі, коливається залежно від висоти над рівнем моря і географічної широти. На

рівні моря частка космічного випромінювання становить приблизно 15 % річної дози всіх природних джерел.

Опромінення від природних джерел переважає багато інших джерел і є істотним фактором еволюції живих організмів у біосфері. У цілому, за даними спеціального наукового комітету ООН, середня еквівалентна доза опромінення населення в промислово розвинених країнах земної кулі за рахунок природних джерел випромінювання становить 2,5-3,0 мЗв/рік.

До природних джерел ІВ належать: космічні випромінювання; природні натуральні джерела.

Космічне випромінювання. Космічне випромінювання складається з галактичного і сонячного, яке пов'язане з сонячними спалахами. Сонячне космічне випромінювання відіграє важливу роль за межами земної атмосфери, але через порівняно низьку енергію мало впливає на дозу випромінювання біля поверхні Землі. Космічне випромінювання складається з протонів (90 %), альфа-частинок, нейтронів, ядер атомів різних елементів та інших частинок. Інтенсивність космічного випромінювання залежить від сонячної активності, географічного розташування об'єкта і висоти над рівнем моря (рисунок 1.7). Залежність від широти пояснюється тим, що Земля подібна до гігантського магніту, унаслідок чого заряджені частинки відхиляються від свого шляху і проходять повз планети, інші – змінюють курс над екватором і збираються у вигляді воронки біля полюсів, закручуючись відповідно до напрямку силових ліній прямо над геомагнітним полюсом (цим, до речі, і пояснюється феномен північного сяйва, що виникає при проходженні інтенсивних космічних променів біля полюсів).

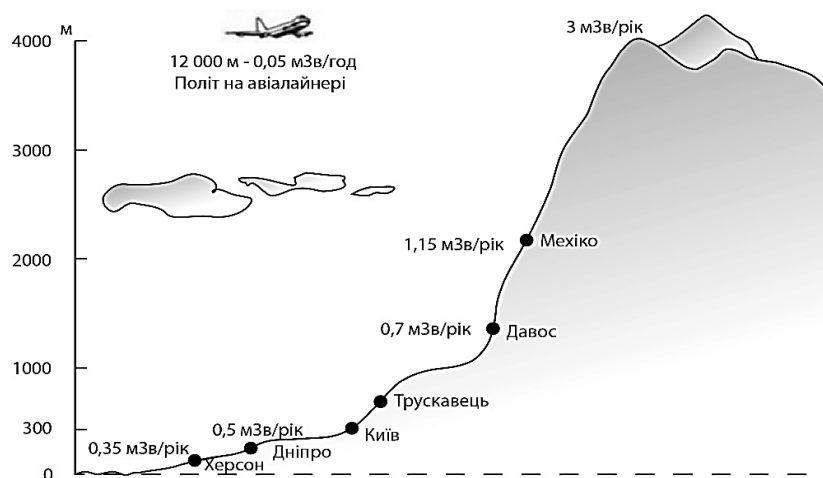


Рисунок 1.7 – Радіаційний вплив космічного випромінювання на людину

Інтенсивність космічного випромінювання зберігається відносно постійною на географічній широті між $\pm 15^\circ$ по обидва боки від екватора, а далі у міру руху до північної або південної широти $\pm 50^\circ$ швидко зростає, після чого знову залишається практично незмінною аж до полюсів. На вершині Евересту ($H = 8848$ м), найвищої точки земної поверхні, еквівалентна доза космічного випромінювання становить близько 8 мЗв/рік. Області поблизу екватора, які знаходяться на рівні моря, одержують найменшу дозу космічного випромінювання – близько 0,35 мЗв/рік. У географічних областях на широті 50° доза космічного випромінювання становить близько 0,5 мЗв/рік. Таку дозу отримують жителі, що проживають поблизу даної широти (Лондон, Нью-Йорк, Токіо, Торонто, Москва, Київ, Харків, Львів, Одеса, Дніпро).

Природні натуральні джерела. У біосфері Землі є більше 60 природних радіонуклідів, які можна розділити на три групи.

Перша група – ряд довгоживучих радіонуклідів, які входять до складу Землі з часу її утворення, – природні радіоактивні ряди – так називається послідовність генетично пов'язаних радіонуклідів, у яких кожний наступний нуклід виникає у результаті альфа- або бета-розпаду попереднього.

Друга група – радіонукліди, що не утворюють радіоактивного ряду і генетично не пов'язані з ним. До цієї групи належать 11 довгоживучих радіонуклідів (^{40}K , ^{87}Rb , ^{40}Ca , ^{120}Te , ^{138}La , ^{147}Sm), що мають періоди напіврозпаду від 10^7 до 10^{15} років.

Третя група – космогенні радіонукліди, які безперервно виникають у біосфері в результаті ядерних реакцій під впливом космічного випромінювання. Космогенні радіонукліди утворюються переважно в атмосфері у результаті взаємодії протонів і нейтронів з ядрами азоту, кисню і аргону, а далі потрапляють на земну поверхню з атмосферними опадами. До них належать ^3H , ^{14}C , ^7Be , ^{22}Na , ^{28}Mg , ^{32}P , ^{35}S , ^{39}Ar ,... – усього 14 радіонуклідів. Помітний внесок у дозу опромінення роблять ^3H , ^{14}C , ^7Be , ^{22}Na . При цьому ^3H і ^{14}C – це джерела внутрішнього опромінення, а основними джерелами зовнішнього опромінення є ^7Be , ^{22}Na та ^{24}Na .

Головне джерело надходження природних радіоактивних речовин у навколишнє середовище – гірські породи, що містять уран і торій. Їх період напіврозпаду обчислюється мільйонами років. У міру радіоактивного розпаду випромінювання випускають не тільки вони самі, але і їх численні дочірні

продукти з більш короткими періодами напіврозпаду. Наприклад, при розпаді урану-238 утворюється 13 радіоактивних дочірніх ізотопів. Найбільш небезпечними продуктами розпаду торію-232 є радій-226 і радон-222, що забезпечують разом зі своїми дочірніми продуктами приблизно 75 % річної дози опромінення, одержуваної населенням від усіх земних природних джерел радіації.

Найбільшою вагою з усіх джерел природної радіації володіє радон. Він дає приблизно половину дози опромінення людини, одержуваної від усіх природних джерел. Радон накопичується усередині приміщень, просочуючись через фундамент і підлогу із ґрунту або, рідше, вивільняючись з будівельних матеріалів. Близько 70-75 % дози опромінення населення України від усіх джерел природної радіоактивності припадає на радон. Винним є Український щит – тектонічна структура, яка проходить з півночі на південь майже посередині України і займає близько 30 % усієї території. Складається щит з гранітів та інших кристалічних порід, що характеризуються підвищеною радіоактивністю.

Природна радіоактивність рослин, фуражу і харчових продуктів обумовлена в основному калієм-40. Живий організм, засвоюючи калій як необхідний для нормальної життєдіяльності організму елемент, накопичує і радіоактивний калій-40. Невелика частина дози припадає на тритій і вуглець-14, що утворюються в атмосферному повітрі під впливом космічних променів.

Підвищену радіоактивність мають сланці, фосфорити. Тому фосфорні (а також азотні і калієві) мінеральні добрива часто є носіями радіоактивного забруднення ґрунтів і ґрунтових вод. Високу радіоактивність мають кальцієво-силікатний шлак, фосфогіпс, доменний шлак, вугільний шлак.

Аномалії природного фону. На планеті є місця, де рівні радіаційного фону підвищені внаслідок значних покладів радіоактивних мінералів. Виявлено п'ять основних населених місць, які мають істотно збільшений природний рівень радіації через певний склад ґрунту і гірських порід. Це Бразилія, Франція, Індія, о. Німує (Тихий океан) і Єгипет. Аномальні райони в Україні – Хмільник, Миронівка, Жовті Води, а також Дніпропетровська, Кіровоградська і Миколаївська області, де знаходяться рудники з видобування урану. У цих місцях рівні природного фону в десятки і сотні разів більші, ніж на іншій території.

Штучні джерела іонізуючого випромінювання. Відкриття рентгенівських променів стало початком ери практичного використання людиною штучних джерел ІВ, що створило реальні умови додаткового понадфонового опромінення.

У результаті господарської діяльності людини в навколишньому середовищі з'явилися понад 1500 штучних радіонуклідів, а кількість стійких (нерадіоактивних) нуклідів дорівнює 260.

На цей час в Україні існує близько 8 тис. підприємств і організацій, які використовують близько 100 тис. джерел ІВ.

До основних штучних джерел радіоактивних забруднювачів відносять:

- застосування радіонуклідів у народному господарстві (у різних галузях промисловості і сільському господарстві) і побуті;
- уранова і радіохімічна промисловість, підприємства ядерної енергетики;
- ядерні вибухи при випробуваннях ядерної зброї;
- застосування РН у медицині.

Використання ІВ і РВ у медицині для діагностики і радіотерапії – це основне джерело штучного опромінення людей, що перевищує вплив усіх інших штучних джерел. Ці дози створюються при рентгенівській діагностиці людей, діагностиці стану окремих органів (легень, печінки, нирок, щитовидної залози та ін.) за допомогою радіоактивних препаратів, які вводяться всередину організму, а також радіаційної терапії з використанням радіоактивних джерел (^{60}Co , ^{137}Cs).

За даними наукового комітету ООН, ефективна еквівалентна доза від радіонукліда, що найбільш часто використовується ядерною медициною з метою діагностики, технецію-99 знаходиться у межах від 1 до 10 мЗв.

При рентгенографії пальців людина одержує місцеве разове опромінення – 0,6 мЗв; черепа – 8-60 мЗв; зубів – 30-50 мЗв; хребта – 16-147 мЗв; при рентгеноскопії грудної клітки – 47-195 мЗв; шлунка (абдомінальна томографія) – до 300 мЗв; при флюорографії легень – 2-5 мЗв. Персонал і хворі курортів, де лікують радоновими ваннами, одержують дозу опромінення порядку 300 мЗв/рік, що в 6 разів перевищує встановлені міжнародні норми.

У розвинених країнах на 1000 жителів потрібно від 300 до 900 обстежень на рік, не рахуючи рентгенологічних обстежень зубів і масової флюорографії. У

середньому населення України внаслідок зазначених процедур одержує ефективну дозу опромінення всього тіла близько 1,8 мЗв/рік.

Таким чином, у сучасних умовах за наявності високого природного радіаційного фону, при діючих технологічних процесах, при використанні радіоактивних препаратів у медичних цілях кожен мешканець України щорічно одержує ефективну еквівалентну дозу в середньому 4,75 мЗв (космічне випромінювання – 0,5 мЗв, природні натуральні джерела – 2,25 мЗв, штучні джерела – 0,2 мЗв, медичні джерела – 1,8 мЗв). Індивідуальні річні дози опромінення можуть змінюватися в досить широких межах. Про те, наскільки глибоко в побут людини увійшла радіація, свідчать такі фактори:

- для одержання стійкої фарби на банкнотах застосовується вуглець-14;
- для одержання гарної жовтої емалі на кераміці або коштовних прикрасах застосовують уран;
- для додання блиску штучним фарфоровим зубам широко використовують уран і цезій. Вони можуть бути джерелами опромінення тканин порожнини рота, тому рекомендують припинити їх застосування;
- уран і торій використовуються при виробництві оптичного скла, керамічного і скляного посуду;
- при виробництві люмінофорів використовуються радіоактивні матеріали;
- солі радію використовують при виготовленні фарб, які мають властивість світитися, такі фарби наносять на циферблати і стрілки годинників, застосовують у прицільних пристроях, у театрі, рекламі тощо. Такі годинники дають річну індивідуальну дозу, яка перевищує в 4 рази ту, що виникає внаслідок викидів на АЕС;
- рентгенівські апарати, що використовуються в аеропортах для перевірки багажу пасажирів;
- пожежні димові детектори містять радій або плутоній (у США до кінця 1980 р. було встановлено більше 26 млн таких детекторів).

У промисловості за допомогою радіонуклідів здійснюється контроль якості виробів (дефектоскопія), контроль технологічних процесів. Використання іонізуючих властивостей радіоактивних речовин знаходить застосування в блокуючих пристроях – джерело слабого випромінювання надягають як браслет або кільце на руку робітника. Коли рука наближається до небезпечної зони обладнання, випромінювання впливає на датчик,

перетворюючи його в електричний сигнал, який подається на тиратрон і реле, що розриває ланцюг магнітного пускача, і обладнання зупиняється. Використання радіонуклідів у ролі, так званих, мічених атомів дозволило вивчити нові закономірності і зробити важливі відкриття в біології, хімії, металургії та інших галузях народного господарства.

ІВ знайшло широке застосування і в сільському господарстві:

- для одержання мутацій і використання їх у селекційній роботі для виведення нових сортів у рослинництві. Цей метод дозволяє значно скоротити час виведення конкретних сортів;
- для підвищення продуктивності сільськогосподарських рослин шляхом передпосівного опромінення насіння. Картопля, вирощена з опромінених коренеплодів, містить більше крохмалю, білків і вітаміну С, ніж контрольні коренеплоди;
- для подовження термінів зберігання продукції рослинництва без істотної зміни її якості;
- велике значення має гамма-опромінення ягід і фруктів, що швидко псуються. Це знижує їх зараженість мікроорганізмами, плісневими спорами і т. п.;
- використання методу радіоактивних індикаторів, який дозволяє вивчити ефективність різних термінів і методів внесення у ґрунт добрив;
- використання радіації для боротьби з комахами-шкідниками зерна, борошна, крупи. Якщо зерно перед завантаженням в елеватор пропустити через бункер з потужним джерелом гамма-випромінювання (^{60}Co), то розмноження комірною кліща виключається і зерно може зберігатися тривалий час без будь-яких втрат;
- застосування радіаційних технологій у тваринництві і ветеринарії. Великі дози ІВ згубно діють на мікрофлору, що використовується при консервації тваринницької продукції (досягається практично повна стерилізація продукції).

Останнім часом з'явилася серйозна небезпека радіоактивного забруднення навколишнього середовища у зв'язку з використанням радіоактивних джерел у космічних дослідженнях. На космічних кораблях використовуються бортові атомні електростанції, у системі ПРО використовується рентгенівський лазер з ядерним накачуванням, різного роду прискорювачі елементарних частинок. У

червні 1969 р. в результаті аварії американського супутника відбулося зараження атмосфери над Індійським океаном плутонієм-238, при цьому втрос збільшився вміст плутонію у навколишньому середовищі.

В наслідок згорання вугілля в ТЕС або в житлових будинках відбувається і радіоактивне забруднення навколишнього середовища. У вугіллі містяться природні радіонукліди: калій-40, уран-238, торій-232 і продукти їх розпаду. Викид цих радіонуклідів в атмосферу залежить від зольності вугілля і ефективності очисних фільтрів ТЕС. Фахівцями підраховано, що радіоактивні викиди ТЕС на порівнянних відстанях на 1-3 порядки більші, ніж від нормально працюючої АЕС. Вважається, що населення, яке проживає в районі ТЕС (у радіусі 20 км), одержує за рік додаткову середню індивідуальну дозу опромінення до 0,06 мЗв.

Випробування ядерної зброї та аварії на ядерних реакторах становлять окрему небезпеку. При ядерному вибуху утворюється понад 200 різних радіоізотопів, які є як безпосередніми уламками поділу ядер важких елементів (урану-235, плутонію-238, плутонію-239), так і продуктів їх розпаду. Частина з них розпадається в найближчі хвилини і години після вибуху, інші протягом декількох днів, а такі, як стронцій-90, цезій-137, сурма-126 і ін., мають період напіврозпаду від 1 року до декількох десятків років. Як джерела внутрішнього опромінення найбільш небезпечні радіонукліди йоду, цезію, стронцію, плутонію, торію.

У 1963 р. США, СРСР і Великобританія підписали договір про припинення експериментальних ядерних вибухів в атмосфері, космічному просторі і під водою. Франція відмовилася приєднатися до цього договору і продовжувала випробування і в атмосфері до 1974 р., а КНР – до 1980 р. Підземні випробування тривали до 1996 р. Ядерну зброю випробовували на полігонах Маралінга, (Австралія), Семіпалатинську (СРСР), штату Невада біля Лас-Вегаса (США), на атолі Муруроа (Французька Полінезія) і в китайській провінції Сичуань.

З точки зору безпеки забруднення біосфери продуктами ядерних вибухів, найбільш важливе значення мають наземні вибухи. У цьому випадку вогняна куля, що утворюється при ядерних вибухах, торкається поверхні Землі, і величезні маси ґрунту випаровуються і втягуються у вогняну кулю. Досить зазначити, що при наземному ядерному вибуху потужністю 20 кт на місцевості

із супіщаним ґрунтом утворюється вирва діаметром 81 м і глибиною 19 м. Залежно від потужності ядерного вибуху і характеру ґрунту загальний викид ґрунту при наземному вибуху потужністю 1 кт становить приблизно 5000 т, а при потужності 20 кт – 20000 т. У результаті випробування ядерної зброї до 1963 р. у стратосфері (8-55 км) підняте більше 200 млн т радіоактивного пилу, який випадав по всій земній кулі протягом кількох років. Оскільки тепер глобальні випадання зі стратосфери переважно визначаються довгоживучими продуктами поділу ^{90}Sr , ^{137}Cs і ^{14}C , то можна вважати, що кожен мешканець Землі за рахунок ядерних випробувань одержує річну дозу порядку 0,02 мЗв.

Контрольні запитання:

- 1. Дайте характеристику природних джерел радіації.*
- 2. Охарактеризуйте особливості космічного випромінювання.*
- 3. Дайте характеристику природних натуральних джерел радіації.*
- 4. Що таке аномалії природного радіоактивного фону?*
- 5. Що являють собою штучні джерела радіації?*
- 6. Як застосовують ІВ в сільському господарстві?*
- 7. Чому в наслідок випалювання вугілля в ТЕС або в житлових будинках відбувається радіоактивне забруднення навколишнього середовища?*
- 8. У чому основна небезпека забруднення біосфери продуктами ядерних вибухів?*

2 БІОЛОГІЧНА ДІЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ

(Змістовий модуль 2)

2.1 Основи біологічної дії іонізуючого випромінювання

2.1.1 Чутливість біологічних систем і організмів до радіації

Радіація за своєю природою шкідлива для життя. Малі дози опромінення можуть «запустити» не до кінця ще встановлений ланцюг подій, що призводить до раку або до генетичних ушкоджень. Випромінювання радіоактивних речовин виявляє дуже сильний вплив на всі живі організми. Навіть порівняно слабке випромінювання, яке при повному поглинанні підвищує температуру тіла лише на 0,001 °С, порушує життєдіяльність клітин.

При великих дозах радіація може руйнувати клітини, пошкоджувати тканини органів і бути причиною загибелі організму. Ушкодження, викликані великими дозами опромінення, звичайно проявляються протягом декількох годин або днів. Ракові захворювання, однак, проявляються через багато років після опромінення, як правило, не раніше ніж через 1-2 десятиліття. А вроджений порок розвитку й інші спадкові хвороби, викликані ушкодженнями генетичного апарату, за визначенням проявляються лише в наступних поколіннях: це діти, онуки й більш віддалені нащадки індивідуума, що підпав під дію опромінення.

Іонізуючі випромінювання, впливаючи на організм людини й тварин, іонізують атоми й молекули, з яких складається жива тканина, викликаючи радіаційні ураження життєво важливих органів. У першу чергу іонізується вода, що входить до складу тканин і органів людини, іони вступають у взаємодію з киснем тканин, утворюючи пероксидні сполуки, які самі є сильними окиснювачами й приводять до змін і загибелі живих клітин.

Отже, в основі первинних, пускових механізмів вражаючої дії іонізуючого випромінювання лежать процеси іонізації й порушення атомів і молекул, їх руйнування, що дає початок утворенню хімічно активних уламків, що вступають згодом у реакції з різними структурами клітин організму. Надалі це призводить до порушення обміну речовин і зміни функцій органів і тканин.

Чутливість біологічних систем і організмів підвищується в міру збільшення маси тіла й ступеня організації організму. Найбільш стійкі до радіації спори, потім рослини, найпростіші організми, найбільш чутливі – тварини (рисунок 2.1).

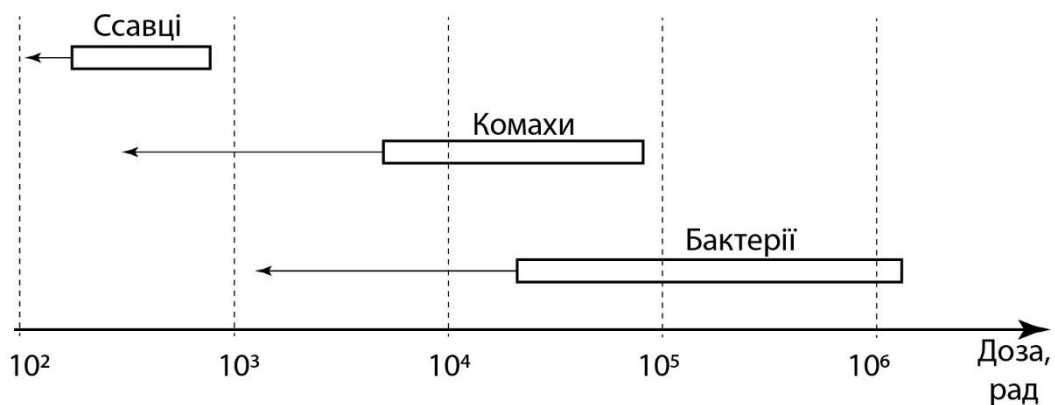


Рисунок 2.1 – Порівняльна чутливість організмів до радіації

Вертикальні риси ліворуч вказують рівні, при яких у більш чутливих видів даної групи можуть виникнути серйозні порушення функції розмноження. Риски праворуч вказують рівні, що викликають негайну загибель більшої частини організмів (осіб). Стрілки, спрямовані ліворуч, вказують нижні межі доз, які можуть викликати загибель або ушкодження чутливих стадій життєвого циклу, наприклад, ембріонів.

Загалом ссавці мають найбільшу чутливість. А мікроорганізми – найбільш стійкі. Найбільш чутливі до опромінення – клітини, які діляться (цим пояснюється зниження чутливості з віком). Людину відносять до одного з найбільш чутливих до радіації біологічних об'єктів. Загибель її в 50 % випадків спостерігається при дозах опромінення 4 Зв (400 бер) (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Дози, при яких 50 % опромінених гине впродовж 30 діб

Біологічний об'єкт	Доза опромінення, Зв	Біологічний об'єкт	Доза опромінення, Зв
Рослини	10-1500	Мавпи	2,5-6
Найпростіші	1000	Людина	4
Молюски	200	Морські свинки	4
Змії	80-200	Собаки	2,4-4
Комахи	10-100	Кози	3,5
Риби, птахи	8-20	Віслюки	3
Миші	6-15	Вівці	2
Пацюки	7-9		

Шкідлива дія радіоактивного випромінювання пов'язана з опроміненням, яке буває зовнішнім і внутрішнім.

2.1.2 Зовнішнє опромінення

Під зовнішнім опроміненням необхідно розуміти такий вплив випромінювання на людину, коли джерело радіації знаходиться поза організмом і виключена ймовірність потрапляння радіоактивних речовин усередину організму. При цьому людина опромінюється тільки впродовж того часу, котрий вона знаходиться поблизу джерела випромінювання. При зовнішньому опроміненні найбільш небезпечне рентгенівське, гамма- і нейтронне опромінення. Біологічний ефект залежить від дози опромінення,

його виду, часу впливу, розмірів опромінюваної поверхні, індивідуальної чутливості організму. Альфа- і бета-частинки, маючи незначну проникну здатність, викликають при зовнішньому опроміненні тільки шкірні ураження. Зовнішнє гамма-опромінення людини поза приміщеннями (будинками) зумовлене наявністю радіонуклідів у різних природних середовищах (грунті, приземному повітрі, гідросфері і біосфері). Основний внесок у дозу зовнішнього гамма-опромінення дають гамма-радіонукліди урано-радієвого і торієвого рядів і калій-40. При цьому головними джерелами зовнішнього гамма-опромінення в повітрі торієвої серії радіонуклідів є торій-228 і радій-224, а в урановому ряду 99 % дози визначається гамма-випромінюванням свинцю-214 і вісмуту-214. Так, щорічна доза, яку отримує населення від радіонуклідів, що знаходяться в зовнішньому середовищі, становить від 0,32 до 0,82 мЗв залежно від умов місцевості. Середня щорічна еквівалентна доза зовнішнього опромінення для населення всієї земної кулі береться такою, що дорівнює 0,65 мЗв. Якщо людина знаходиться в приміщенні, доза зовнішнього опромінення змінюється під впливом двох протилежно діючих чинників: екранування зовнішнього випромінювання будинком і випромінювання природних радіонуклідів, що знаходяться в матеріалах, з яких збудовано будинок. Залежно від концентрації ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th у різних будівельних матеріалах потужність дози в будинках значно змінюється.

Якщо за одиницю взяти такий матеріал, як дерево, то мешканці, що проживають у будинках з іншого будівельного матеріалу, одержують річну дозу:

- з вапняку – в 1,3 рази більшу;
- з бетону, цегли – в 3 рази;
- з пемзового каменю – в 10 разів;
- з граніту – в 10-12 разів.

2.1.3 Внутрішнє опромінення

Внутрішнє опромінення людини створюється радіонуклідами, що потрапляють в організм разом із їжею, повітрям і водою. З них найбільш вагомий вклад в ефективну еквівалентну дозу вносять ^{40}K , ^{14}C , ^{87}Rb , ^{210}Po , ^{226}Ra , а також радон-222 і радон-220 (торон). При попаданні радіонуклідів усередину

організму людина зазнає постійного опромінення до того часу, поки радіонуклід не виведеться з організму в результаті розпаду або фізіологічного обміну. Це опромінення дуже небезпечне, тому що викликає ураження різних органів, які довго не заживають.

Можливі чотири шляхи проникнення радіоактивних речовин в організм: через органи дихання, шлунково-кишковий тракт (ШКТ), ушкодження і розриви на шкірі і шляхом абсорбції через здорову шкіру. Найбільш небезпечний перший шлях, оскільки об'єм повітря, що споживає людина, становить 20 м³/добу, а з їжею людина споживає тільки 2,2 л води за добу (800 л/рік). В легенях цезій і стронцій всмоктуються на 100 %. При цьому засвоєння і відкладання в організмі радіонуклідів, як правило, вище, ніж при заковтуванні. Засвоєння через ушкоджену шкіру у 200-300 разів менше, ніж через ШКТ, і не має істотного значення порівняно з цими двома шляхами.

При попаданні радіоактивних речовин в організм будь-яким шляхом вони вже через кілька хвилин виявляються в крові. Якщо надходження радіоактивних речовин було однократним, то концентрація їх у крові спочатку зростає до максимуму, а потім протягом 15-20 діб знижується.

Радіоактивні аерозолі залежно від дисперсності частинок по-різному затримуються в різних відділах дихальних шляхів. Так, аерозолі з розміром частинок більше 1 мкм переважно затримуються у верхніх дихальних шляхах і виштовхуються назовні; частинки до 1 мкм – у трахеобронхіальній ділянці, а частинки менше 0,1 мкм – у легневих альвеолах. При цьому нерозчинні частинки зберігаються в легенях, і легенева тканина одержує певну дозу радіації, а розчинні радіонукліди потрапляють у кров і далі разом із нею надходять до різних тканин організму. Отже, частка радіонуклідів, які потрапляють з легень до інших органів, значною мірою залежить від дисперсності аерозолів, які вдихаються. Швидкість переходу радіонуклідів з легень до інших органів організму тим вища, чим краща розчинність аерозолів, що вдихаються, у фізіологічних рідинах організму і, зокрема, у лімфі крові. При пероральному (травним каналом) надходженні радіоактивні речовини потрапляють у ШКТ, звідки всмоктуються в кров і розносяться по різних органах і тканинах. Чим менша розчинність сполуки, що містить радіонуклід, тим більше її проходить транзитом по ШКТ і евакуюється з організму.

Радіоактивні речовини, які потрапили через шкіру, надходять безпосередньо в кров, і далі радіонукліди залежно від хімічних властивостей накопичуються в конкретних органах, що спричиняє високі локальні дози радіації. Якщо радіонукліди не закріпилися в тканинах і органах тіла, вони через деякий час проходять через нирки і виводяться із сечею.

Процес виведення радіонуклідів характеризується такими показниками, як період біологічного напіввиведення та ефективний період напіввиведення.

Період біологічного напіввиведення T_b – це час, протягом якого кількість (активність) даного радіонукліда в організмі зменшується вдвічі внаслідок його фізіологічного обміну.

Ефективний період напіввиведення $t_{эф}$ – це час, протягом якого кількість (активність) радіонукліда в організмі зменшується вдвічі внаслідок радіоактивного розпаду і біологічного виведення:

$$t_{эф} = \frac{T_{1/2} \cdot T_b}{(T_{1/2} + T_b)}, \quad (2.1)$$

Одним з важливих показників є коефіцієнт всмоктування. Всмоктуваність радіоактивних речовин у шлунково-кишковому тракті визначається, в основному, їх розчинністю у біологічних середовищах (кров, лімфа), а також потребою організму в них або в їх аналогах. Добре всмоктуються ізотопи елементів, необхідних організму – натрій, калій, магній, цезій, кальцій, стронцій, барій, рутеній та ін.

Величина дози, що визначає тяжкість ураження, залежить від того, одержує її організм відразу або в декілька прийомів. Більшість органів встигає, тією чи іншою мірою, залікувати радіаційні ушкодження й тому краще витримує серію дрібних доз, ніж таку ж сумарну дозу опромінення, що отримана за один прийом.

Слід зазначити, що найбільш уразливими до опромінення органами людини є червоний кістковий мозок та інші елементи кровотворної системи, репродуктивні органи, легені й кровоносні судини.

Тяжкість виникаючих наслідків для людини залежить від дози опромінення. Чим більша доза, тим важчі наслідки. При цьому існує мінімальна доза, при якій негативний вплив не виникає. Вона називається граничною

дозою. Так, при дозі опромінення всього тіла в 1 Зв (100 бер) і вище, як правило, виникає гостра променева хвороба. У людини з'являються нудота, блювання, зміни параметрів крові і т. д. Нижче цієї дози опромінення зазначені ефекти не виявляються.

Крім індивідуальних відмінностей, необхідно також враховувати радіочутливість крайніх вікових груп – дітей і людей похилого віку. У тканинах дитячого організму концентрація найбільш радіочутливих молекул і клітин вища, ніж у дорослого, тому зростає можливість прямої дії радіації, а внаслідок великого питомого вмісту радіофікованої води – і побічного впливу. З іншого боку, дитячий організм має високу здатність до відновних процесів. У літніх людей відновні процеси сповільнюються, мають меншу ефективність, що й визначає підвищену вразливість осіб цього віку. Період напіввиведення цезію-137 у дорослих – близько 140 діб, а у дітей, залежно від віку, – від 50 до 20 діб. Чим молодший організм, тим швидше (за інших однакових умов) він очищається від радіонуклідів.

Гостре короткочасне опромінення більш небезпечне, ніж опромінення такою ж сумарною дозою, але протягом тривалого часу. Наприклад, якщо доза загального гострого (короткочасного) опромінення людини, що дорівнює 4 Зв (400 бер), в 50 % випадків може призвести до смертельного результату, то загальне опромінення такою самою дозою протягом десятків років не дає ніяких безпосередніх негативних ефектів. При систематичному опроміненні дозами нижче 1 Зв (викликає гостру променево хворобу), але в сумі набагато більшими за гранично допустимі, спостерігаються зміни складу крові (недокрів'я) і ряд симптомів розладу нервової системи (лейкози, злоякісні пухлини різних органів і тканин, катаракти, ураження шкіри, скорочення тривалості життя). Віддалені наслідки, зумовлені впливом ІВ, можна оцінити тільки статистичними методами. При відносно низьких дозах опромінення, навіть в умовах проживання населення в зонах, що підпали під радіоактивне забруднення внаслідок аварії на атомних станціях, з дозовими навантаженнями до 5 мЗв/рік змін стану здоров'я, що прямо залежать від іонізуючого опромінення, як правило, не спостерігається.

Усі ефекти радіації пов'язані тільки з дозою радіації й не залежать від джерел опромінення. Організм не розрізняє дози від природних джерел, рентгенівського опромінення або викидів АЕС.

2.1.4 Токсичність радіонуклідів

Радіонукліди сильно відрізняються за токсичністю дії, тобто за здатністю завдавати променеве ушкодження. Радіотоксичність нуклідів залежить від наступних чинників.

- 1) Рівень середньої енергії одного акту розпаду. Наприклад, поглинена доза від вуглецю-14 з енергією одного акту розпаду 0,053 MeV буде набагато меншою порівняно з дозою, що створюється при розпаді фосфору-32, середня енергія бета-випромінювання якого становить 0,68 MeV.
- 2) Вид випромінювання. Променеве ураження від джерела альфа-випромінювання буде більшим порівняно з джерелом бета-випромінювання.
- 3) Шляхи надходження радіонуклідів в організм людини. Найбільш небезпечним є надходження радіонукліда при вдиханні повітря.
- 4) Здатність радіонукліда накопичуватися в конкретних органах. За характером розподілу радіонуклідів в організмі чітко вирізняються три групи, які концентруються в кістках, у всьому тілі, у печінці. Окремо можна відзначити йод-131, до 30 % якого відкладається у щитовидній залозі, яка складає тільки 0,03 % маси тіла. Критичними органами, які найбільше піддаються дії радіації, є гонади, кістковий мозок, кровотворні органи.
- 5) Час перебування радіонукліда в організмі, що залежить від періоду напіввиведення. За ступенем радіаційної небезпеки всі радіонукліди як потенційні джерела внутрішнього опромінення поділяються на чотири групи (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 – Класифікація радіонуклідів за ступенем радіаційної небезпеки

Група	Ступінь радіотоксичності	Мінімально значуща активність, мкКі	Радіонукліди
А	Дуже висока	0,1	^{210}Po , ^{226}Ra , ^{232}U , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{210}Pb
Б	Висока	1	^{90}Sr , ^{131}I , ^{224}Ra , ^{235}U
В	Середня	10	^{32}P , ^{35}Ca , ^{89}Sr , ^{137}Cs , ^{24}Na , ^{42}K , ^{60}Co
Г	Мала	100	^3H , ^{14}C , ^{55}Fe , ^{69}Zn , $^{131-136}\text{Cs}$

2.1.5 Радіотоксикологічні характеристики деяких радіонуклідів

Стронцій. Відомі 18 радіоізоотопів стронцію. Більшість із них короткоживучі, лише чотири радіонукліди мають період напіврозпаду від 1 доби до 2 місяців і один, найпоширеніший – стронцій-90 – більше 2 років. Стронцій-90 є наявним у відходах ядерної промисловості, але основне джерело забруднення ним зовнішнього середовища – атомні вибухи й аварії на атомних реакторах. Стронцій-90 добре розчиняється у воді, тому його рухливість у ґрунті досить висока. Найбільша розчинність стронцію відзначена в ґрунтах з низьким рівнем кислотності і мінімальним вмістом обмінного кальцію, тому з таких ґрунтів стронцій легко засвоюється рослинами. Потрапивши в шлунково-кишковий тракт, стронцій добре (на 20-70 %) всмоктується у кров'яне русло. Його всмоктуваність залежить від виду, віку, фізіологічного стану й характеру харчування тварини або людини. У дорослої людини всмоктування стронцію становить 20-30 %. При нестачі кальцію й білка в раціоні харчування всмоктуваність ізотопу може підвищуватися до 50-60 % через те, що стронцій є хімічним аналогом кальцію і може накопичуватися замість нього.

При вдиханні розчинні сполуки стронцію швидко елімінують із легень. Проникнення стронцію через неушкоджену шкіру становить близько 1 %, через ушкоджену (різана рана, опік), як і з підшкірної клітковини й м'язової тканини, стронцій всмоктується майже повністю. Незалежно від шляху й режиму потрапляння в організм розчинні сполуки стронцію вибірково накопичуються в кістках. У м'яких тканинах затримується менше 1 % стронцію-90.

Біологічна дія стронцію-90 при попаданні в організм людини або тварини обумовлюється бета-частинками, що випускаються ним самим і його дочірнім продуктом розпаду – ітрієм-90. Середній пробіг бета-частинок у тканинах тварин у стронцію-90 становить – 0,5 мм, ітрію-90 – 4 мм. У кістковій тканині через її більшу щільність порівняно з м'якими тканинами пробіг бета-частинок менший.

Накопичуючись у кістках, стронцій-90 залишається там тривалий час, постійно опромінюючи тканини, внаслідок чого в кістковій тканині й кровотворному кістковому мозку патологічні зміни настають у значно більшому ступені, ніж в інших органах і тканинах організму. Більші дози стронцію-90 викликають променеви хворобу. При тривалому надходженні його

в організм у відносно малих кількостях можуть розвинути радіаційні ураження у вигляді гальмування росту, зміни в кровотворних органах і картині крові, зниження імунологічних і захисних властивостей, гальмування вироблення антитіл при вакцинації, порушення обміну речовин.

Цезій. З 30 радіоактивних ізотопів цезію більшість є короткоживучими із секундними й хвилинними періодами напіврозпаду й тільки два радіоізотопи довгоживучі – цезій-134 з періодом напіврозпаду 2,06 року й цезій-132 з періодом напіврозпаду близько 30 років. У навколишнє середовище цезій може надходити при ядерних вибухах і аваріях на ядерних реакторах, а також у результаті викидів радіоактивних відходів в атмосферу й водойми підприємствами ядерної промисловості, атомними електростанціями й суднами з ядерно-енергетичними установками. Найбільшу біологічну небезпеку становить цезій-137. Це бета-випромінювач із середньою енергією бета-частинок. При його розпаді утворюється дочірній радіонуклід барій-137 з періодом напіврозпаду 2,55 хвилин, який супроводжується випускненням гамма-квантів. Властивості цезію аналогічні калію. Подібно калію він активно включається в біологічний колообіг, мігрує по біологічних ланцюгах і доходить до організму людини. Розчинність солей цезію, що випали на ґрунт при глобальних опадах, становить 80-100 %. Оскільки цезій не утворює важкорозчинних сполук у широкому діапазоні кислотності, він легко доступний для рослин і накопичується в них. В організм тварин цезій потрапляє із забрудненим кормом, водою й, у меншій мірі, із вдихуванним повітрям. В організмі людини всмоктуваність цезію-137 досягає 100 %. Цезій накопичується в основному в м'яких тканинах, тільки 4 % його відкладається в кістках. Виводиться цезій з організму з калом (10-30 %) і сечею (70-90 %). Період напіввиведення цезію з організму залежить від виду тварини, її віку й характеру харчування. У дорослої людини він становить близько 100 діб, у дітей до 1 року – 10-20 діб. Цезій добре переходить із організму матері до плода. Величина переходу залежить від строку вагітності й тривалості надходження радіонуклідів. При потраплянні цезію у водойми він швидко мігрує в донні відкладення, засвоюється планктоном. Риба активно накопичує ізотопи цезію й може бути одним з основних джерел потрапляння його в організм людини. Накопичуючись у м'яких тканинах, цезій створює внутрішнє опромінення, яке при рівноважному вмісті цезію 6,66 мкКі на рік може

досягати 1 бер. Внутрішнє опромінення цезієм-137 викликає такий самий біологічний ефект, як і зовнішнє опромінення організму при аналогічних дозах.

Йод. З 24 радіоізотопів йоду радіаційно-гігієнічне значення має один – йод-131 з періодом напіврозпаду 8,04 доби. Він є бета- і гамма-випромінювачем. Йод дуже активний елемент, добре засвоюється рослинами, водними організмами. При потраплянні в шлунково-кишковий тракт із їжею він на 100 % всмоктується в кров. Основна маса йоду, що всмоктався (60-80 %), вибірково накопичується у щитовидній залозі. Вміст 0,06 мкКі йоду-131 у щитовидній залозі створює дозу опромінення в 1 бер. У міру наростання патологічних змін у щитовидній залозі з'являється симптомокомплекс: знижується температура тіла, підвищується нервова збудливість, уповільнюється серцебиття, збільшується проникність судин. При нагромадженні в легенях ізотопи йоду викликають захворювання бронхітом, пневмонією. Радіоактивні ізотопи йоду можуть індукувати пухлини в щитовидній залозі, аденогіпофізі, статевих залозах та інших органах.

Плутоній. Відомо 15 ізотопів плутонію. Найбільш значущий із них – плутоній-239 з періодом напіврозпаду 24400 років, що випромінює при розпаді альфа-частинки. Плутоній-239 є одним із найбільш радіаційно небезпечних елементів. У зовнішнє середовище плутоній-239 потрапляє при випробуваннях ядерної зброї, аваріях на АЕС і переробці відпрацьованого ядерного палива. Сполуки плутонію в ґрунті погано розчинні, тому практично нерухомі, недоступні для кореневої системи рослин. При поверхневому забрудненні листя рослин плутоній може потрапити в шлунково-кишковий тракт тварин, однак всмоктується він з нього погано. При вдиханні всмоктуваність, а отже, і небезпека опромінення плутонієм в 100 разів вищі, ніж при попаданні з їжею. Плутоній-239 – це переважно джерело альфа-випромінювання з дуже високою енергією випромінювання (більше 3 МеВ). Він відкладається в скелеті, тим самим впливаючи на червоний кістковий мозок, а також у печінці і нирках. У кістковій тканині відкладається до 90 %, у печінці – 7 % і в нирках – 1 % плутонію. Оскільки ефективний період напіввиведення $T_{\text{еф}}$ становить 100 років, плутоній впливає на організм протягом усього життя людини. Встановлено, що 400 г плутонію достатньо, щоб викликати рак легень у 10 млрд людей.

Радон. Найбільшою вагою з усіх джерел природної радіації володіє радон. Це важкий газ (у 7,5 рази важчий, ніж повітря), що не має кольору,

запаху і смаку. При розпаді випромінює альфа-частинки. Радон вивільняється із земної кори повсюди. Він накопичується усередині приміщень, просочуючись через фундамент і підлогу із ґрунту або, рідше, вивільняючись із будівельних матеріалів. Під землею радон змішується з природним газом, який потім використовується в побутових газових плитах, і таким чином потрапляє в приміщення. Концентрація його значно збільшується за відсутності надійних витяжних систем. Концентрація радону в закритих приміщеннях звичайно у вісім разів вища, ніж на вулиці, а на верхніх поверхах нижча, ніж на першому. Він дає приблизно половину дози опромінення людини, що одержується від усіх природних джерел. Основна частина опромінення спричинена не самим радоном, а продуктами його розпаду. Радон надходить до організму при диханні разом з повітрям. При кип'ятінні радон випаровується, у сирій воді його набагато більше. Основну небезпеку викликає його потрапляння в легені з водяною парою. Найчастіше це відбувається у ванній кімнаті, коли людина приймає гарячий душ. Радон, потрапляючи в організм, відразу ж уражає залози внутрішньої секреції, гіпофіз, кору надниркових залоз. Це викликає задишку, серцебиття, мігрень, тривожний стан, безсоння. Іноді розвиваються злякисні пухлини в легенях, печінці, селезінці.

Контрольні запитання:

1. *Які особливості біологічної дії іонізуючого випромінювання на організм людини?*
2. *Які особливості дії радіації при зовнішньому та внутрішньому опроміненні?*
3. *Які існують шляхи надходження радіонуклідів до організму?*
4. *Що таке «період біологічного напіввиведення», «ефективний період напіввиведення», «коефіцієнт всмоктування»?*
5. *Від чого залежить токсичність радіонуклідів?*
6. *Як класифікуються радіонукліди за ступенем радіаційної небезпеки?*
7. *У чому основна небезпека накопичення стронцію-90 в організмі людини?*
8. *У чому основна небезпека накопичення цезію-137 в організмі людини?*
9. *У чому основна небезпека накопичення йоду-131 в організмі людини?*
10. *У чому основна небезпека накопичення плутонію-239 в організмі людини?*
11. *У чому основна небезпека потрапляння радону в організм людини?*

2.2 Захист населення від іонізуючого випромінювання

Основну частину опромінення населення земної кулі одержує від природних джерел радіації. Більшість із них такі, що уникнути опромінення від них зовсім неможливо. Внаслідок цього людство, незважаючи на малу вивченість даної проблеми, активно займається розробленням засобів і заходів захисту організму від радіації. Також дуже важливою проблемою є захист людини від дії радіації при виконанні службових обов'язків. Види захисту від дії ІВ поділяються на: фізичні, хімічні, біологічні та дезактивацію.

Фізичний захист населення від іонізуючого випромінювання:

- збільшення відстані між оператором і джерелом;
- скорочення тривалості роботи в полі випромінювання;
- екранування джерела випромінювання;
- дистанційне керування;
- використання маніпуляторів і роботів;
- повна автоматизація технологічного процесу;
- використання засобів індивідуального захисту й попередження знаком радіаційної небезпеки;
- постійний контроль за рівнем випромінювання та дозами опромінення персоналу.

Найбільш ефективним засобом фізичного захисту є екранування. Іонізуючі випромінювання поширюються прямолінійно, тому якщо на їх шляху встановити екран – потужність дози зменшиться у десятки й сотні разів. Ефективність екрана залежить від властивостей матеріалу, з якого він виготовлений, та його товщини. Найкращим поглиначом гамма-променів є свинець. Повільні нейтрони добре поглинаються бором і кадмієм. Швидкі нейтрони попередньо вповільнюються за допомогою графіту. Недоліком даного засобу є те, що, поглинаючи іонізуючі випромінювання, екран сам стає радіоактивним.

Для профілактики і захисту від забруднення відкритих ділянок тіла застосовують ізолюючі плівки у вигляді спеціальних мазей, кремів, паст, які виконують роль екрана і не дають змоги радіоактивним речовинам досягти шкіри. Такі засоби звісно не виключають можливість гамма- і бета-опромінення.

Для захисту від гамма-променів та бета-частинок застосовують засоби індивідуального захисту, принцип дії яких полягає в поглинанні випромінювання ізолюючим шаром (наприклад, захисний одяг з накладками із свинцю – фартухи, жилети, плавки тощо). Захист від внутрішнього опромінення полягає в усуненні безпосереднього контакту працюючих з радіоактивними частинками й запобігання влученню їх у повітря робочої зони.

Щоб уникнути радіоактивного забруднення одягу використовують так звані плівковий одяг (нарукавники, штани, фартухи, рукавички, черевики), який надягається зверху звичайного. Він виготовляється з деяких видів пластику, органічного скла, гуми, тобто матеріалів, які легко очищуються від радіоактивного забруднення. Для захисту органів дихання найкращими є шлангові протигази, респіратори, пневмошоломи. Для захисту очей застосовують окуляри закритого типу зі спеціальним склом (яке містить фосфат вольфраму або свинець).

Хімічний тип захисту населення від іонізуючого випромінювання. Хімічний захист – це підвищення стійкості організму до дії іонізуючого випромінювання шляхом введення спеціальних хімічних речовин, що мають захисну дію (радіопротекторів).

Радіотоксини, що накопичуються в організмі після опромінення й зумовлюють його отруєння, не є специфічними, характерними тільки для процесів опромінення. При різних стресах, таких, як нервові потрясіння, надмірне м'язове навантаження, гіподинамія (малорухливий спосіб життя), голодування, опіки, інфекція, у печінці піддослідних тварин накопичуються однакові токсичні продукти переокиснення. Ці токсини – перша ознака порушеного обміну, вони неначе «запускають» процес розвитку всіх механізмів стресу, що дозволило назвати їх «стресорами». Виведення стресорів з організму необхідно для зняття пострадіаційного токсичного синдрому.

Радіопротекторні речовини поділяються на такі групи:

- антигістамінні засоби;
- ендокринні препарати;
- антигеморагічні засоби (ті, що перешкоджають кровотечі);
- речовини, що відновлюють функції кровотворних органів;
- препарати, що сприяють виведенню радіоактивних речовин і важких металів;

- препарати, які нормалізують окремі ланки обміну речовин.

Радіопротектори суттєво знижують тяжкість променевого ураження. Їх корисна дія найбільше виражена на ранніх стадіях захворювання. Навіть, якщо проміжок між введенням препарату й опроміненням обчислюється хвилинами, протектор встигає проникнути в радіочутливий орган і почати діяти. Прискорити виведення радіонуклідів можна шляхом їх заміщення або комплексоутворення. Так, для захисту від ^{226}Ra , ^{90}Sr , ^{140}Ba використовують сірчаноокислий барій, глюконат кальцію, хлористий кальцій; для ^{239}Pu – пентацин; для ^{137}Cs , ^{131}I – йодистий калій або йодисту настоянку.

Біологічний тип захисту населення від іонізуючого випромінювання. Біологічний захист передбачає підвищення стійкості організму до дії іонізуючого випромінювання шляхом введення захисних речовин, виділених з живих організмів (лікарські рослини, вітаміни і т. д.). Біологічні добавки природного походження практично позбавлені негативних ефектів, характерних для фармакологічних препаратів (токсичність, побічні дії), створюють захисний поріг в організмі та задовольняють енергетичні потреби. Такі поживні речовини, як білки, деякі амінокислоти, поліненасичені жирні кислоти, складні некрохмальні вуглеводи, вітаміни (аскорбінова кислота, тіамін, рибофлавін, вітамін Р, каротин), мінеральні речовини (кальцій, калій, магній, йод, фосфор) мають виражені радіозахисні властивості. Тому збалансоване та різноманітне харчування має велике значення. Вченими доведено, що нестача цих речовин у раціоні сприяє накопиченню в організмі йоду, цезію, стронцію, плутонію, калію. Якщо клітини організму насичені потрібними мінеральними речовинами, то можливість поглинання радіоактивних речовин зменшується. Оскільки стронцій є хімічним аналогом кальцію, то він може брати участь у тих самих реакціях. Тобто наш організм може використовувати для побудови кісток і зубів радіоактивний стронцій замість кальцію за умови нестачі останнього. Якщо ж кальцію в організмі достатньо, то стронцій практично повністю виводиться з організму. За подібним принципом цезій може заміщувати калій, а плутоній – залізо. Застосування лікарських рослин-біостимуляторів є украй необхідним при впливі іонізуючого випромінювання. У критичній ситуації необхідно забезпечити швидку адаптацію організму за допомогою власних регуляторних механізмів клітини. Особливо корисними щодо цього є препарати тонізуючої

дії або рослини-психостимулятори. До них відносять женьшень, золотий корінь, лимонник китайський, елеутерокок та ін. Після приймання препаратів із зазначених рослин розвивається підвищений опір організму до променевого ураження, прискорюється пристосованість до екстремальних факторів, нервових стресів, нестачі кисню. Хворі відзначають підвищення загального тону й рівня працездатності, зникають скарги на млявість, швидку стомлюваність, головний біль і зниження апетиту. Поліпшується функціональна діяльність серцево-судинної системи.

Дезактивація. Ліквідацію радіоактивного забруднення здійснюють шляхом дезактивації, яка полягає у видаленні радіоактивних речовин із зараженої поверхні. Розрізняють природну та штучну дезактивацію.

Природна дезактивація являє собою зменшення зараженості радіоактивними речовинами внаслідок перетворення атомів, що розпадаються в стабільні. Вона дозволяє без додаткових матеріальних затрат зменшити зараженість до допустимої межі або нижче. Істотним недоліком природної дезактивації є її повільність. Вона найбільш ефективна впродовж перших 15-20 діб після радіоактивного зараження, коли в суміші продуктів поділу наявні переважно короткоживучі радіонукліди.

Штучна дезактивація полягає в очищенні заражених об'єктів від радіоактивних речовин шляхом вилучення цих речовин із заражених поверхонь. Вона застосовується за необхідності ліквідації радіоактивної зараженості в найкоротший термін, але вимагає трудових і матеріальних затрат.

Існуючі види дезактивації можна класифікувати за різними ознаками, які, з одного боку, визначаються умовами радіоактивних забруднень, а з іншого – умовами проведення самої дезактивації. Вибір способу дезактивації диктується особливостями радіоактивних забруднень і самого об'єкта.

Залежно від агрегатного стану дезактивуючого середовища всі способи дезактивації можна поділити на рідинні і безрідинні (рисунок 2.2). Для підвищення ефективності дезактивації використовуються комбіновані методи обробки, які являють собою поєднання рідинних і безрідинних методів.

Вилучення радіоактивних речовин ґрунтується на різних фізичних, фізико-хімічних і механічних процесах і явищах. З цієї точки зору розрізняють такі види дезактивації: механічна, фізична і фізико-хімічна.



Рисунок 2.2 – Класифікація способів дезактивації

Механічна дезактивація полягає в механічному вилученні радіоактивних речовин із заражених поверхонь шляхом змітання, струшування, здування або відсмоктування пилососом; у видаленні й вилученні поверхневого шару; в ізоляції зараженої поверхні шаром незараженого матеріалу (безрідинні способи).

Фізична дезактивація – це виділення порівняно слабо зв'язаних із поверхнею радіоактивних речовин струменем води під тиском, обмивання водою, протирання розчинниками, очищення заражених поверхонь фільтруванням, відстоюванням, перегонкою і т. д.

Фізико-хімічний вид дезактивації використовується для вилучення РР, більш міцно зв'язаних із зараженою поверхнею. Він ґрунтується на підвищеній змочувальній здатності води при додаванні в неї поверхнево-активних речовин, кислот, лугів, окиснювачів.

Способи очищення води. Більша частина радіоактивних речовин, що знаходяться у воді, міцно утримуються на частинках ґрунту або пилу і не розчиняються, решта радіонуклідів у вигляді аніонів і катіонів переходить у розчин. Очищення води можна проводити різними способами (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Способи очищення води

Осадження. Очищення води і повітря може бути здійснено шляхом седиментації або осадження. На основі принципу седиментації відбувається очищення рідких середовищ (води) від радіоактивного забруднення у випадку, коли радіонукліди знаходяться у вигляді нерозчинних частинок. Але седиментація – тривалий процес (до кількох діб). Для її прискорення у воду додають різні реагенти, які сприяють процесу коагулювання.

Коагулювання – це розчинення у воді спеціальних речовин – коагуляторів, які в результаті гідролізу утворюють розсипчастий пластівчастий осад. У ролі коагуляторів застосовують солі алюмінію $Al_2(SO_4)_3$ або солі заліза $FeSO_4$. Коагулянти у всьому об'ємі води утворюють пластівці, які при осажденні на дні відстійника захоплюють радіоактивні частинки. Після відстоювання заражена вода освітлюється і значною мірою дезактивується. Спосіб очищення води коагулюванням може застосовуватися як операція, що передує фільтруванню.

Фільтрацією називають очищення рідкого або газового середовища шляхом осаження домішок на поверхні фільтра. Як фільтр можна використовувати кварцовий пісок, дроблений антрацит, різні сорбенти (каолін, цеоліт) та іоніти. Сорбенти, дія яких ґрунтується на іонному обміні, називаються іонітами. Іоніти здатні поглинати з розчину позитивні або негативні іони радіонуклідів в обмін на еквівалентну кількість іонів одного і того самого знаку (реакція заміщення). У результаті радіонукліди, що містяться у воді, утворюють нерозчинні сполуки з іонітами і тим самим звільняють від них заражену воду. У ролі іонітів використовуються іонітообмінні смоли, сульфовуглі, целюлоза.

Випарювання – це випаровування води, концентрування радіоактивних продуктів до утворення твердої маси. У результаті отримуємо чисту воду і концентрований відстій радіоактивних забруднень. Випарювання забезпечує високе очищення води (99,9 %), однак цей спосіб потребує часу. Фільтрація за допомогою сорбентів і випарювання дозволяє позбутися як радіоактивних частинок, особливо високодисперсних, так і розчинних радіонуклідів. За допомогою іонітових фільтрів і мембранної технології видаляються розчинні радіонукліди.

Способи очищення повітря. Основним способом очищення повітря від радіоактивних речовин є фільтрація. За ступенем ефективності очищення повітря від радіоактивного забруднення фільтруючі матеріали можна розташувати в такій послідовності: скловолокно, тканина, неткані волокнисті з металевих волокон, синтетичні і природні матеріали. Для підвищення ефективності очищення використовується електромагнітне поле. Для очищення повітря у ході промислової експлуатації АЕС використовуються припливні, циркулярні і витяжні вентиляційні системи, при цьому здійснюється ступеневе очищення через різні фільтри.

Контрольні запитання:

- 1. Що являє собою фізичний захист від іонізуючого випромінювання?*
- 2. У чому особливості хімічного та біологічного захисту від дії радіації?*
- 3. Що таке дезактивація? Назвіть види дезактивації.*
- 4. Які способи дезактивації ви знаєте?*
- 5. Які існують способи очищення води та повітря від радіоактивних речовин?*

2.3 Норми радіаційної безпеки

2.3.1 Удосконалення системи нормування та радіаційного захисту

Забезпечення захисту природного середовища від впливу радіації ґрунтується на спеціальних критеріях і нормативах, які повинні задовольняти радіаційну безпеку людини і довкілля. На відміну від нормування, розробленого для різних видів антропогенного впливу (хімічного, санітарно-гігієнічного), де існують часткові екологічні нормативи для окремих компонентів природного середовища, для радіаційного впливу до цього часу

застосовувався принцип, згідно з яким вважають, що коли забезпечена радіаційна безпека людини, то захищене й довкілля.

Перші безпечні межі опромінення людей були визначені на початку ХХ ст. Оскільки в цей час променевих уражень зазнавала головним чином шкіра, то було запропоновано прийняти за безпечну десяту частину дози, яка викликала еритему (почервоніння) шкіри за 30 діб. У 1934 році Міжнародна комісія з радіаційного захисту (МКРЗ) встановила толерантну (таку, що не завдає шкоди організму) дозу – 0,2 Р за добу. У 1936 році ця доза була зменшена – 0,1 Р за добу. У міру накопичення даних про віддалені наслідки впливів на людину, термін толерантної дози був замінений виразом «гранично допустима доза» (ГДД), а її величина встановлена в розмірі 0,05 Р за добу або 18 Р за рік.

У 1958 році МКРЗ прийняла гіпотезу безпорогової лінійної залежності «доза-ефект», за якою будь-які незначні дози опромінення можуть викликати небажані генетичні наслідки, причому ймовірність таких наслідків прямо пропорційна дозі. Нині серед учених немає єдиної думки з питання про біологічні наслідки малих доз опромінення. Деякі вчені вважають, що залежність «доза-ефект» має лінійний характер (гіпотеза безпорогової залежності). Інші вважають, що шкідливі ефекти опромінення проявляються, починаючи з певного порогу. Треті вважають, що малі дози опромінення корисні. Необхідно зазначити, що немає безперечних доказів на користь будь-якої точки зору. Тим більше, що вплив малих доз опромінення практично ще досконало не вивчено. У цьому випадку доцільно розглядати більш раціональну гіпотезу про лінійну залежність «доза-ефект» і для людей, що безпосередньо працюють з ІВ, дозу опромінення за рік взяти такою, що дорівнює 20 мЗв, а для іншого населення – 1 мЗв на рік.

Для населення України межа небезпечної дози з 1952 року змінилася від 15 мЗв/рік до 1 мЗв/рік. Сьогодні більшість фахівців-радіоекологів наголошують на подальшому зменшенні цієї дози до 0,25 мЗв/рік.

При встановленні норм було взято за основу такий принцип: забезпечити захист від ІВ окремих людей, їх потомство і людство в цілому, а також створити відповідні умови для необхідної практичної діяльності людей, протягом якої вони можуть зазнавати впливу ІВ.

Світовий досвід підтвердив відсутність науково обґрунтованого підходу до нормування радіаційного впливу на природне середовище. При цьому у

багатьох країнах світу почали застосовувати або розробляють стандарти, спрямовані на захист окремих компонентів екосистем від іонізуючого випромінювання.

Радіаційна безпека та протирадіаційний захист стосовно різних видів діяльності людини ґрунтуються на основі використання таких принципів:

- будь-яка практична діяльність, що супроводжується опроміненням людей, має право здійснюватися, якщо вона приносить більше користі опроміненим особам або суспільству в цілому, порівняно із завданою шкодою (принцип виправданості);
- рівні опромінення від усіх видів господарювання не повинні перевищувати встановлений ліміт дози (принцип неперевищення);
- індивідуальні дози або кількість опромінюваних осіб стосовно певного джерела іонізуючого випромінювання мають бути настільки низькими, наскільки це можливо із врахуванням економічних і соціальних чинників (принцип оптимізації).

Найважливішу роль в удосконаленні системи нормування та радіаційного захисту довкілля повинно відіграти урахування зміни радіочутливості. Проблема полягає в тому, що всі розрахунки радіаційних норм розроблені для умовно «стандартної людини» – чоловіка білої раси віком 20 років із добрим станом здоров'я. Зрозуміло, що такої «стандартної людини» в природі не існує. Виходячи з теоретичних положень загальної екології, виділені такі види групових змін радіочутливості: расова, етнічна, популяційна, статева, вікова і фізіологічна. Наприклад, три найбільші раси світу (європеїдна, негроїдна і монголоїдна) сильно відрізняються за радіочутливістю. Відомі приклади й статевих відмінностей у радіочутливості між чоловіками і жінками.

2.3.2 Вимоги норм радіаційної безпеки в Україні

Основним нормативним документом України, який забезпечує радіаційний захист, є «Норми радіаційної безпеки України» (НРБУ-97), які введені в дію з 1 січня 1998 р. наказом Міністра охорони здоров'я України.

Сучасні норми радіаційної безпеки побудовані на системі основних принципів, критеріїв, нормативів та правил, виконання яких є обов'язковим з метою забезпечення протирадіаційного захисту людини та радіоекологічної

безпеки стану довкілля. НРБУ-97 розроблені відповідно до основних положень Конституції та Законів України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про поводження з радіоактивними відходами».

В основу НРБУ-97 покладені рекомендації Міжнародної комісії з радіологічного захисту (МКРЗ), створені у 1989-1996 рр.; Міжнародні основні норми безпеки для захисту від іонізуючого випромінювання та безпеки джерел радіації (МАГАТЕ); позитивний досвід застосування Норм радіаційної безпеки у колишньому СРСР зразка 1976 та 1987 років; окремі положення Норм радіаційної безпеки Російської Федерації 1996 року; найважливіші наукові розробки вітчизняних та закордонних фахівців у галузі протирадіаційного захисту та радіаційної безпеки, а також у суміжних галузях. «Норми радіаційної безпеки України» вважаються основним державним документом, що встановлює систему радіаційно-гігієнічних регламентів з метою забезпечення прийнятних рівнів забруднення довкілля та опромінення як для окремої людини, так і суспільства взагалі. «Норми радіаційної безпеки України» поширюються на ситуації опромінення людини джерелами іонізуючого випромінювання в умовах:

- експлуатації техногенних джерел іонізуючого випромінювання;
- медичної практики;
- радіаційних аварій;
- додаткового опромінення від техногенно-підсилених джерел природного походження.

Водночас вони не поширюються на опромінення від природного радіаційного фону та опромінення в умовах повного звільнення виду практичної діяльності, що використовує джерела іонізуючого випромінювання, від регулювання. Тобто на джерела радіації, що створюють за будь-яких умов індивідуальну річну ефективну дозу до 10 мкЗв, а колективну ефективну річну дозу не більше 1 люд·Зв. Також під вимоги НРБУ-97 не підпадає космічне випромінювання, радіоактивність земної поверхні та внутрішнє опромінення людини, створене природним калієм. Уперше в НРБУ-97 розділені методичні основи протирадіаційного захисту для двох принципово відмінних ситуацій діяльності людини, що пов'язані з джерелами іонізуючого випромінювання: практична діяльність і втручання. Під практичною діяльністю розуміється

поводження з штучними джерелами іонізуючого випромінювання, спрямоване на досягнення матеріальної або іншої користі, що призводить або може призвести до передбаченого та контрольованого збільшення дози опромінення. Під втручанням необхідно розуміти такий вид людської діяльності, який завжди спрямований на зниження чи запобігання некерованого і непередбаченого опромінення у випадку радіаційної аварії або хронічного впливу техногенно-підсилених джерел природного походження. Тобто втручання – це діяльність, спрямована на зменшення існуючого рівня опромінення. «Нормами радіаційної безпеки України» встановлені такі категорії осіб, що зазнають опромінення:

- категорія А (спеціальний персонал) – особи, які постійно чи тимчасово працюють безпосередньо з джерелами іонізуючого випромінювання;
- категорія Б (додатковий персонал) – особи, що безпосередньо не проводять робіт із джерелами іонізуючого випромінювання, проте у зв'язку з розташуванням робочих місць у приміщеннях або на промислових майданчиках об'єктів з радіаційно-ядерними технологіями можуть зазнати додаткового опромінення;
- категорія В (населення) – решта населення країни.

Крім того, є ще такі підкатегорії населення: медичний персонал і добровольці (ліквідатори). Саме для наведених категорій осіб розраховані ліміти допустимих доз (таблиця 2.3) та ступені радіоактивного опромінення населення.

Таблиця 2.3 – Ліміти дози опромінення, мЗв/рік

Ліміти дози	Категорія осіб, які зазнають опромінення		
	А ^{а) б)}	Б ^{а)}	В ^{а)}
Ліміт ефективної дози ЛДе	20 ^{в)}	2	1
Ліміти еквівалентної дози зовнішнього опромінення:			
- ЛДlens (для кришталика ока)	150	15	15
- ЛДskin (для шкіри)	500	50	50
- ЛДextrim (для кистей та стоп)	500	50	-

Примітки: а) розподіл дози опромінення протягом календарного року не регламентується; б) для жінок дітородного віку (до 45 років) та для вагітних жінок діють обмеження: встановлені величини доз у 20 разів нижчі, ніж для відповідних доз категорії А; в) у середньому за будь-які послідовні 5 років, але не більше 50 мЗв за окремий рік.

Значення лімітів доз встановлені на рівнях, що унеможливають виникнення детерміністичних ефектів опромінення. Водночас вони гарантують незначну ймовірність появи стохастичних ефектів опромінення і є прийнятними як для окремих осіб, так і для суспільства в цілому. Згідно з правилами стосовно захисту персоналу у виробничих умовах від природних джерел радіації доза опромінення не повинна перевищувати 5 мЗв/рік. Під час проведення профілактичних медичних рентгенологічних досліджень річна доза опромінення населення не може бути вищою за 1 мЗв. Є низка інших вимог, що обмежують рівень природно-техногенного опромінення населення як за нормальних умов, так і за умов радіаційної аварії. Отже, для персоналу ефективна доза за період трудової діяльності (50 років) становить $50 \cdot 20 = 1000$ мЗв (1 Зв), а ефективна доза впродовж життя для населення (70 років) становить 70 мЗв. Цей рівень відповідає концепції безпечного проживання.

Співвідношення доз опромінення з небезпечними і допустимими рівнями опромінення людини є таким:

- 100 мЗв – допустиме разове аварійне опромінення населення категорії Б;
- 250 мЗв – допустиме разове аварійне опромінення персоналу (кат. А), при цьому відсутні явні ефекти ураження;
- 750 мЗв – величина одноразової дози, за якої не виникає серйозних відхилень у стані здоров'я, це нижчий рівень розвитку легкого ступеня променевої хвороби. Ця доза визнана МКРЗ і національними комісіями радіаційної безпеки і є тим порогом, вище якого виникають нестохастичні ефекти опромінення;
- 4,5 Зв – величина середньої смертельної дози (50 % виживання, тобто гине 50 % опромінених);
- 6 Зв – мінімальна абсолютно смертельна доза, що характеризує граничні можливості захисних механізмів організму;
- 10 Зв – 100 % летальність серед опромінених.

2.3.3 Поділ забрудненої території України на радіоекологічні зони

У березні 1991 р. було прийнято Закон України «Про правовий режим території, яка піддається радіоактивному забрудненню внаслідок

Чорнобильської катастрофи», який установлює рівні забруднення місцевості і вид екологічної зони, умови проживання і роботи населення в цих зонах.

Забрудненою вважається територія, проживання на якій може призвести до опромінення населення більше 1 мЗв/рік понад природний доаварійний фон. Таким чином на території України виділяються 4 радіоекологічні зони:

- 1) зона відчуження – 30-кілометрова зона навколо ЧАЕС, з якої було евакуйовано населення в 1986 р.;
- 2) зона безумовного (обов'язкового) відселення – це територія, де людина може одержати додаткову дозу опромінення більше 5 мЗв/рік, крім дози, яку вона одержувала в доаварійний період;
- 3) зона гарантованого добровільного відселення – це територія, де людина може одержати додаткову дозу опромінення більше 1 мЗв/рік до природного доаварійного;
- 4) зона підсиленого радіоекологічного контролю – це територія, де людина може одержати додаткову дозу опромінення не більше 1 мЗв/рік понад доаварійний період.

Крім того, у законі дані визначення радіаційно небезпечних земель і радіоактивно забруднених земель. Радіаційно небезпечні землі – це землі, на яких неможливе подальше (постійне) проживання населення, одержання сільськогосподарської та іншої продукції або, які недоцільно використовувати за екологічними умовами. Такі землі підлягають вилученню із сільськогосподарського обігу. До них відносять території 1 та 2 радіоекологічної зони. Радіоактивно забруднені землі – це землі, які вимагають проведення заходів радіаційного захисту та іншого спеціального втручання, спрямованого на обмеження додаткового опромінення і забезпечення нормальної господарської діяльності. До них належать території 3 та 4 зон. У законі розглянуті види діяльності, які заборонені в кожній із цих зон, і використання цих земель.

Контрольні запитання:

1. *Що таке безпечна доза опромінення, як змінювалися поняття про неї протягом розвитку науки? Яка доза вважається безпечною сьогодні?*
2. *Назвіть принципи радіаційної безпеки.*

3. Який основний нормативний документ України в галузі радіаційної безпеки?
Згадайте його принципові положення.
4. На які категорії щодо опромінення поділяється населення? Назвіть ліміти доз для цих категорій.
5. Що таке радіоекологічні зони? Чим визначаються їх межі?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Кюри М. Радиоактивность / М. Кюри; пер. с фр. З.В. Ершовой, В.Д. Никольского; под ред. В.И. Баранова. 2-е изд., испр. М. : Физматлит, 1960. 516 с.
2. НРБУ-97 Державний гігієнічний норматив «Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)». Затверджено Головним державним санітарним лікарем України за № 62 від 01.12.97.
3. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97/Д-2000). Доповнення : Радіаційний захист від джерел опромінення : Державні гігієнічні нормативи : ДГН-6.6.1.-6.5.061.2000. Київ : 2000. 84 с.
4. Білявський Г.О., Падун М.М., Фурудуй Р.С. Основи загальної екології. Київ : Либідь, 1995. 367 с.
5. Костко О.К. Атомная и ядерная физика : радиоактивность, элементарные частицы, теория относительности. М. : Лист Нью, 1998. 192 с.
6. І.М. Гудков. Радіобіологія : підручник для вищ. навчальних закладів. К. : НУБіП України, 2016. 485 с.
7. І.С. Андріанова. Конспект лекцій з дисципліни «Радіаційна безпека» для студентів 1-го курсу магістратури «Технології захисту навколишнього середовища». Одеса : ОДЕКУ, 2017. 51 с.
8. International Commission on Radiological Protection, 2007. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Annals of the ICRP.
9. International Commission on Radiological Protection, 1990. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP 21 (1-3), Pergamon Press, Oxford (1991).
10. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України : Державні санітарні правила : 6.177-2005-09-02. К. : 2005. 62 с.
11. Кіцно В.О., Поліщук С.В., Гудков І.М. Основи радіобіології та радіоекології. К. : Хай-Тех Прес, 2008 (2009, 2010). 314 с.
12. Майбутнє атомної енергетики / Б. Патон, В. Бар'яхтар, О. Бакай, І. Неклюдов // Вісник Національної академії наук України. 2006. № 4. С. 3-13.

13. Іванов Є.А. Радіоекологічні дослідження : навч. посібник. – Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2004. 149 с.
14. Заболотний О.І., Балабак А.В. Радіобіологія і радіоекологія. Умань : УНУС, 2016. 51 с.
15. Р.А. Васькін. Конспект лекцій з дисципліни «Радіоекологія». Суми : Сумський державний університет, 2010. 115 с.
16. Бобилєв В.П., Саввін О.В., Беймо А.Г. Методичні вказівки для проведення лабораторної роботи «Вимір гама-випромінювання при радіометричній зйомці місцевості». Дніпропетровськ : НМетАУ, 2014. 11 с.
17. Руководство по методам контроля за радиоактивностью окружающей среды / Под ред. И.А. Соболева, Е.Н. Беляева. М. : Медицина, 2002. 431 с.
18. Кутлахмедов Ю.О., Корогодін В.І., Кольтовер В.К. Основи радіоекології : навч. посіб. Київ : «Вища школа», 2003. 320 с.
19. Криштопа О.Н. Чернобыль. Зона отчуждения. Харьков : Глобус, 2011. 316 с.

Навчальне видання

Саввін Олександр Віталійович
Сухарева Марина Віталіївна
Мешкова Анжеліка Геннадіївна
Суліменко Сергій Євгенійович

РАДІОЕКОЛОГІЯ

Частина I

Конспект лекцій

Тем. план 2021, поз. 137

Підписано до друку 19.10.2021. Формат 60x84 1/16. Папір друк. Друк плоский.
Облік.-вид. арк. 4,65. Умов. друк. арк. 4,58. Замовлення № 152

Національна металургійна академія України
49005, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4
Редакційно-видавничий відділ НМетАУ