

РОЗДІЛ 5. ЗАХИСТ ДОВКІЛЛЯ ВІД ЕНЕРГЕТИЧНИХ ДІЙ

5.1. Теоретичні основи захисту довкілля від енергетичних дій

Захисний пристрій (ЗП) має властивості: відбивати, поглинати, бути прозорим по відношенню до потоку енергії. ЗП можна охарактеризувати такими енергетичними коефіцієнтами: коефіцієнт поглинання α , коефіцієнтом відбивання ρ , коефіцієнтом передачі τ . При цьому виконується рівність[1]:

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (5.1)$$

Принципи захисту:

- 1) принцип: $\rho \rightarrow 1$; захист відбувається за рахунок відбивної можливості ЗП;
- 2) принцип: $\alpha \rightarrow 1$; захист відбувається за рахунок поглинальної можливості ЗП;
- 3) принцип: $\tau \rightarrow 1$; захист з урахуванням властивостей прозорості ЗП.

На практиці принципи комбінують, отримуючи різні методи захисту. Найбільше поширення отримали методи захисту ізоляцією і поглинанням.

Методи ізоляції використовують тоді, коли джерело і приймач енергії, який є одночасно об'єктом захисту, розташовані з різних сторін від ЗП. У основі цього методу лежить зменшення прозорості середовища між джерелом і приймачем, тобто виконання умови $\tau \rightarrow 0$. При цьому можна виділити два основних методи ізоляції: метод, при якому зменшення прозорості середовища досягається за рахунок поглинання енергії ЗП, тобто умова $\tau \rightarrow 0$ забезпечується умовою $\alpha \rightarrow 0$, і метод, при якому зменшення прозорості середовища досягається за рахунок високої відбивної здатності ЗП, тобто умова $\tau \rightarrow 0$ забезпечується умовою $\rho \rightarrow 1$ [27].

В основі методів поглинання лежить принцип збільшення потоку енергії, що пройшов в ЗП, тобто досягнення умови $V \rightarrow 1$. Розрізняють два види поглинання енергії ЗП: поглинання енергії самим ЗП за рахунок її добору від джерела в тій чи іншій формі, в тому числі у вигляді необоротних втрат, що характеризується коефіцієнтом α , і поглинання енергії у зв'язку з великою прозорістю ЗП, що характеризується коефіцієнтом τ . Оскільки при $V \rightarrow 1$ коефіцієнт $\rho \rightarrow 0$, то методи поглинання використовують для зменшення відбитого потоку енергії; при цьому джерело та приймач енергії зазвичай знаходяться з одного боку від ЗУ [27,28].

5.2. Захист довкілля від механічних і акустичних коливань

Основними джерелами вібрації є рейковий транспорт, різні технологічні установки, ковальсько-пресове устаткування, будівельна техніка, системи опалювання і водопроводу, насосні станції. Шкідливі вібрації створюють не лише шумові забруднення довкілля, несприятливо впливаючи на людський організм, але і представляють певну небезпеку для різних інженерних споруд, викликаючи у ряді випадків їх руйнування. Корисні вібрації використовуються у ряді технологічних процесів, але і в цьому випадку потрібне застосування відповідних заходів захисту. Зона дії вібрацій визначається величиною їх загасання в пружному середовищі і в середньому ця величина складає приблизно $10^{dB}/m$ [3].

Однією з головних причин появи низькочастотних вібрацій при роботі різних механізмів є дисбаланс деталей, що обертаються, які виникають в результаті зміщення центра мас відносно осі обертання. Виникнення дисбалансу при обертанні може спричинитись [6,10]:

- несиметричним розподілом мас, що обертаються, через викривлення валів машин, наявності несиметричних кріпильних деталей;
- неоднорідною щільністю матеріалу, через наявності раковин, шлакових включень і інших неоднорідностей в матеріалі конструкції;
- наявності люфтів, проміжків і інших дефектів, що виникають при складанні і експлуатації механізмів.

У цих випадках з'являється нерівноважна відцентрова сила, пропорційна масі системи m , квадрату кутової швидкості ω і ексцентриситету ℓ центра мас системи відносно осі обертання

$$F = \ell m \omega^2. \quad (5.2)$$

Іншою причиною появи вібрацій є процеси ударного типу. При цьому за досить короткий час імпульс тіла передається іншому нерухомому або такому, що рухається на зустріч тілу. Джерелом вібрації є різного роду резонансні коливання деталей, конструкцій, механізмів, установок. Вібрації часто супроводжуються інфразвуковими коливаннями. Дія вібрації на організм проявляється по різному залежно від того, як діє вібрація. Біологічна дія вібрацій в діапазоні частот до 15 Гц проявляється в порушенні вестибулярного апарату, зміщенні органів [1].

Методи захисту від вібрацій включають способи і прийоми зі зниження вібрацій як в джерелі їх виникнення, так і на шляхах поширення пружних коливань в різних середовищах. Перевага надається тим конструктивним рішенням, які мають більшу жорсткість і менші габарити і що мають, по можливості, менші динамічні навантаження[1].

Ефективним методом зниження вібрацій в джерелі є вибір

оптимальних режимів роботи, що полягає, головним чином, в усуненні резонансних явищ в процесі експлуатації механізмів. При цьому важливо, щоб власні частоти коливань механізму не співпадали з частотами, що виникають при дисбалансі. Для цього змінюють або масу системи, або її інші механічні параметри[1].

Віброгашення - це метод зниження вібрацій полягає у збільшенні маси і жорсткості конструкції шляхом об'єднання механізму з фундаментом, опорною плитою або підставами, які гасять вібрації. При цьому збільшується реактивна частина імпедансу коливальної системи[5].

Віброізоляція - цей метод полягає в установці різного устаткування не на фундаменті, а на віброізолюючих опорах. Такий спосіб розміщення устаткування виявляється простіший і дешевший за метод віброгашення і дозволяє отримати будь-яку міру віброізоляції. Цей метод можна використати спільно з методом віброгашення. При розгляді віброізолюючих властивостей у разі дії гармонійних навантажень часто вводять поняття коефіцієнта передачі для оцінки ефективності віброізоляції[1].

Механізм зниження рівня вібрацій за рахунок вібродемпфування полягає у збільшенні активних втрат коливальних систем. Практично це реалізовано в механізмах з великими динамічними навантаженнями з використанням матеріалів з великим внутрішнім тертям. Велике внутрішнє тертя мають сплави кольорових металів, чавуни з малим вмістом вуглецю і кремнію[1].

Однією з особливостей інфразвуку є їх слабке, в порівнянні з хвилями звукового діапазону, поглинання в повітрі. Тому інфразвук поширюється на великі відстані, «очищаючись» при цьому від більш високих гармонік. Інфразвук чинить шкідливу дію на організм людини, і потрібні спеціальні заходи захисту від нього[10].

Загасання інфразвукових коливань в приземному шарі атмосфери складає приблизно $8 \cdot 10^{-6} \frac{дБ}{км}$, тому метод захисту відстанню в цьому випадку вкрай неефективний. Для захисту від дії інфразвуку застосовуються: звукоізоляція джерела; глушники різних типів; поглинання інфразвукових коливань; вибір оптимальних режимів роботи пристроїв; спеціальні конструктивні рішення[9,10].

Звукоізоляція джерела інфразвукових коливань не має достатньої ефективності на частотах менше 10 Гц. Для підвищення її ефективності на частотах, нижче 10 Гц, вимагається створювати потужні, жорсткі конструкції з матеріалів з поверхневою щільністю $10^5 - 10^6 \frac{кг}{м^2}$, що є не дуже рентабельним[1].

Для захисту від інфразвуку найбільш ефективні методи, пов'язані із застосуванням глушників найрізноманітніших типів, вибором оптимальних режимів роботи і використанням спеціальних конструкцій. У

діапазоні інфразвукових коливань, в силу їх великої довжини, розміри резонаторів і об'єм їх внутрішніх порожнин мають бути більші, ніж у разі аналогічних глушників, вживаних для діапазону чутних хвиль. У разі інфразвукових джерел аеродинамічної природи вживають заходи обмеження швидкості витікання газу[1].

Звукові неперіодичні коливання з безперервним спектром сприймаються як шуми. Інтенсивність шумів може бути найрізноманітнішою, від шелесту листя до шуму грозового розряду. Розрізняють джерела шуму природного і техногенного походження[10].

У реальній атмосфері незалежно від людини завжди є присутніми шуми природного походження з дуже широким спектральним діапазоном від інфразвуку з частотами до ультразвуку і гіперзвуку[1].

До джерел шуму техногенного походження відносяться усі вживані в сучасній техніці механізми, устаткування і транспорт, які створюють значне шумове забруднення довкілля[21].

Техногенні шуми по фізичній природі походження можуть бути класифіковані на наступні групи[21]:

- механічні шуми, що виникають при взаємодії різних деталей в механізмах, а також при вібраціях поверхні пристроїв, машин, устаткування.
- електромагнітні шуми, що виникають внаслідок коливань деталей і елементів електромеханічних пристроїв під дією електромагнітних полів.
- аеродинамічні шуми, що виникають в результаті вихрових процесів в газах.
- гідродинамічні шуми, що викликаються різними процесами в рідинах.

Спектрально-часові характеристики шумів мають велике різноманіття. Для технічної оцінки шумів введена їх класифікація за спектральними і тимчасовими характеристиками. За характером спектра шуми поділяються на широкосмугові і тональні. Під широкосмуговими шумами розуміються шуми, що мають безперервний спектр шириною більше за октаву. Тональний шум характеризується тим, що в спектрі є присутніми окремі чутні дискретні тони[1].

За часовими характеристиками шуми діляться на постійні і непостійні. Постійні шуми в процесі вимірів на часовій характеристиці шумоміра «повільно» не змінюють рівень сигналу більше 5 дБА. У разі непостійних шумів ця зміна може бути більше 5 дБА[1].

Непостійні шуми діляться на імпульсні, переривчасті і такі, що коливаються в часі[1]:

- імпульсні, такі, що складаються з одного або декількох звукових сигналів, тривалістю 1 с і рівнями звуку, що відрізняються більше, ніж на 7 дБА;
- переривчасті шуми відрізняються тим, що рівень звуку змінюється на 5 дБА і більше кілька разів за час виміру, причому тривалість імпульсу

більша, ніж при імпульсних шумах і у момент дії імпульсу його амплітуда залишається постійною, такою, що перевищує фон;

- коливаються в часі, відрізняються тим, що рівень шуму міняється з часом.

Шуми, особливо техногенного походження, шкідливо впливають на організм людини. Ця шкідлива дія проявляється в специфічній поразці слухового апарату і неспецифічних змінах інших органів і систем людини. При дії на людину шумів мають значення їх рівень, характер, спектральний склад, тривалість дії і індивідуальність чутливості[21].

У зв'язку з тим, що шум є шкідливим виробничим чинником, а у ряді випадків і небезпечним, гранично допустимі рівні для шумів різних видів порівнюють з еквівалентними рівнями безперервних шумів. Для оцінки міри шумового забруднення природного довкілля необхідно знати як реальний шумовий фон, так і допустимий рівень шумів, встановлених санітарними нормами. Для нормування постійного шуму вибрані наступні параметри[9,10]:

- рівень звукового тиску;
- рівень інтенсивності звуку.

У разі непостійного шуму нормованими параметрами вибрані[9,10]:

- еквівалентний рівень звуку;
- максимальний рівень.

При розробці або виборі методів захисту довкілля від шумів вживається цілий комплекс заходів [1]:

- проведення необхідних акустичних розрахунків і вимірів, їх порівняння з нормованими і реальними шумовими характеристиками;
- визначення небезпечних і безпечних зон; розробка і застосування звукопоглинаючих, звукоізолюючих пристроїв і конструкцій;
- вибір відповідного устаткування і оптимальних режимів роботи;
- зниження коефіцієнта спрямованості шумового випромінювання території, яка цікавить;
- вибір оптимальної зони орієнтації і оптимальної відстані від джерела шуму;
- проведення архітектурно-планувальних робіт;
- організаційно-технічні заходи щодо профілактики в частині своєчасного ремонту і змашування устаткування;
- заборона роботи на застарілому устаткуванні, має підвищений рівень шуму.

Частина енергії звукової хвилі, що падає, відбивається, частина енергії поглинається середовищем, а частина енергії проходить перешкоду завтовшки d . Відношення інтенсивності відбитої хвилі $J_{\text{отр}}$ до інтенсивності хвилі J_0 називається коефіцієнтом[1]:

$$K_{отр} = \frac{J_{отр}}{J_0}. \quad (5.3)$$

За коефіцієнт поглинання беруть відношення[1]:

$$K_{П} = \frac{J_{П}}{J_0}, \quad (5.4)$$

де $J_{П}$ - інтенсивність хвилі, яка поглинається середовищем.

За коефіцієнт проходження беруть відношення інтенсивності на виході середовища $J_{Пр}$ до інтенсивності, що падає[1]:

$$K_{Пр} = \frac{J_{Пр}}{J_0}. \quad (5.5)$$

Акустична проникність середовища кінцевої товщини визначається процесами поглинання звукової хвилі, багатократними відображеннями від меж розділу і подальшою інтерференцією. Строге визначення коефіцієнтів $K_{отр}$, $K_{П}$, $K_{Пр}$ представляє деякі труднощі, оскільки в реальних випадках не вдається вичислити частини відбитої, поглиненої енергії звукової хвилі, що падає. [21]

Під реверберацією розуміється процес поступового загасання звукової енергії в закритих приміщеннях після припинення роботи звукового джерела. Кожне коливання, що поширюється в замкнутому повітряному просторі, характеризується своїм коефіцієнтом загасання, залежним від поглинання звукової енергії при багатократному її відображенні від меж розділу. Процес реверберації робить великий вплив на акустику приміщення, оскільки людське вухо сприймає прямий звук на фоні раніше збуджених власних коливань, спектр яких змінюється з часом внаслідок поступового загасання окремих власних гармонік[1].

Щільність звукової енергії $\varepsilon_{зг}$ з часом можна в загальному вигляді виразити формулою[1]:

$$\varepsilon_{зг} = \varepsilon_{зг}^0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (5.6)$$

де $\varepsilon_{зг}^0$ - щільність звукової енергії у момент виключення джерела звуку; τ - постійна часу реверберації, визначена виразом[1]:

$$\tau = \frac{4V}{v \sum K_{П} S_i}, \quad (5.7)$$

де V - об'єм приміщення; v - швидкість звуку; $\sum K_{П} S_i$ - сума загальних звукових поглинань усіх тіл, що знаходяться в приміщенні. Таким чином, за час t щільність звукової енергії зменшується в e раз.

Звукопоглинанням називається процес переходу частини енергії звукової хвилі в теплову енергію середовища, в якому поширюється звук.

Звукопоглинання має дисперсію, тобто досить сильно залежить від частоти. При її збільшенні звукопоглинання збільшується. Разом з безпосереднім переходом частини звукової енергії в теплову, звукова хвиля послабляється за рахунок її часткового проникнення через перешкоду щілини, вікна і так далі[1].

Звукоізолюючі конструкції у вигляді акустичних екранів застосовуються для зниження рівня шумів в довкіллі, що створюються відкрито встановленими джерелами шуму на території підприємства. Використання акустичних екранів доцільне у тому випадку, якщо рівень шуму джерела перевищує більш ніж на 10 дБ рівня шумів, що створюються іншими джерелами в даній зоні. Ефективність акустичного екрану розраховується з урахуванням розмірів і форми конструкції екрану, властивостей вживаних матеріалів, особливостей звукового поля в зоні акустичної тіні із-за дифракційних явищ. Конструкція акустичних екранів може бути найрізноманітнішої форми або стаціонарного виконання, або пересувна[1].

Глушники шуму призначені для зниження рівня шумів джерел аеродинамічної природи: газотурбінні установки, газодинамічні системи скидання стислого повітря, випробувальні стенди різних авіаційних двигунів, компресори, вентиляційні камери. Принцип дії абсорбційних глушників ґрунтований на поглинанні звукової хвилі в звукопоглинальних матеріалах. Глушники цього типу знайшли широке застосування в аеродинамічних установках із-за їх ефективності в широкому діапазоні частот при відносно не великому газодинамічному опорі. У реактивних глушниках використовується явище відображення звукової хвилі назад до джерела шуму з використанням відбивачів і об'ємних резонаторів. Цей вид глушників застосовується у тому випадку, коли в спектрі джерела шуму спостерігаються яскраво виражені дискретні складові. Їх встановлюють безпосередньо в трубопроводах, поперечні розміри яких менше довжини хвилі звукового коливання, що заглушається. У комбінованих глушниках використовують явище як поглинання, так і відображення звуку[1].

5.3. Захист від теплових випромінювань

Інфрачервоні промені є електромагнітним випромінюванням з довжиною хвилі від 0,76 мкм приблизно до 700 мкм. Інфрачервоне випромінювання (ІЧ) не сприймається людським оком, але відчувається шкірою. Часто інфрачервоне випромінювання називають тепловим випромінюванням. Серед ІЧ спектрів розрізняють лінійчасті, смугасті і безперервні[20].

Лінійчасті (атомні) ІЧ спектри випускають збуджені атоми і молекули при переходах між близько розташованими електронними рівнями енергії. Смугасті (молекулярні) ІЧ спектри виникають при

переходах між коливальними і обертальними рівнями енергії молекул. Коливальні і коливально-обертальні спектри розташовані, в основному, в середній області ІЧ діапазону. Чисто обертальні спектри розташовуються, головним чином, в далекій області ІЧ діапазону. Безперервний ІЧ спектр випромінюють усі нагріті тіла. Безперервний (суцільний) спектр обумовлений тим, що в конденсованому стані в рідинах і твердих тілах відбувається сильна взаємодія молекул і атомів, що призводить до розмиття дискретних енергетичних рівнів і утворення суцільних спектрів випромінювання[20].

Джерела ІЧ випромінювання можна розділити на дві групи: природного і техногенного походжень. Природним джерелом ІЧ випромінювання у біосфері є Сонце, діючі вулкани, термальні води, процеси тепло-масопереносу в атмосфері, усі нагріті тіла, лісові пожежі. Поверхня Землі випускає теплове випромінювання в діапазоні довжин хвиль приблизно від 3 до 80 мкм, захоплює усю середню ІЧ область. Надмірне захоплення ІЧ випромінюванням, особливо ближньої зони, може привести до опіків шкіри[20].

Найбільш поширеним джерелом ІЧ випромінювання техногенного походження являється лампа розжарювання. При температурі нитки лампи розжарювання 2300 – 2800 К максимум випромінювання припадає на довжину хвилі $\approx 1,2 \mu\text{м}$ і близько 95% енергії випромінювання доводиться на ІЧ діапазон. Використовувані для сушки і нагріву лампи розжарювання з вольфрамовим волоском потужністю 1 кВт випромінюють в ІЧ діапазоні близько 80% усієї енергії. При пониженні температури загальний зміст ІЧ випромінювання джерела зменшується. До числа спонтанних джерел ІЧ випромінювання техногенного походження відносяться також газорозрядні лампи, вугільна електрична дуга, електричні спіралі з ніхромового дроту, що нагріваються струмом, який проходить, електронагрівні прилади, плазмові установки, печі найрізноманітнішого призначення з використанням найрізноманітнішого палива та ін[20].

Основним джерелом енергії для усіх процесів, що відбуваються у біосфері, являється сонячне випромінювання. Атмосфера, що оточує Землю, слабо поглинає короткохвильове випромінювання Сонця, яке, в основному, досягає земної поверхні. Поглинання сонячної радіації, що падає, обумовлене наявністю в атмосфері озону, вуглекислого газу, парів води, аерозолів. Пряма і розсіяна компоненти сонячного випромінювання, досягаючи земної поверхні частково поглинаються земною поверхнею, а частина випромінювання, що падає, відбивається від неї залежно від характеру поверхні. Відбивна здатність тіл характеризується величиною альbedo, що оцінює відбивні або розсіювальні властивості[29].

Під дією падаючого сонячного потоку в результаті його поглинання, земна поверхня нагрівається і стає джерелом довгохвильового випромінювання, яке напрямлене до атмосфери. При цьому виникає

взаємний теплообмін між землею поверхнею і атмосферою. Різниця між короткохвильовим випромінюванням, поглиненим землею поверхнею і ефективним випромінюванням називається радіаційним балансом[29].

Головною особливістю радіаційного режиму атмосфери є парниковий ефект, який полягає в тому, що короткохвильова радіація переважно доходить до земної поверхні, викликаючи її нагрівання, а довгохвильове випромінювання, яке йде від Землі, затримується атмосферою, зменшуючи при цьому тепловіддачу Землі в космос. Радіаційний баланс земної поверхні становить 105 Вт/м^2 , а ефективне випромінювання з неї дорівнює різниці поглиненої радіації і радіаційного балансу і складає 52 Вт/м^2 [29,30].

З тепловим балансом Землі і атмосфери пов'язаний водний баланс атмосфери. В цілому цей баланс для певної поверхні відповідає рівності кількості випавших на Землю опадів і кількості водних випаровувань з поверхні Землі.

Реальний тепловий баланс Землі і атмосфери складно оцінити, оскільки ще складніше оцінити ті процеси, які впливають на цей баланс за рахунок техногенної діяльності. Одні процеси призводять до перегрівання Землі, інші - до охолодження. Окрім ролі атмосфери як теплозахисної оболонки і дії парникового ефекту, посилюваної господарською діяльністю людини, певний вплив на тепловий баланс нашої планети роблять теплові забруднюючі речовини у вигляді скидного тепла у водойми, річки, в атмосферу, головним чином, паливно-енергетичного комплексу і, у меншій мірі, від промисловості[29].

Шляхом перетворення енергії органічного палива приблизно 30% енергії палива перетворюється на електричну енергію, а частина енергії поступає в довкілля у вигляді теплового забруднення і забруднення атмосфери продуктами згорання. При збільшенні енергії споживання збільшуватиметься забруднення довкілля, якщо не вжити спеціальних заходів. Теплове забруднення водоймів та атмосфери має місце і при експлуатації атомних електростанцій. Зараз встановлена закономірність загального підвищення температури у водоймах, річках, атмосфері, особливо в місцях знаходження електростанцій, промислових підприємств у великих індустріальних районах. В свою чергу це приводить до зміни теплового режиму водоймів, що впливає на життя біоорганізмів, до виникнення небажаних повітряних потоків із-за підвищення температури в атмосфері, зміни вологості повітря та сонячної радіації і, в кінцевому випадку, до зміни мікроклімату. Теплові забруднення навколишнього середовища, підвищення температури Землі, потепління клімату заставляють звернути увагу на цю проблему з тим, щоб стимулювати розвиток принципово нових джерел енергії, маловідходних технологій, ефективних методів з переробки відходів, діючих мір охорони

навколишнього середовища та постійно діючого глобального моніторингу біосфери[29,30].

В залежності від способу перетворення енергії падаючого випромінювання приймачі інфрачервоного діапазону поділяються на основні класи[2,29]:

- теплові приймачі, в яких поглинання ІЧ випромінювання приводить до збільшення температури термочутливого елемента, що впливає на параметри речовини;
- фотоелектричні приймачі, в яких поглинання падаючого ІЧ випромінювання приводить до появи або зміни електричного струму або напруги. Вони мають, як правило селективну чутливість для роботи як в середній так і далекій областях ІЧ спектра потребують застосування низьких температур;
- люмінесцентні приймачі, в яких використовується підсилення або гасіння люмінесценції під дією ІЧ випромінювання;
- фотоплівки, які мають чутливість в ближній області ІЧ випромінювання з довжиною хвилі 1,3 мкм;
- приймачі, які призначені для візуалізації ІЧ випромінювання;
- прилади, в яких використовується метод параметричного перетворення ІЧ випромінювання у видиму при змішуванні ІЧ випромінювання з когерентним лазерним випромінюванням в нелінійних оптичних кристалах.

5.4. Захист від електромагнітних полів і випромінювань.

Залежно від частоти джерела ЕМП, його потужності і режиму роботи вибираються ті або інші засоби захисту від дії електромагнітних коливань на людський організм. Під ближньою зоною дії розуміється зона, в якій електромагнітне поле ще не сформоване на відстані $r \leq \frac{\lambda}{6} \approx \frac{\lambda}{2\pi}$ від випромінювача. У ближній зоні ЕМП характеризується електричною складовою поля \vec{E} . У разі одночасної роботи декількох джерел в цій зоні набуває сумарного значення квадратів напруженості поля[1]:

$$E_{\Sigma}^2 = \sum_{i=1}^N E_i^2 . \quad (5.8)$$

У далекій зоні на відстанях $r > \frac{\lambda}{6}$ існує і поширюється електромагнітне поле. ЕМП характеризується інтенсивністю випромінювання. Як гранично-допустимий рівень опромінення населення приймаються такі значення електромагнітних полів, які при щоденному опроміненні у властивих для цього джерела випромінювання режимах не викликають у населення захворювань або відхилень в стані здоров'я,

виявлених сучасними методами дослідження в період опромінення або у віддалені терміни після його припинення. Основний критерій безпеки для населення встановлений на рівні не більше $500 \frac{B}{M}$ при частоті 50 Гц в місцях постійного перебування людей[1].

Спосіб захисту відстанню і часом - цей спосіб захисту докільля від дії ЕМП є основним, включаючим як технічні, так і організаційні заходи. При розміщенні на службових територіях радіотехнічних споруд і об'єктів з метою отримання рівнів дії ЕМП, ПДУ, що не перевищують, враховують[1]:

- потужність і діапазон частот джерела ЕМП;
- конструктивні особливості, діаграму спрямованості і висоту розміщення антени випромінювача;
- рельєф місцевості;
- оптимальний режим роботи джерела ЕМП;
- поверховість і особливість забудови.

З метою зменшення ЕМП промислової частоти збільшують висоту підвісу високовольтних проводів, віддаляють житлову забудову від лінії електропередачі, застосовують екрануючі пристрої. Спосіб захисту часом полягає в тому, що знаходиться поблизу джерел ЕМП якомога менше часу[31].

Спосіб захисту екранування від електромагнітних випромінювань використовує процеси відбивання і поглинання електромагнітних хвиль. Екранування повністю виключає проникнення електромагнітних хвиль у докільля. На відкритих територіях, розташованих в зонах з підвищеними рівнями ЕМП, застосовуються екрануючі пристрої у вигляді залізобетонних огорож, екрануючих сіток, високих дерев[27].

При взаємодії електромагнітної хвилі, що падає, з радіопоглинаючим матеріалом (РПМ) відбувається її поглинання, розсіяння, а в деяких випадках РПМ - інтерференція. В результаті цих процесів відбувається дисипація енергії хвилі, що падає, в поглинаючому покритті і відбита хвиля стає незначною. Для забезпечення малого відбивання хвилі, що падає, від поглинаючого покриття вимагається, щоб його властивості не сильно відрізнялися від властивостей вільного простору, тобто середовища, в якому поширюється хвиля. На межі розділу «середовище - поверхня РПМ» не повинно бути помітного стрибка коефіцієнтів заломлення. При цьому, хвиля, що падає, без помітних відображень на межі поділу проникне в поглинаюче покриття з подальшим поглинанням і розсіянням. Таким чином, для виконання цієї вимоги необхідно, щоб комплексний хвильовий опір поглинаючого покриття прагнув за абсолютною величиною до хвильового опору вільного простору[25].

Для ефективного поглинання хвилі необхідно, щоб середовище мало значні втрати. При цьому, уявні частини комплексної діелектричної і магнітної проникності повинні мати високі значення. При виконанні цих

умов хвильовий опір значно відрізняється від хвильового опору вільного простору і коефіцієнт відображення збільшується. Для узгодження цих двох вимог вживають ряд заходів, що враховують призначення і сферу застосування РПМ, діапазон частот його роботи, вимоги до масогабаритних характеристик, особливості експлуатації[27].

У об'ємних поглиначах використовується об'ємне поглинання електромагнітної енергії за рахунок внесення електричних або магнітних втрат. Поглинаючі матеріали цього типу складаються з основи і наповнювача. Як основа використовуються різні каучуки, пінопласти і інші органічні речовини. В якості наповнювачів використовують порошки графіту, вугільної і ацетиленової сажі, порошки карбонільного заліза, ферити, тонкі металеві волокна. Зовнішню поверхню об'ємних поглиначів часто виконують у вигляді шпильок, що мають форму конуса або піраміди. Різновидів об'ємних поглиначів велика різноманітність. До їх переваг належить високе поглинання енергії ЕМП з малим коефіцієнтом відображення в широкому діапазоні частот. До числа недоліків можна віднести відносно великі масогабаритні параметри[32,33].

Резонансні поглиначі є композицією з чергуючих шарів діелектрика та провідних плівок металу. Товщина діелектрика складає чверть довжини хвилі випромінювання, що падає, або кратна непарному числу. Принцип дії таких систем заснований на інтерференції хвилі, що падає, та утворенні в них стоячих хвиль. Такі поглиначі мають низький коефіцієнт відбивання, малу масу, компактність, але недостатньо широкосмугові[34].

Вплив техногенних випромінювань на біологічні об'єкти. Атмосфера, гідросфера та верхня частина літосфери, яка називається біосферою, являє собою цілісну, складну, динамічну систему, в якій живі організми та середовище їх знаходження органічно пов'язані один з одним та взаємодіють між собою[21].

Однією із умов стійкої рівноваги екосистеми є відносна сталість цих факторів або, їх зміна в межах, які не будуть перевищувати швидкості адаптації живих організмів. Необоротні процеси в біосфері відбуваються протягом мільйона років і живі організми, які мають дивовижні властивості пристосовуватися до зовнішніх умов, встигають адаптуватися. Інший характер мають антропогенні зміни навколишнього середовища, які іноді приводять до різкого збурення середніх значень абіотичних факторів, які виходять за межі стійкості існування та розвитку живого організму[8].

Поява людини, як вищої розумної істоти, чинила та чинить все більше зростаючий вплив на біосферу. Наряду з глибоким діелектричним поєднанням людини та природи, їх взаємозв'язок мають противоречивий характер. З однієї сторони, людина вийшла із природи, користується її ресурсами, з іншої сторони, через свою бурну діяльність людина стала створювати свою власну, відмінну від природної екосистему людини. Поява в біосфері нових компонентів, які визвані діяльністю людини,

характеризують терміном антропогенне «забруднення». Під цим терміном розуміють відходи, які потрапляючи в навколишнє середовище, змінюють або руйнують її біотичні та абіотичні властивості. Забруднення може також впливати на енергетичний баланс, фізико-хімічні властивості, рівні радіоактивності та електромагнітного фону навколишнього середовища[8].

Техногенні «забруднення» та шкідливий вплив можна поділити на чотири великі групи: фізичні, хімічні, біологічні та естетичні[1].

До фізичних забруднюючих речовин відносяться шум, вібрація, електромагнітні поля, іонізуюче випромінювання радіоактивних речовин, теплове випромінювання, ультрафіолетове та видиме випромінювання, що виникає в результаті антропогенної діяльності[1].

До хімічної групи забруднюючих речовин відносять не лише різні хімічні елементи та речовини, але й ті сполуки, які утворюються при взаємодії потрапивших забруднень з біотичними та абіотичними факторами біосфери. Це дуже небезпечно, так як достатньо важко передбачити швидкість та характер хімічних взаємодій, в результаті яких кінцевий продукт може виявитися ще більш токсичним, ніж в початковому стані. Інтенсивне використання ядохімікатів, які розпилюють за допомогою авіації, привело до широкого забруднення навколишнього середовища. Безумовно, ці шкідливі речовини впливають на всі складові частини біосфери[1].

До біологічних забруднюючих речовин можна віднести мікробіологічне отруєння, зміну структури біоценозів[1].

Естетична шкода проявляється в порушенні пейзажів за рахунок наростаючої урбанізації, будівництва промислових об'єктів на території природних заповідників[1].

Природне середовище, яке нас оточує має джерела, які утворюють шумовий, електростатичний та електромагнітний природний фон Землі. До основних джерел, які утворюють електромагнітний та шумовий фон, відноситься Сонце, магнітосфера, атмосферна електрика[3].

Процес передачі енергії від ядра Сонця на його периферію достатньо складний. Більша частина енергії із верхньої частини сонячної корони виноситься потоками сонячного вітру. Ці потоки являють собою плазму. Яка радіально стікає в міжпланетний простір. Утворення сонячного вітру зумовлено потоками енергії більш глибоких шарів Сонця. В залежності від стану сонячної активності біля орбіти Землі концентрація протонів n_p складає від декількох частинок до декількох десятків частинок в одному $см^3$ при потоці $5 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^8 см^{-2} \cdot c^{-1}$. Енергія, яка відноситься сонячним вітром в міжпланетний простір, складає $10^{20} - 10^{22} Вт$. Зміна інтенсивності сонячного вітру в значній мірі впливає на нагрівання верхньої атмосфери Землі, північні саява, магнітні бурі та різні біофізичні процеси. Збільшення інтенсивності сонячного вітру відбувається в результаті сонячних спалахів, які виникають в активних областях атмосфери та тривають від декількох

хвилин до декількох годин. Енергія, яка виділяється при спалаху, досягає 10^{22} Дж. При цьому спостерігається значне збільшення інтенсивності ультрафіолетового випромінювання Сонця, що супроводжується всплесками рентгенівського та радіовипромінювання, значним виділенням частинок високих енергій, майже до 10^4 МэВ. Сонячні спалахи не дають кардинального значення на енергетичний баланс Землі. Однак сонячні спалахи дають суттєвий вплив на біохімічні та біофізичні процеси, Сонце в кінцевому рахунку, є одним із основних джерел енергії Землі не лише у вигляді постійної подачі електромагнітної енергії, та інших джерел енергії, таких як органічне паливо, механічна енергія вітру, морського прибою і т. д., походження яких багато в чому зумовлено сонячним випромінюванням[6].

У іоносфері виникають інтенсивні потоки. Оскільки рух заряджених часток залежить від величини і напряму силових ліній електричного і магнітного полів, від їх тимчасових залежностей, від знаку заряду і вектору швидкості, то відповідно до визначення траєкторії кожної окремої частинки представляє надзвичайно важке завдання. Кожна заряджена частка окрім дії полів зазнає при своєму русі зіткнення з іншими частками з непередбачуваним характером обміну імпульсами. Нині розроблений механізм, що пояснює основні процеси взаємодії сонячного вітру, магнітосфери і іоносфери Землі, у тому числі і утворення полярних сьайв[7].

Атмосферна електрика - істотний абіотичний чинник у біосфері, що грає велику роль в екології. Електростатичні сили, визначені кулонівською взаємодією між двома нерухомими зарядами, у багато разів більше гравітаційної взаємодії. При появі в атмосфері одного роду електрики завжди з'являється рівна кількість електрики іншого роду. Немає жодного явища, при якому створювався або зникав заряд одного роду. Завжди відбувається перерозподіл заряду між тілами. При іонізації атомів виникають вільні електрони, але при цьому виникають і позитивно заряджені іони[6,7].

Джерелами атмосферної електрики в локальних областях є виверження вулканів, торнадо, заметілі, пилові бурі, розбрикування морських хвиль і водоспадів, хмари, опади, парові і димові утворення природного і техногенного походження. При цьому електризація атмосфери відбувається дуже бурхливо, що призводить до виникнення грозових явищ. У грозових хмарах щільність струмів на порядок більша від щільності в зливових хмарах. Сумарний струм, поточний на земну поверхню від однієї грозової хмари, приблизно дорівнює 0,1А (у наших широтах) і досягає 1А в районах екватора[6,7].

Вивчення електричних процесів в атмосфері і контроль за станом атмосфери мають велике значення для екології як з точки зору біологічної дії атмосферної електрики, так і з точки зору зменшення його шкідливої і

небезпечної дії на різні техногенні об'єкти. Електричні процеси, що відбуваються в атмосфері, зумовлені не лише статистичною електрикою і електромагнітним, космічним і сонячним випромінюванням, але і самі хмари є джерелами радіовипромінювання. Атмосферна електрика проявляється у вигляді різноманітних явищ, з яких видне місце займають блискавки[8].

Блискавки є іскровим розрядом між ізольованими одна від однієї частинками повітря. Блискавки бувають лінійними, точковими і кульовими. Серед лінійних блискавок розрізняють «наземні» і внутрішньохмарні.

Точкові блискавки складаються з «плям-точок», що світяться, розділених темними проміжками. Кулевидні блискавки є утвореннями овальної форми, що світяться, з діаметром приблизно 10 - 20 см. Кулясті блискавки мають значні питомі енергії, що досягають $10^6 - 10^7 \frac{Дж}{г}$. Усі види блискавок мають шкідливу, а іноді небезпечну дію на різні об'єкти і людину[8].

При напруженості електричного поля більше $500 - 1000 \frac{В}{м}$ біля поверхні Землі в атмосфері виникає світіння, яке спостерігається в гострих частинах собору святого Ельма, тому і називаються вогні Ельма[8].

Джерелами УФ випромінювання є зірки та інші космічні об'єкти. В діапазоні $\Delta\lambda = 0,09 - 0,02 \mu m$ випромінювання цих тіл поглинається міжзірковим воднем та частково верхніми шарами атмосфери. Велика кількість джерел УФ випромінювання мають техногенне походження. Будь-яке тіло, яке нагрівається до 3000К та вище, має в своєму спектрі ультрафіолетову компоненту. Чим вища температура тіла, тим більше проявляється ультрафіолетова складова спектра. Будь-яка високотемпературна плазма являється джерелом УФ випромінювання, які мають лінійчатий та неперервний спектри. Із збільшенням електронної температури збільшується інтенсивність УФ випромінювання, а в деяких випадках, навіть і рентгенівське випромінювання[8].

До техногенних джерел УФ випромінювання відносяться більш ніж 70 різних лазерних систем, працюючих в УФ та вакуумному УФ діапазоні. До таких джерел відносяться деякі металургійні печі та домни, що плавлять високотемпературні метали і сплави з використанням кисневого дуття, потужних електронних і плазмових потоків[21,8].

В основі біологічної дії УФ випромінювання лежать фотохімічні процеси молекул біополімерів, які виникають в організмах при поглинанні верхніми шарами тканини рослин або шкіри тварин та людини падаючого випромінювання. В залежності від інтенсивності та довжини хвилі УФ випромінювання діє двояко на живі організми. З однієї сторони, малі дози УФ опромінювання дає благотворний вплив на людину та тварин, і сприяє утворенню вітамінів групи D. З іншої сторони, УФ опромінювання

шкідливо впливає на живі організми[9].

Враховуючи велику енергію квантів УФ випромінювання і їх можливість спричиняти деструкцію молекулярних і міжмолекулярних зв'язків, а також безпосередньо впливати на внутріклітинні тканини з утворенням радикалів, УФ проміння являють велику небезпеку для клітини живого організму. Великі дози УФ випромінювання можуть визивати опіки шкіри та канцерогенні реакції, ушкодження очей та інші небажані процеси. УФ проміння з довжиною хвилі 0,24 – 0,28 мкм особливо сильно впливають на організм і приводять до летальної та мутагенної дії, так як цей спектр співпадає з спектром поглинання нуклеїнових кислот. При поглинанні квантів УФ діапазону відбуваються хімічні зміни ДНК за рахунок утворення димерів, які протистоять нормальному здвоєнню ДНК в процесі ділення клітини. Це призводить до загибелі клітини або зміни її спадкових властивостей, тобто утворенню мутацій. Більшість живих клітин мають можливість встановлюватися після ушкоджень, спричинених УФ випромінюванням[9].

Механізм дії УФ випромінювання на живі організми до кінця не вивчений, тим паче неможливо передбачити наслідки виживання різних біооб'єктів при збільшенні інтенсивності УФ випромінювання та зміщенню його спектра в сторону коротких хвиль. Цей процес є небажаним. Людству потрібно піклуватися про те, щоб атмосфера та озоновий шар залишались надійним захистом від пагубного короткохвильового УФ випромінювання[14,15].

Озон, який знаходиться в атмосфері, відіграє виключно важливу роль з точки зору процесів поглинання короткохвильової складової сонячної радіації, тим самим виконуючи захисну функцію для біосфери, так і з точки зору регулятора температурного режиму атмосфери[8].

Зосереджений в стратосфері шар озону має великий вплив на температурний режим атмосфери і процеси поглинання сонячної радіації у всьому спектральному інтервалі. В тропосферному шарі температура із збільшенням висоти зменшується приблизно на 6 К на один кілометр. Цей шар атмосфери називається першим ізотермічним шаром. Вище цього шару температура знову зростає майже до 270 К, досягаючи рівня стратопаузи і до 55 км залишається сталою. Ця область називається другим ізотермічним шаром. Необхідно відмітити, що основна маса повітря атмосфери припадає на тропосферу і стратосферу і лише 1% приходить на масу атмосфери, яка знаходиться вище 51 км. Із області екзосфери, що знаходиться вище області термосфери, відбувається розсіювання атомів атмосфери в світовий простір за рахунок процесів дисоціації. [8]

Фотоемісійні приймачі випромінювання найбільш розповсюджені так як використовують зовнішній фотоефект. Основне призначення цих приймачів – перетворення оптичного сигналу на електричний або перетворення спектрального складу та чіткого зображення при реєстрації

падаючого УФ випромінювання[14].

Основними характеристиками фотоелементів є спектральна чутливість фотокатода; залежність струму від світлового потоку; анодна залежність струму в колі аноду від напруги; частотна залежність вихідного сигналу від частоти синусоїдально-модульованого світлового потоку. Основними параметрами ФЕ є робоча площа фотокатода; номінальна напруга джерела струму; область спектральної чутливості; спектральна чутливість для довжини хвилі, на якій параметр має максимальне значення; світлова чутливість, темновий струм, найбільше значення анодного струму в лінійному режимі. Ці прилади являють собою комбінацію електронних приладів СВЧ та фотоелектричних приладів. Цей новий клас електронних приладів дякуючи своїй чутливості та широкополосності, дуже перспективний в системах лазерного зв'язку[14].

Із квантової теорії відомо, що внутрішня енергія частинок та самої матерії квантова, тобто може мати ряд певних дискретних енергетичних рівнів. Перехід із одного стану в інший супроводжується випромінюванням або поглинанням кванта. Основний рівень – нижній енергетичний рівень частинки – відповідає найменшій внутрішній енергії. Інші рівні, відповідають великим значенням енергії, називаються збудженими. Перехід між рівнями може бути з випромінюванням та без випромінювання. В першому випадку квант енергії потрапляє в навколишній простір, у другому – передається сусіднім частинкам[14,15].

Випромінювальний перехід супроводжується спонтанним або індукованим випромінюванням. При спонтанному випромінюванні відбувається самовільний перехід частинки з верхнього енергетичного рівня на нижній. При цьому фотони не зв'язані між собою, тобто, їх поляризація, фаза, напрямок розповсюдження мають випадковий характер. Індуковане випромінювання відбувається при переході частинки із збудженого рівня на основний під дією кванта зовнішнього електромагнітного поля, частота якого точно відповідає цьому переходу[34].

Для отримання ефекту підсилення поля необхідно, щоб населеність верхнього рівня була більш населеною ніж нижнього рівня, тобто у випадку термодинамічної рівноваги повинно виконуватися умова інверсної населеності. Такий стан квантової системи називається активним. Інверсійна населеність – необхідна умова роботи всіх квантових генераторів та підсилювачів. У випадку рівноважного розподілу у відповідності з законом Больцмана населеність верхнього рівня завжди повинна мати меншу населеність нижнього рівня. У випадку інверсної населеності із двох обраних рівнів верхній рівень повинен мати інверсійну населеність, що відповідає нерівноважному стану[34].

Для забезпечення необхідної умови роботи квантового приладу за допомогою допоміжного некогерентного джерела енергії добиваються

того, щоб пара будь-яких рівнів мала інверсійну населеність. Такий процес називається «накачкою», за допомогою якого встановлюється нерівноважна заселеність будь-якої групи енергетичних рівнів. На сьогоднішній день існує велика кількість методів створення інверсійної населеності: метод допоміжного випромінювання, стаціонарний газовий розряд, нестационарні теплові методи накачки, корпускулярна накачка, хімічні методи накачки, метод інжекції носіїв струму в напівпровідниках[34].

Всі лазерні системи діляться на чотири групи[21]:

- *Лазери на твердому тілі.* До цієї групи відносяться квантові прилади, активним середовищем яких є тверді кристалічні або аморфні речовини, активовані визначеними елементами, наприклад, хром, кобальт, нікель та ін. Найбільш розповсюдженим методом накачки твердотільних лазерів є оптичний метод. При цьому використовується інтенсивне джерело світла. Основною перевагою твердо тільних лазерів є високі значення потужності та енергії випромінювання. Це пояснюється тим, що в твердому тілі легко забезпечити високу концентрацію атомів-активаторів в матриці.

- *Газові лазери.* До цього класу квантових приладів відносяться лазери, у яких активним середовищем є газ або суміш газів. В залежності від використання енергетичних рівнів молекул, атомів або іонів газові лазери можна розділити на молекулярні, атомні та іонні. У зв'язку із тим, що енергетичний спектр газу точно відповідає енергетичному спектру окремих атомів, в цих системах можна встановити різні схеми переходів між енергетичними рівнями. А також в газових лазерах отримують високий порядок монохроматичності та когерентності випромінювання, тому що газ є оптично однорідним середовищем, що дозволяє використати великі відстані між дзеркалами. Далі, газове середовище дозволяє застосовувати різні способи створення інверсії населеності.

- *Рідкі лазери.* Цей клас квантових приладів поєднує переваги твердотільних лазерів з точки зору використання великої концентрації активних носіїв та газових лазерів з точки зору отримання оптичної однорідності у великих об'ємах. Виготовлення активних елементів великих розмірів твердотільних лазерів є складним і дорогим. У рідких лазерах, можна використовувати великі об'єми активного середовища, що поміщається в активний резонатор. Крім того, при неперервній роботі рідка активна речовина дає можливість під час роботи підтримувати оптимальну температуру за рахунок циркуляції в просторі оптичного резонатора.

- *Напівпровідникові лазери.* В цих лазерах використовують різні напівпровідникові матеріали. За допомогою цих лазерів можна отримувати індуковане випромінювання в широкому діапазоні. Головною перевагою напівпровідникових лазерів є високий ККД.

Лазерне випромінювання, має високу інтенсивність, дозволяє отримувати великі значення електричної напруженості в потоці. Лазерне випромінювання дає можливість відносно просто варіювати потужність променевого потоку, змінювати напрямок його розповсюдження за допомогою лінз, які фокусують, зовнішніх коліматорів, відбиваючих дзеркал або спеціальних приладів. Властивості лазерів дозволяють отримати незвичайно великі значення яскравості випромінювання. Однією із важливих характеристик лазерного випромінювання є направленість випромінювання[34].

Застосування традиційних методів вимірювання рівня забрудненості атмосфери стикається з труднощами, які заключаються в тому, що відбір проб відбувається в складних умовах. Обробка результатів відбувається порівняно тривалий час. Крім того, точність вимірювань має значні похибки із-за взаємного впливу вимірювального приладу на об'єкт дослідження. Великими перевагами володіють дистанційні методи, а особливо методи з використанням лазерних випромінювань. Методи лазерної діагностики дозволяють проводити вимірювання на великих відстанях від досліджуваного об'єкту. При цьому не потрібно проводити відбір проб та хімічний аналіз. В основі методів лазерного зондування використовується опромінювання об'єкта падаючим потоком з послідуочим аналізом потоку, який пройшов через об'єкт. Використовуючи будь-який ефект взаємодії падаючого лазерного випромінювання з частинками атмосфери приходять до різних методів лазерного зондування[21].

Метод оптичної локації лазерного зондування атмосфери аналогічний методу радіолокації. Прилади, які працюють на цьому принципі в оптичному діапазоні, іноді називаються лідарами. За допомогою цього методу можна визначити повну концентрацію аерозольних частинок без встановлення роду та властивостей розсіювальних частинок[30].

Метод комбінованого розсіювання заключається в тому, що під час розсіювання світла газовими молекулами відбувається зсув розсіювального випромінювання. Комбінаційний зсув частот має кожна молекула газу, який характерний тільки для неї. Середовище, яке складається із суміші газів молекул, має свій, тільки їй притаманний комбінаційний спектр. Реєстрація спектру розсіювального випромінювання дозволяє визначити наявність домішок в досліджуваному середовищі шляхом аналізу ліній зсуву та смуг поглинання[30].

Метод резонансної флюоресценції оснований на можливості окремих молекул флюорисцинувати під дією падаючого лазерного випромінювання визначеної довжини хвилі[30].

Метод реєстрації випромінювання, що проходить – оснований на реєстрації випромінювання, яке проходить через досліджуване

середовище. Цей метод може бути дуже громіздким і незручним в системах дистанційного виявлення. Різновидності цього методу мають високу чутливість, що дуже вигідно для випадків, коли можна відбирати проби повітря із забруднюючими речовинами та робити тонкий аналіз з високою ідентифікацією[30].

5.5. Захист інформаційних і інформаційно-комунікаційних систем (ІКС) й інфо-комунікаційних мереж, як елемента довкілля, від впливу зовнішніх сил, у тому числі ЕМ випромінювань

Одним із найважливіших завдань при вивченні впливу ЕМ полів на різні структури електротехнічних систем є дослідження стійкості силових кабельних ліній (КЛ) високої та низької напруги, а також захисту інформаційних каналів систем управління енергетичними об'єктами по відношенню до дії зовнішніх електромагнітних випромінювань різного походження та оцінка відповідних струмів і напруг, що наводяться цими випромінюваннями в лініях. При цьому під зовнішніми розуміються випромінювання, що генеруються у широкому діапазоні частот зовнішніми по відношенню до КЛ джерелами найрізноманітнішої природи. В якості таких джерел, можуть виступати різні елементи електротехнічних систем, що генерують ЕМ поля, наприклад, близько розташовані лінії електропередачі, комутаційні пристрої і струмообмежувачі, приймачі і перетворювачі електричної енергії низької і високої напруги, а також електричні розряди блискавки, різного роду потужні випромінювачі ЕМ енергії (наприклад, потужні НВЧ-системи, радіопередавачі та локаторні системи), джерела іонізуючого випромінювання[11].

При екрануванні КЛ, значно знижується ступінь впливу зовнішнього ЕМ поля, амплітуди наведеної напруги в жилах КЛ такі, що з ними доводиться рахуватися, коли йдеться, наприклад, про питання якості електричної енергії. Крім того, проблема захисту КЛ має особливу значимість при вирішенні питань ефективного захисту інформаційних потоків в системах управління, зв'язку та телекомунікації, які використовуються на енергетичних об'єктах. Таким чином, виникає необхідність оцінювати ступінь впливу зовнішніх ЕМ полів, а також на показники якості електричної енергії КЛ та вторинних ланцюгів, і достовірність переданої інформації (керуючих сигналів) — для КЛ систем управління електротехнічними об'єктами і систем зв'язку[27].

Облік електромагнітної сумісності силових, вторинних та інформаційних КЛ з іншими елементами розглянутої електротехнічної системи дозволяє попередити несприятливі дії зовнішніх ЕМ джерел. Прикладами таких дій можуть бути, як уже зазначалося, погіршення показників якості електроенергії, що передається по КЛ, а також нагрівання оболонки, отже, збільшення втрат в лінії[35].

Слід також зазначити, що в останні роки все більше поширюється використання чутливого електронного обладнання та комп'ютерної техніки в електротехнічних системах - це всілякі електронні апарати захисту, засоби комп'ютерного контролю та управління енергетичними системами, що використовують кабельні та радіоканали передачі інформації. Ця обставина, звичайно, має на увазі, що живлять таке обладнання лінії та лінії, що використовуються для обміну керуючими (інформаційними) сигналами, вимагають екранування. На жаль, реальна ефективність екранування часто далека від досконалості, внаслідок чого наведені на зовнішніх оболонках ЕМ поля все ж таки в тій чи іншій мірі проникають крізь екран і впливають на характеристики напруг і струмів в центральній жилі. Це зумовлює необхідність практичного вивчення ступеня такого впливу[33].

Про актуальність перелічених проблем говорить хоча б те, що в останні два десятиліття цим питанням приділяється особлива увага цілим рядом міжнародних наукових організацій та науковою громадськістю. Ще однією з актуальних задач при оцінюванні змін параметрів електротехнічних систем, що відбуваються в результаті впливу ЕМ поля на КЛ, є вивчення особливостей поширення наведеного зовнішнім ЕМ полем сигналу уздовж лінії в залежності від характеру приєднаної до неї навантаження, включаючи питання модуляції, порушення синусоїдальності, генерації вищих гармонік і т. д.[33].

Зазначені міркування визначають актуальність розробки методів і алгоритмів моделювання впливу зовнішніх джерел ЕМ поля на кабельні лінії різного призначення, які дозволили б враховувати величину вкладу цього поля у власну напругу КЛ при вирішенні зазначеного комплексу проблем[36].

Детальне дослідження проблеми зовнішнього ЕМ впливу на провідник передбачає аналіз залежності наведеної напруги від параметрів падаючої хвилі: кута її падіння на провідник, частоти і амплітуди. Не менш важливим завданням, є дослідження впливу наведеного сигналу на корисний сигнал в кабелі і нормальний режим роботи навантаження досліджуваної лінії[37].

Для розрахунку полів, що виникають при падінні ЕМ хвилі на кабель, була вирішена задача дифракції для нескінченно протягнутого кабелю[38].

Часто для вирішення задачі впливу зовнішнього ЕМ поля на кабельні лінії в якості коаксіального кабелю розглядають провідний круговий циліндр, поміщений у зовнішнє поле. Для різних випадків завдання просторової неоднорідності поля методом енергетичного балансу одержано ряд формул для поширення щільності струму, втрат, електродинамічних сил і моментів. Проте такий підхід надто спрощує реальну геометрію кабелів і не враховує шарувату структуру кабельної лінії з різними електричними та магнітними властивостями кожного з

шарів[39].

На даний момент проблема вирішується переважно теоретично, а практичних рекомендацій для інженерів-проектувальників та інженерів-виробників з обліку можливого зовнішнього впливу (на етапі проектування електричних мереж, а також для додаткового захисту функціонування кабельних ліній) не існує[39].

Наступним етапом при вивченні впливу зовнішнього ЕМ впливу на дротові лінії є вивчення характеру поширення по провіднику наведених хвиль струму і напруги (ХСН). Математичний розрахунок ХСН зводиться до розв'язання задачі Коші для системи телеграфних рівнянь, що характеризують зміну струму і напруги на одиницю довжини лінії. Однак класичними телеграфними рівняннями можна розраховувати неоднорідні лінії і враховувати неоднорідні зовнішні впливи. При розгляді лінії, що знаходиться у зовнішньому електричному або магнітному змінних полях, слід описувати наведену в ній напругу за допомогою системи диференціальних рівнянь доповнених доданками, які визначаються зовнішніми полями. Таким чином, ці рівняння стають неоднорідними. Одна з основних труднощів полягає у тому, що зовнішнє поле змінюється по довжині лінії. Приклади можна наводити із різних областей[39,40]:

- розряд блискавки поблизу лінії електропередачі;
- вплив поля на кабелі, розташовані на території відкритої підстанції; в цьому випадку область впливу ЕМП може бути на багато меншим за довжину кабелю;
- зміна траси кабелю, наприклад, її поворот на 90° і т. д

Розроблений алгоритм дозволяє визначити можливі відхилення напруги у кабельній лінії з певними параметрами від номінальної напруги в залежності від амплітудних і частотних характеристик падаючої хвилі. Для цього параметри зовнішніх електромагнітних полів рекомендується вимірювати за допомогою спеціального обладнання. У результаті, за допомогою отриманої номограми можна виявити випадки, коли такі відхилення перевищують припустимі ГОСТом норми. Така інформація корисна, перш за все, при проектуванні або реконструюванні енергооб'єктів, коли слід враховувати електромагнітну сумісність кабельних ліній різного призначення та розташованого поблизу електрообладнання[40].

Представлений підхід є значно простим і менш трудомістким у порівнянні із іншими, які використовувалися і базувалися на досить складній моделі лінії з розподіленими джерелами.

Теоретичні і практичні результати, що вказують на необхідність вирішення проблем ЕМС кабельних ліній з іншими об'єктами електроенергетики. Особливо це необхідно при проектуванні кабельних ліній низької напруги, контрольних кабелів і кабелів систем управління та автоматизації. Прогнозування ЕМ обстановки слід здійснювати як на

стадіях конструювання, проектування, монтажу, експлуатації, так і при реконструкції електротехнічних комплексів і систем. Слід рекомендувати[40]:

1. Перед проектуванням трас проходження кабельних ліній різного призначення необхідно заздалегідь проводити оцінку ЕМ обстановки на шляху їх слідування. Особливо це відноситься до кабелів, що живлять електронну апаратуру захисту, протиаварійної автоматики та зв'язку.

2. Для вже існуючих кабельних трас потрібно використовувати додаткове екранування. Броню, що використовується в якості екрану, слід заземлювати двічі - на території РУ і при вході у будівлю ГЩУ (головним щитом управління) і ОПУ (оперативним пультом управління).

3. Прокладати кабелі і ошиновки силових ліній високої напруги на значних відстанях більше ніж 50 м від приміщень з ГЩУ і ОПУ.

4. Використовувати, де це можливо, оптичні лінії зв'язку, які мають перевагу перед традиційними кабелями, що не є нечутливими до ЕМП та високою пропускну здатністю, а, отже, є високим та надійним якісним зв'язком.

5. На вторинні кабелі, що приходять з РУ, необхідно встановлювати спеціальні фільтри на частоти, характерні для комутаційних перешкод, які існують на конкретному енергооб'єкті. Необхідно забезпечити низький опір на заземлювальному контурі енергооб'єкту в цілому і заземлюючих пристроїв комутаційних апаратів зокрема.

6. При прокладці кабелів із сигналами різного типу в одному лотку слід передбачати їх поділ на різні пучки за типами сигналу і розведення на найбільші можливі відстані один від одного. При наявності кабелів різних напруг існує необхідність в обов'язковому екрануванні, особливо якщо кабель не має металевих оболонки.

5. 6. Радіація. Природні та штучні джерела радіоактивного забруднення. Захист від радіації

5. 6. 1. Теоретичні основи фізики іонізуючого випромінювання

Радіація - узагальнене поняття. Воно включає різні види випромінювань, частина яких зустрічається у природі, інші виходять штучним шляхом.

Перш за все слід розрізнити корпускулярне випромінювання, яке складається із частинок з масою відмінною від нуля, і електромагнітне випромінювання. Корпускулярне випромінювання може складатися як із заряджених, так і з нейтральних частинок. Розрізняють такі види корпускулярного випромінювання[34]:

Альфа-випромінювання - є ядра гелію, які випускаються при

радіоактивному розпаді елементів важче свинцю або утворюються в ядерних реакціях.

Бета-випромінювання - це електрони або позитрони, які утворюються при бета-розпаді різних елементів від найлегших (нейтрон) до найважчих.

Космічне випромінювання приходить на Землю з космосу. До його складу входять переважно протони і ядра гелію. Більш важкі елементи складають менше 1%. Проникаючи вглиб атмосфери, космічне випромінювання взаємодіє з ядрами, що входять до складу атмосфери, і утворюють потоки вторинних частинок (мезони, гамма-кванти, нейтрони).

Електромагнітне випромінювання має широкий спектр енергій і різні джерела: гамма-випромінювання атомних ядер і гальмівне випромінювання прискорених електронів, радіохвилі.

Різні види радіації по різному взаємодіють з речовиною в залежності від типу частинок, що випускаються, їх заряду, маси і енергії. Заряджені частинки іонізують атоми речовини, взаємодіючи з атомними електронами. Нейтрони і гамма-кванти, стикаючись із зарядженими частинками у речовині, передають їм свою енергію, в разі гамма-квантів можливо також народження електрон-позитронних пар. Ці вторинні заряджені частинки, гальмують в речовині, викликають його іонізацію[41].

У реакції організму на опромінення можна виділити чотири фази. Перша, фізична фаза іонізації і збудження атомів триває 10-13 с (всі фази тривають приблизно такий же час). У другій, хіміко-фізичній фазі утворюються високоактивні у хімічному відношенні радикали, які взаємодіючи із різними сполуками, дають початок вторинним радикалам, які мають значно більші порівняно з первинними терміни життя. У третій, хімічній фазі, радикали, що утворилися, вступають в реакції з органічними молекулами клітин, що призводить до зміни біологічних властивостей молекул[19,].

Описані процеси перших трьох фаз є первинними і визначають подальший розвиток променевого ураження. У наступній за ними четвертій, біологічній фазі, хімічні зміни молекул перетворюються на клітинні зміни. Різні види випромінювань характеризуються різною біологічною ефективністю, що пов'язано з відмінностями в їх проникаючу здатність і характером передачі енергії органам і тканинам живого об'єкта, що складається в основному із легких елементів[19].

Альфа-випромінювання має малу довжину пробігу частинок і характеризується слабкою проникаючою здатністю. Воно не може проникнути крізь шкірні покриви. Пробіг альфа-частинок з енергією 4 МеВ в повітрі становить 2.5 см, а в біологічній тканині лише 31 мкм. Альфа-випромінюючі нукліди становлять велику небезпеку при надходженні всередину організму через органи дихання і травлення, відкриті рани та опікові поверхні[16].

Бета-випромінювання має більшу проникаючу здатність. Пробіг бета-частинок в повітрі може досягати декількох метрів, а в біологічній тканині декількох сантиметрів. Так пробіг електронів з енергією 4 МеВ в повітрі становить 17.8 м, а в біологічній тканині 2.6 см[16].

Гамма-випромінювання має ще більш високу проникаючу здатність. Під його дією відбувається опромінення всього організму[16].

Час життя збудженого стану дуже малий ($<10^{-13}$ с), однак в деяких випадках збуджений стан ядра може існувати дуже довго. Такі ядерні стани називаються метастабільними. Ядра, які мають метастабільні рівні, називаються ізомерами. Ядро – ізомер несе в собі властивість 2-ох ядер: його параметри (маса, спин, магнітний момент) в цих станах різні. Ізомерні стани часто бувають у важких ядрах. Причиною ізомерії може бути сильна відмінність у формі ядра для ізомерного і основного станів[16].

Внутрішня конверсія – це процес, який конкурує із γ – випромінюванням і ця конкуренція характеризується повним коефіцієнтом внутрішньої конверсії α , який дорівнює відношенню ймовірності випускання електронів до ймовірності випускання γ – квантів, тобто:

$$\alpha = \frac{N_e}{N_\gamma} = \alpha_K + \alpha_L + \alpha_M, \text{ де } \alpha_K, \alpha_L, \alpha_M \text{ – парціальні коефіцієнти внутрішньої}$$

конверсії для електронів K, L, M – оболонки. Внутрішня конверсія супроводжується β – розпадом, бо первинне ядро може розпастися через β – емісію до вторинного ядра на збуджений стан, який знімається через відповідні переходи. Якщо E збудження ядра переважає власну E ядра вдвічі, то може відбутися процес парної конверсії. У цьому випадку ядро втрачає E збудження шляхом випуску електрона позитрона. Електронна оболонка атома на такий процес не має впливу, він може відбуватися на ядрі без атомних електронів, але ймовірність парної конверсії не перевищує 0,001 від ймовірності випромінювання γ – кванта[34].

Проблеми захисту населення від дії іонізуючого випромінювання мають глобальний, міжнародний характер, і тому відповідні науково-дослідні та організаційні заходи розробляються не тільки в окремих країнах, але і в світовому масштабі. Метою заходів захисту є забезпечення високих показників здоров'я населення, які включають: тривалість життя, інтегральні за часом характеристики фізичної і розумової працездатності, самопочуття і функцію відтворення. Заходи захисту включають[42,43]:

- зниження опромінення населення від усіх основних джерел випромінювання;
- обмеження шкідливого впливу на населення нерадіаційних чинників фізичної та хімічної природи;
- підвищення резистентності і антиканцерогенними захищеності жителів;
- медичний захист населення;
- підвищення рівня радіаційно-гігієнічних знань населення,

психологічну допомогу населенню, допомога в подоланні перебільшеного сприйняття небезпеки радіації;

- формування здорового способу життя населення;
- підвищення соціальної, економічної і правової захищеності населення.

У випадках аварійних ситуацій вживаються додаткові заходи захисту.

5. 7. Фізичні принципи взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною

Заряджені частинки, проходячи через речовину, взаємодіють з електронними оболонками і ядрами атомів. Траєкторія важкої зарядженої частинки у речовині практично прямолінійна. Основними характеристиками важких заряджених частинок при проходженні у речовині є втрати енергії і повний пробіг до зупинки [34].

Загальні електромагнітні втрати енергії заряджених частинок складаються з іонізаційних втрат, радіаційних втрат, втрат на випромінювання та перехідне випромінювання.

Іонізаційні втрати – втрати енергії зарядженої частинки, які пов'язані з порушенням та іонізацією атомів речовини. Питомі іонізаційні втрати називають гальмівною здатністю речовини. Це середня енергія, втрачена частинкою на одиницю довжини шляху. Питомі іонізаційні втрати можуть бути віднесені до величини $\xi = \chi\rho$, де ρ – щільність середовища [34].

Нехай частинка з зарядом ze ($z = 2$ для α -частинок) пролітає із швидкістю v на відстань ρ від вільного електрону з масою m_e і зарядом $-e$, тоді електрон отримає імпульс у напрямку, перпендикулярному до ліній польоту частинки. Імпульс електрона у напрямку паралельному рухові частинки дорівнює нулю, так як при підлітанні $F' > 0$ при відлітанні $F'' < 0$ [34].

Сила, яка діє на електрон зі сторони частинки на ділянці 2ρ , дорівнює $F = \frac{ze^2}{\rho^2} = const$. За другим законом Ньютона $\Delta p = F \cdot \Delta t$. Відстань 2ρ частинка проходить за час $2\rho = v \cdot \Delta t$. Імпульс, який передається електрону $\Delta p = \frac{2ze^2}{\rho \cdot v}$. Енергія, яка передається електрону [34].

$$\Delta T = \frac{(\Delta p)^2}{2m_e} = \frac{2z^2 e^4}{m_e v^2} \cdot \frac{1}{\rho^2}$$

Частинка передає енергію всім електронам, які знаходяться у циліндричному шарі з радіусом ρ товщиною $d\rho$ і довжиною dx . Об'єм циліндричного шару $dV = 2\pi\rho d\rho dx$. У цьому об'ємі знаходиться

dN електронів: $dN = n_e dV$, де n_e – концентрація електронів. Загальна втрата кінетичної енергії зарядженої частинки за рахунок взаємодії зі всіма електронами dN , що знаходяться у циліндричному шарі

$$dT = \Delta T n_e dV \frac{2z^2 e^4}{m_e v^2 \rho^2} n_e 2\pi r dr dx \quad [34].$$

Максимальна відстань ρ_{\max} визначається як гранична відстань, на якій відбувається іонізація електронів у атомі мішені. При цьому кулонівська енергія взаємодії зарядженої частинки та електрону дорівнює середній енергії іонізації \bar{I} електрону $\bar{I} = \frac{ze^2}{\rho_{\max}} = 13,5(eB)$. Тоді $\rho_{\max} = \frac{ze^2}{\bar{I}}$.

Максимальна енергія, яка може бути передана рухомою важкою частинкою електрону, визначає мінімальну відстань ρ_{\min} . Максимальний імпульс, який передається електрону важкою частинкою $\Delta p_{\max} = 2m_e v$, де v – швидкість частинки. Максимальна кінетична енергія, яка передалася електрону

$$\Delta T = \frac{(\Delta p_{\max})^2}{2m_e} = 2m_e v^2 = \frac{2z^2 e^4}{m_e v^2} \cdot \frac{1}{\rho^2}, \quad \text{звідки} \quad \rho_{\min} = \frac{ze^2}{m_e v^2}.$$

Підставляючи формули, отримаємо відношення [34]:

$$\frac{\rho_{\max}}{\rho_{\min}} = \frac{m_e v^2}{\bar{I}}.$$

Більш точна формула Бора для повних питомих іонізаційних втрат важкої зарядженої частинки, яка рухається із швидкістю $v \leq c$ має вигляд[34]:

$$\left(-\frac{dT}{dx} \right)_{\text{іон}} = \frac{4\pi z^2 e^4 n_e}{m_e v^2} \left\{ \ln \left[\frac{m_e v^2}{\bar{I} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)} \right] - \frac{v^2}{c^2} \right\}. \quad (5.9)$$

При релятивістських швидкостях частинки зростає максимальна енергія, що передалася електрону. Доданок $-\frac{v^2}{c^2}$ пов'язаний із лоренцовим скороченням кулонового поля, що приводить до передачі енергії віддаленим електронам[34].

Основний результат: питома втрата енергії зарядженої частинки на іонізацію середовища, пропорційна квадрату заряду частинки, концентрації електронів та обернено пропорційна квадрату швидкості частинки[34]:

$$\left(-\frac{dT}{dx} \right)_{\text{іон}} \sim \frac{z^2 n_e}{v^2}. \quad (5.10)$$

Залежність від маси частинки відсутня.

Проходження легких заряджених частинок (електронів і позитронів) через речовину якісно відрізняється від проходження α -частинок і протонів. Маса електрона на багато менше маси ядер. Передача імпульсу велика при зіткненні рухомого електрона з електронами атомів, і траєкторія його руху відрізняється від прямої. Електрон при зіткненнях рухається з прискоренням, що породжує кванти електромагнітного поля. У міру гальмування у речовині моноенергетичного пучка електронів він перетворюється на дифузійний потік зі складним просторовим розподілом електронів по енергіям [34].

Повні втрати електронів складаються із іонізаційних втрат і радіаційних втрат (втрати на гальмівне випромінювання) [34:]

$$\left(-\frac{dT}{dx}\right)_{\text{повн}}^{(e)} = \left(-\frac{dT}{dx}\right)_{\text{іон}}^{(e)} + \left(-\frac{dT}{dx}\right)_{\text{рад}}^{(e)}. \quad (5.11)$$

Питомі іонізаційні втрати нерелятивістських електронів при енергіях

$$\beta = \frac{v}{c}, \text{ при } c \ll 1,$$

$$\left(-\frac{dT}{dx}\right)_{\text{іон}}^{(e)} = \frac{4\pi e^4 n_e}{m_e v^2} \ln \frac{m_e v^2}{2I}. \quad (5.12)$$

Питомі іонізаційні втрати електронів у загальному випадку

$$\left(-\frac{dT}{dx}\right)_{\text{іон}}^{(e)} = \frac{2\pi e^4 n_e}{m_e v^2} \left[\ln \frac{m_e v^2 T}{2I^2 (1-\beta^2)} - \ln 2 \left(2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2 \right) + 1 - \beta^2 \right], \quad (5.13)$$

де $T = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - mc^2$ – релятивістська кінетична енергія електрона.

Заряджена частинка, що рухається з від'ємним прискоренням, завжди випромінює електромагнітні хвилі. Випуск фотонів обумовлене розсіюванням частинок в кулонівському полі ядер. Кулонівське поле гальмує заряджену частинку. Виникаюче при цьому випромінювання називається гальмівним випромінюванням. Втрати енергії на таке гальмівне випромінювання називаються радіаційними втратами. Питомі радіаційні втрати електронів описуються співвідношеннями [34]:

$$\left(-\frac{dT}{dx}\right)_{\text{рад}}^{(e)} = \frac{16}{3} n T_e \frac{z^2 r_e^2}{137},$$

при $T_e \ll m_e c^2 = 0,5 \text{ MeV}$,

$$\left(-\frac{dT}{dx} \right)_{\text{рад}}^{(e)} n T_e \frac{z^2 r_e^2}{137} \left[4 \ln \frac{2T_e}{m_e c^2} - \frac{4}{3} \right],$$

при $m_e c^2 \ll T_e \ll 137 m_e c^2 Z^{-1/3}$,

$$\left(-\frac{dT}{dx} \right)_{\text{рад}}^{(e)} n T_e \frac{Z^2 r_e^2}{137} \left[4 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{2}{9} \right], \quad (5.14)$$

при $T_e \gg 137 m_e c^2 Z^{-1/3}$

де T_e – кінетична енергія електрона, $r_e = \frac{e^2}{m_e c^2}$ – класичний радіус електрона в атомі, n_e – концентрація електронів, Z – порядковий номер атомів речовини. Із формул (8.6) випливає, що радіаційні втрати на випромінювання мають вигляд $\left(-\frac{dT}{dx} \right)_{\text{рад}} \sim Z^2 n_e T_e$. Враховуючи, що

іонізаційні втрати $\left(-\frac{dT}{dx} \right)_{\text{рад}}^{(e)} \sim Z n_e$, отримуємо наступне відношення між радіаційними та іонізаційними втратами електрону[34]:

$$\frac{\left(-\frac{dT}{dx} \right)_{\text{рад}}}{\left(-\frac{dT}{dx} \right)_{\text{іон}}} \approx \frac{T_e Z}{800}. \quad (5.15)$$

Відстань, пройдена зарядженою частинкою в речовині до повної втрати кінетичної енергії, називається пробігом [34]:

$$R = \int_{T_0}^0 \frac{dT}{-\frac{dT}{dx}}, \quad (5.16)$$

де T_0 – кінетична енергія частинки до потрапляння у речовину. Емпіричні формули для середнього пробігу частинок з кінетичною енергією T . Середній лінійний пробіг α -частинки у повітрі при нормальних умовах [34]

$$R_\alpha (\text{см}) = 0,31 T^{3/2} \text{ для } (4 \text{ МэВ} < T < 7 \text{ МэВ}), \text{ або } (3 \text{ см} < R_\alpha < 7 \text{ см}). \quad (5.17)$$

Середній масовий пробіг α -частинки у речовині з масовим числом A

$$R_\alpha (\text{мг/см}^2) = 0,56 R_\alpha (\text{см}) A^{1/3}. \quad (5.18)$$

Середній лінійний пробіг α -частинки у повітрі з енергією $T_\alpha < 200$ МэВ

$$R_\alpha (\text{м}) = (T_\alpha/37,2)^{1/8}. \quad (5.19)$$

Середній масовий пробіг електронів в алюмінії ($\rho = 2,7$ г/см³):

$$R_e (\text{г/см}^2) = 0,407T_e^{1,38} \text{ при } (0,15\text{МэВ} < T_e < 0,8 \text{ МэВ}),$$

$$R_e (\text{г/см}^2) = 0,542T_e - 0,133 \text{ при } (0,8 \text{ МэВ} < T_e < 3 \text{ МэВ}). \quad (5.20)$$

Радіоактивні атоми одного і того ж сорту випромінюють електрони різноманітних енергій, починаючи від нуля до деякого граничного значення, яке називається верхньою границею β - спектра. У випадку простого β - спектра максимальну енергію зручно визначати по товщині шару половинного поглинання β -частинок в речовині. Для цього треба виміряти швидкість рахунку частинок, які випромінюються бета - активним джерелом, в залежності від товщини поглинача. Як поглинач для β - частинок зазвичай використовують алюмінієву фольгу. Поправку на поглинання бета-частинок на шляху джерело-лічильник обчислюють за формулою: $I = I_0 \cdot 2^{-\rho d / \Delta}$, де Δ — товщина шару половинного поглинання. Товщина шару половинного поглинання залежить від максимальної енергії E_{max} бета - спектру[34,44].

Розсіювання рентгенівського випромінювання відбувається внаслідок зіткнення з атомами речовини і відхилення від напрямку основного пучка. Коли випромінювання м'яке (кванти несуть малу енергію), відбувається пружний удар, під час якого квант м'якого рентгенівського випромінювання стикається з електроном внутрішньої орбіти атома, а енергія його недостатня, щоб підняти цей електрон на поверхню атома, тому рентгенівське випромінювання також тільки відхиляється вбік, не змінюючи довжини хвилі. В обох випадках відбувається класичне розсіювання. Якщо м'яке рентгенівське випромінювання стикається з вільним електроном або електроном зовнішньої орбіти атома речовини, то відбувається непружний удар, внаслідок якого квант випромінювання передає частину своєї енергії електрону (електрон віддачі), а сам у вигляді кванта розсіювання перетворюється на випромінювання з більшою довжиною хвилі та відхиляється вбік від початкового напрямку руху. Те саме відбувається і тоді, коли квант із більшою енергією (жорстке випромінювання) стикається з електроном на внутрішній орбіті атома. При цьому виникає явище Комптона (розсіяне випромінювання з іншою довжиною хвилі та кількістю електронів), яке відбувається лише тоді, коли енергія кванта приблизно в 10 000 разів перевищує енергію зв'язку електрона в атомі. Електрони віддачі, відриваючись від цього атома, викликають збудження та іонізацію інших атомів і молекул середовища.

Сам рентгенівський квант втрачає частину енергії, передану електрону, і, відповідно, збільшується довжина хвилі. Під час взаємодії рентгенівського випромінювання з речовиною одна частина енергії витрачається у вигляді випромінювання (енергія розсіювання), а друга передається електронам середовища - поглинається (енергія поглинання) [44].

Майже всі види випромінювання, що виникають внаслідок взаємодії електронного пучка з твердим тілом, використовують для отримання інформації про його природу (топологию поверхні, кристалічну структуру, елементний склад, електронну структуру тощо) у приладах з електронним зондом.

При обговоренні процесів розсіювання ключовим поняттям є *ймовірність*, або *переріз, розсіювання* (Q), що у загальному випадку може розглядатися як ефективний розмір атома для даної взаємодії. Величина перерізу визначається за таким співвідношенням[44]:

$$Q = \frac{N}{n_1 n_2}, \quad (5.21)$$

де N , n_1 – число зіткнень і атомів у одиниці об'єму мішені; n_2 – число електронів, які падають на одиницю площі поверхні мішені. Знаючи переріз розсіювання, можна розрахувати *середню довжину вільного пробігу електрона* (СДВП) – середню відстань, що проходить електрон між двома послідовними зіткненнями або актами взаємодії:

$$\lambda = \frac{A}{N_A \rho Q}, \quad (5.22)$$

де A , ρ – атомна маса та густина матеріалу мішені; N_A – число Авогадро.

При радіоактивному розпаді ядра випускають гамма-кванти з енергією в межах від декількох кілоелектронвольт до декількох мегаелектронвольт. Проходячи через речовину, гамма-кванти втрачають енергію в результаті прояву практично трьох ефектів: фотоелектричного

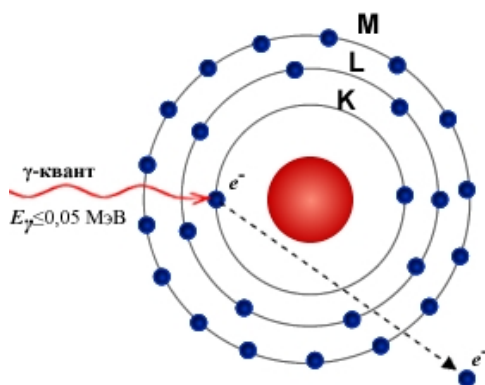


Рис. 5.1. Вибивання електрона з внутрішньої електронної оболонки [34].

поглинання (фотоелектричний ефект), комптонівського розсіювання (комптонефект), утворення електронно-позитронних пар[34].

При фотоелектричному поглинанні гамма-квант, стикаючись з міцно пов'язаним електроном (частіше електронами К-шару) в атомах речовини, що опромінюється, повністю

передає йому свою енергію, сам зникає, а електрон набуває кінетичної енергії, що дорівнює енергії гамма-кванта мінус енергія зв'язку електрона в атомі (рис. 5.1). Таким чином, при фотоелектрічному ефекті вся енергія первинного гамма-кванта перетворюється на кінетичну енергію фотоелектронів, які іонізують атоми і молекули. На звільнене місце в орбіті К-шару перескакує електрон L-шару, на L-шар - електрон М-шару і т. д. з висвічуванням квантів характеристичного рентгенівського випромінювання. Фотоелектричний ефект неможливий на слабоз'язаних і вільних електронах (не пов'язаних з атомом), тому що вони не можуть поглинути гамма-кванти [34].

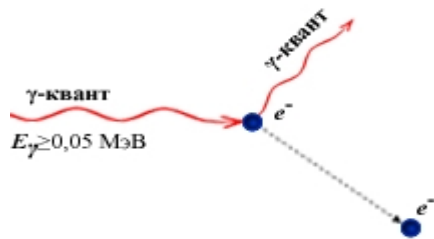


Рис. 5.2. Розсіювання гамма-квантів на вільних електронах[34].

Ефект Комптона полягає в тому, що гамма-кванти, стикаючись з електронами, передають їм не всю свою енергію, а тільки частку її і після зіткнення змінюють напрямок свого руху, тобто розсіюються (рис. 5.2). Внаслідок зіткнення з гамма-квантами електрони (електрони віддачі) набувають значної кінетичної енергії і витрачають її на іонізацію речовини (вторинна іонізація). На відміну від процесу фотоелектричного поглинання при комптонівському ефекті гамма-кванти взаємодіють із зовнішніми, валентними електронами, енергія зв'язку яких мінімальна. Комптонівське розсіювання можливо на вільних електронах. Таким чином, в результаті комптонівського ефекту інтенсивність гамма-випромінювання послаблюється внаслідок того, що гамма-кванти, взаємодіють з електронами середовища, розсіюються в різних напрямках і йдуть за межі первинного пучка, а також в результаті передачі електронам частини своєї енергії[34].

Деякі гамма-кванти з енергією не нижче 1,022 MeV, проходячи крізь речовину, перетворюються під дією сильного електричного поля поблизу ядра атома на пару «електрон-позитрон». Утворення такої пари частинок можливе тільки при енергіях гамма-квантів, не менших, ніж енергія, еквівалентна масі обох часток - електрона і позитрона. Оскільки маси електрона і позитрона однакові, то для утворення їх (без надання їм додаткової кінетичної енергії), енергія гамма-кванту повинна задовольняти співвідношення взаємозв'язку маси та енергії. Якщо енергія гамма-квантів більша за 1022 MeV, то надлишок її віддається частинкам. Тоді кінетична енергія утворених частинок E_k дорівнює різниці між енергією фотона E_γ , і подвоєною енергією спокою електрона. Утворена електронно-позитронна пара надалі зникає (анігілює), перетворюючись в два вторинних гамма-кванти з енергією рівній енергетичного еквіваленту маси спокою частинок.

Вторинні гамма-кванти здатні викликати лише комптонівський ефект і в кінцевому рахунку фотоефект, тобто втрачати енергію тільки при зіткненнях з електронами. Ймовірність процесу утворення пар збільшується зі зростанням енергії гамма-квантів і щільності поглинача. Гамма-промені високих енергій (більше 8 MeV) можуть взаємодіяти з ядрами атомів (ядерний ефект). Ймовірність такого ефекту досить мала, і цей вид взаємодії практично не послаблює випромінювань в речовині [44].

Пучок гамма-променів поглинається безперервно із збільшенням товщини шару поглинача, його інтенсивність не обертається в нуль ні при яких товщинах шару поглинача. Це означає, що, якою б не була товщина шару речовини, не можна повністю поглинути потік гамма-променів, а можна тільки послабити його інтенсивність в будь-яке число раз. У цьому істотна відмінність характеру послаблення гамма-випромінювання від ослаблення потоку альфа- і бета-частинок, де завжди можна підібрати такий шар речовини, в якому повністю поглинається потік альфа-або бета-частинок [44].

Закон послаблення може бути виражений також через шари половинного ослаблення $D_{1/2}$. Товщина поглинача, після проходження якого інтенсивність випромінювання послаблюється вдвічі, називається шаром половинного ослаблення. Знаючи шар половинного послаблення, можна досить легко визначити, який потрібно взяти шар поглинача, щоб послабити випромінювання в дане число раз [34].

Внаслідок того, що нейтрони не мають заряду, а маса їх на багато більша маси електронів, вони мають велику проникаючу здатність і втрачають свою енергію практично тільки при зіткненні з ядрами атомів. При цьому можливо пружне і непружне розсіяння нейтронів на ядрах [34].

Нейтронне випромінювання небезпечне внаслідок своєї високої проникаючої здатності і можливості викликати в живих організмах наведену радіоактивність. В залежності від енергії розрізняють надшвидкі, швидкі, проміжні, повільні й теплові нейтрони [34].

Надшвидкі нейтрони. Такі нейтрони отримують в ядерних реакторах або вони виникають при ядерних вибухах. Енергія їх становить $10 \div 50$ MeV. При взаємодії з важкими елементами надшвидкі нейтрони викликають поділ їх ядер. При цьому утворюються сильно збуджені ядра. В результаті порушення співвідношення протонів і нейтронів в ядрах зменшуються сили ядерного зчеплення, і нуклони під дією сил відштовхування розходяться до протилежних полюсів. Ядро деформується, в центрі утворюється перетяжка, і воно розщеплюється на два-три осколки. Під час кожного акту розподілу вивільняється колосальна енергія (близько 200 MeV) і вилітає два-три вільні нейтрони, які здатні викликати розподіл інших ядер. Так виникає ланцюговий процес розподілу ядер [34].

Швидкі нейтрони. Такі нейтрони також утворюються в результаті ядерних реакцій поділу або синтезу. Енергія їх перевищує 100 кеВ. При зіткненні з ядрами атомів швидкі нейтрони передають їм частину своєї енергії, утворюючи швидколетючі ядра (ядра віддачі). Ядра віддачі, як і всі заряджені частинки, витрачають свою енергію на іонізацію середовища. Частинка переданої ядру енергії зростає зі зменшенням маси ядра. Так, при зіткненні нейтронів з ядрами водню, тобто з протонами, їм передається в середньому до 60% енергії нейтрона, так як маси цих часток практично рівні. Тому швидкі нейтрони добре сповільнюються легкими речовинами, що містять багато атомів водню, такими, як вода, парафін, тканина, і вільно проходять через великі товщини важких речовин (свинець та ін.) При взаємодії з ядрами нейтрони поступово сповільнюються аж до теплових швидкостей, тобто до швидкостей руху молекул середовища [34].

Проміжні нейтрони. Енергія таких нейтронів $1 \div 100$ кеВ. Вони частіше взаємодіють з речовиною за типом пружного розсіювання [34].

Повільні і теплові нейтрони. Енергія повільних нейтронів не перевищує 1 кеВ. На відміну від швидких нейтронів повільні захоплюються ядрами атомів, в результаті чого утворюються нові стабільні або радіоактивні ізотопи. Радіаційне захоплення нейтронів супроводжується випусканням жорстких гамма-квантів з енергією, що дорівнює 2,18 МеВ. Енергія теплових нейтронів досягає 0,025 еВ. Теплові нейтрони, так само як і повільні, захоплюються поглинаючим середовищем [34].

Для захисту від нейтронів з низькою енергією необхідно використовувати крім поглинача (вода, бор або кадмій) і екран з важкого матеріалу (свинець, барій) для ослаблення гамма-випромінювання.

Іонізуюче випромінювання становить велику небезпеку для живих організмів біосфери, а особливо для людини. З таким видом фізичних полів потрібно проявляти особливу обережність, тому що дуже часто радіоактивність не маючи кольору, запаху, смаку, чинить згубну дію на людський організм з летальним кінцем. При розгляді біологічної дії радіоактивності розрізняють зовнішні та внутрішні опромінювання. Зовнішнє опромінювання являє собою випадок, коли джерело радіації знаходиться за межами організму і продукти радіоактивності не потрапляють в середину організму. Перші ознаки хронічного ураження: сухість шкіри, з'являються язви, випадіння волосся [42].

Живі організми постійно піддаються опроміненню за рахунок природного фону. Фонове радіоактивне випромінювання складається в основному із трьох складових: природного фону, які викликані радіонуклідами біосфери, техногенного фону, викликаного діяльністю людини, рентгенодіагностики [18].

На основі нормативних вимог встановлюють порядок проведення робіт з джерелами іонізуючих випромінювань і забезпечення ліквідації

радіоактивних відходів [18,19].

Для забезпечення радіаційної небезпеки потрібно виконувати загальні принципи захисту: не перевищувати максимально допустимі дози; застосовувати метод захисту відстанню, часом; застосовувати захисні екрани; використовувати засоби індивідуального захисту та ін. Вибір захисного екрану потрібно виробляти в залежності від виду іонізованого випромінювання. Для захисту від α - випромінювання застосовують екрани із скла товщиною декілька міліметрів. Для захисту β - випромінювання використовують матеріали з малою атомною масою, а частіше комбіновані. Для захисту від γ - випромінювання застосовують матеріали з великою атомною масою та високою щільністю, а також більш дешеві матеріали та сплави. Стаціонарні екрани виконуються без бетону. При роботі з радіонуклідами слід використовувати спецодяг [18,19].

5. 8. Фізичні основи радіометрії й дозиметрії

Для визначення радіоактивності використовують три основні методи радіометрії: абсолютний, розрахунковий, відносний.

Абсолютний метод оснований на використанні прямого рахунку всієї кількості часток ядер, що розпадаються в умовах геометрії, близької до 4π . При цьому активність зразка виражається не в імпульсах, а в одиницях радіоактивності – Кі і Бк. Для цього методу оцінки радіоактивності використовують такі 4π -лічильники, в які розміщують зразки: газопоточний типу СА-4БФЛ або рідинні сцинтилятори типу ЖС-1 чи ЖС-7. Даний метод поки що не має широкого практичного використання через високу вартість 4π -лічильників і велику складність підготовки зразків. Але він є практично єдиним методом для вимірювання еталонних зразків [13].

Розрахунковий метод оснований на реєстрації імпульсів, що надходять від детектора на блок реєстрації і подальшій математичній обробці отриманих цифрових показників. При цьому істинну радіоактивність визначають за формулою [13,34]:

$$A_{np} = \frac{N_{0np+\phi} - N_{\phi}}{\omega k p q r \gamma t} * 2.22 \cdot 10^2, \quad (5.23)$$

де, $N_{0np+\phi} - N_{\phi}$ - швидкість лічби від проби без фону, ω – поправка на геометричні умови вимірювання, ϵ – корегуюча поправка на лічильну здатність детектора, k – поправка на поглинання випромінювань в шарі повітря і вікні (стінці)лічильника, p – поправка на самопоглинання в шарі препарату, q – поправка на зворотне розсіювання від кювети, r – поправка на схему розпаду, γ – поправка на γ -випромінювання при змішаному β - і γ -

випромінюванні, m – вага препарату, $2,22 \cdot 10^2$ – перехідний коефіцієнт від числа розпадів за хвилину в K_i .

Відносний метод оснований на порівнянні швидкості лічби від препарату з відомою активністю (еталона) зі швидкістю лічби від препарату невідомої активності (вимірюваного зразка). При цьому активність розраховують із такої пропорції [13,34]:

$$A_{em} : N_{0em} = A_{np} : N_{0np}$$

звідси

$$A_{np} = A_{em} N_{0np} : N_{0em} \quad (5.24)$$

В цьому методі головним є правильний підбір еталона, вартість якого у деяких випадках значно вища, ніж найдорожчий спектрометр. Тому еталони не може мати й лабораторія самого високого класу. Ними забезпечують спеціальні заводи з еталонування радіометричної апаратури. На заводі еталонів проводиться еталонування-паспортизація всіх приладів, призначених для експертної оцінки вмісту радіонуклідів. В залежності від завдань лабораторіями замовляються коефіцієнти зв'язку для проб, що вимірюються. Для кожного виду зразку дані коефіцієнти визначається шляхом ділення A_{em} на N_{0em} . Після цього активність проби розраховують за формулою [13,34]

$$A_{np} = K_{36} N_{0np} \quad (5.25)$$

До відносного методу відносяться також експрес-методи визначення сумарної β -активності [13]:

1) Методи визначення питомої масової сумарної β -активності.

а) Метод "тонких" зразків. "Тонким" вважається зразок такої товщини, при якій поглинання випущених β -частинок незначне. Швидкість лічби детектором β -частинок, випущених зразком, n_{ef} (кількість імпульсів, зареєстрованих за одиницю часу) пов'язана з питомою масовою сумарною активністю таким чином:

$$q = \frac{n_{ef}}{d\Omega \varepsilon K_n m} \quad (5.26)$$

де m – маса зразка, K_n - коефіцієнт поглинання β -випромінювання в речовині зразка, $d\Omega$ – коефіцієнт, який враховує, що лише частина випущеного випромінювання потрапляє до детектора, ε – ефективність реєстрації випромінювання детектором.

Слід зазначити, що швидкість лічби детектора визначається не тільки β -випромінюванням зразка, але й фоновим (в основному космічним).

Швидкість лічби фонового випромінювання вимірюється без зразка, а різниця загальної швидкості лічби та фонової і є швидкість лічби n_{ef} , пов'язана з активністю зразка [13].

Загальним недоліком метода "тонких" зразків є слабка чутливість внаслідок використання зразків з невеликою масою і малою активністю, що визначає низьку швидкість лічби β -випромінювання зразка і досить тривалий час вимірювань[13].

б) Метод "товстих" зразків. Застосовуючи метод "товстих" зразків питому масову сумарну β -активність визначають в зразках такої товщини, що її подальше збільшення не призводить до збільшення виходу β -частинок зі зразка. Наприклад, відомо, що пробіг β -частинок в біологічній тканині становить до 10 мм. Якщо взяти розмелений зразок біологічної тканини, то його активність в залежності від товщини приблизно буде такою: 7 мм – 70 Бк, 8 мм – 80 Бк, 9 мм – 90 Бк, 10 мм – 100 Бк, 11 мм – 100 Бк, 12 мм – 100 Бк. В даному прикладі товстим шаром буде зразок товщиною 10 мм. Сумарна швидкість лічби в такому випадку не залежить від товщини зразка, а прямо залежить від його питомої масової активності і не залежить від маси і щільності зразка [13]:

$$q = K_T n \quad (5.27)$$

Такий підхід дозволяє вимірювати зразки без зважування. Коефіцієнт K_T визначається при вимірюванні зразків з відомою питомою активністю і різний для різних радіонуклідів та їх сумішей. Тому при вимірюванні питомої масової сумарної β -активності необхідно мати інформацію про радіонуклідний склад проби і використовувати відповідний коефіцієнт[13].

Перевагами методу є, як вказувалося, є можливість вимірювання без зважування проби і відносно невеликий час вимірювання, який залежить від активності зразка[13].

2) Касетний метод. Підвищує лічильну здатність приладу та швидкість вимірювання зразку за рахунок збільшення кількості детекторів[13].

3) Кюветний метод. Дозволяє покращити геометричні умови вимірювання до 4π за рахунок того, що в абсолютному методі проба знаходиться в детекторі, а в даному випадку детектор знаходиться в пробі[13].

4) Визначення сумарної β -активності по зольному залишку. Використовується при низькій концентрації радіоактивних речовин в зразку. Розрахунок проводиться за формулою [13]:

$$A_{np} = K_{3e} N_{0np} M \quad (5.28)$$

де M – коефіцієнт зольності, що визначається діленням маси золи в грамах на масу сирого зразка в грамах.

Основною одиницею в радіобіології і 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 [13,18,19].

Зовнішнє опромінення – опромінення тіла людини чи будь-якого живого об'єкта джерелами іонізуючих випромінювань, які знаходяться поза ним [16,19].

Внутрішнє опромінення – опромінення тіла людини чи будь-якого живого об'єкта, окремих органів та тканин від джерел іонізуючих випромінювань, що знаходяться в самому об'єкті [16,19].

В радіаційному захисті, радіоекології та радіобіології розрізняють п'ять основних видів доз іонізуючих випромінювань: експозиційну, поглинену, еквівалентну, ефективну і колективну [16].

Експозиційна доза фотонного випромінювання (D_{exp}) є відношенням сумарного заряду усіх іонів одного знаку (dQ), утворених у повітрі, коли всі електрони й позитрони, вивільнені фотонами в елементарному об'ємі повітря масою dm , повністю зупинилися в повітрі, до маси повітря в зазначеному об'ємі [16].

$$D_{\text{exp}} = dQ/dm \quad (5.29)$$

У системі СІ за одиницю експозиційної дози прийнято кулон на кілограм (Кл/кг; C/kg). Позасистемною одиницею експозиційної дози є рентген (Р; R): $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ [16].

Рентген – це така кількість іонізуючого випромінювання, яка утворює в 1 м^3 сухого повітря при нормальних умовах близько 2 млрд. пар іонів. Похідними від рентгена є 1 міллірентген (мР) = $1 \cdot 10^{-3} \text{ Р}$ та 1 мікрорентген (мкР) = $1 \cdot 10^{-6} \text{ Р}$. Співвідношення між Кл/кг та рентгеном: $1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$ [34].

Потужність експозиційної дози фотонного випромінювання (потужність експозиційної дози) (P_{exp}) – відношення приросту експозиційної дози (dP_{exp}) за інтервал часу dt до цього інтервалу часу [16]:

$$P_{\text{exp}} = dD_{\text{exp}}/dt \quad (5.30)$$

Експозиційна доза розраховується за формулою [16]:

$$D_{\text{exp}} = \int_0^t P_{\text{exp}} dt \quad (5.31)$$

або

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

де t – час опромінення.

В системі СІ за одиницю потужності експозиційної дози прийнято ампер на кілограм (А/кг). Позасистемною одиницею потужності експозиційної дози є рентген за секунду (Р/с): $1 \text{ Р/с} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$; $1 \text{ Р/год} = 1000 \text{ мР/год} = 10^6 \text{ мкР/год}$ [16].

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) [16]:

$$P \approx A\Gamma/r^2 \quad (5.32)$$

де Γ – повна гама-стала.

Беручи 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 СІ [16].

У радіобіології, клінічній радіології та радіаційному захисті поглинена доза (D) є базовою фізичною величиною, яка використовується для всіх видів іонізуючого випромінювання і будь-яких геометрії випромінювання [16].

Поглинена доза визначається як відношення середньої енергії (dE), що передана іонізуючим випромінюванням речовині в елементарному об'ємі, до маси dm речовини в цьому об'ємі. 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 [16]:

$$D = dE/dm \quad (5.33)$$

У системі СІ за одиницю поглиненої дози взято Грей (Гр); розмірність поглиненої дози – джоуль на кілограм; $1 \text{ Грей} = 1 \text{ Дж/кг}$. Похідними величинами є $1 \text{ мГр} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Гр}$ і $1 \text{ мкГр} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Гр}$ [16].

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) [16].

Існують певні співвідношення між одиницями наведених доз для гамма-випромінювання. Так, 1 рад приблизно дорівнює 1 Р (точніше 1.04 Р). Експозиційна доза 1 Р у повітрі відповідає поглиненій дозі 0.87 рад [16].

Потужність поглиненої дози іонізуючого випромінювання (потужність дози випромінювання) P_{abs} – це відношення приросту поглиненої дози (dD) за інтервал часу (dt) до цього інтервалу часу[16]:

$$P_{abs} = dD/dt \quad (5.34)$$

В системі СІ за одиницю потужності поглиненої дози береться 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 керма, P_{exp}) слід використовувати такі співвідношення[16]:

$$P_{abs} (\text{нГр/год}) = 8,73 P_{exp} (\text{мкР/год}) \quad (5.35)$$

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)[16]:

$$D_T = E_T/m_T \quad (5.36)$$

Керма (від англ. "kerma" – kinetic energy released into material) – відношення суми первинних кінетичних енергій (dW_k) всіх заряджених частинок, утворених під впливом непрямого іонізуючого випромінювання в елементарному об'ємі речовини, до маси (dm) речовини в цьому об'ємі (dW_k/dm). Одиниця вимірювання керми є Грей[16].

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 фактора (W_R)[16]:

$$H_T = D_T W_R \quad (5.37)$$

Одиницею еквівалентної дози у системі СІ 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[16].

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, спричиненими рентгенівським або слабо енергетичним гамма-випромінюванням[16].

Радіаційний зважуючий фактор (коефіцієнт якості) w_R - коефіцієнт, що враховує відносну біологічну ефективність різних видів іонізуючого випромінювання. Використовується винятково при розрахунку ефективної та еквівалентної доз. В рекомендаціях МКРЗ радіаційний зважуючий фактор для нейтронів у залежності від їх енергії замінений із ступінчастої на неперервну функцію[16,18].

Для врахування нерівномірного впливу іонізуючого випромінювання на організм розрізняють ефективну дозу[18].

Ефективна доза (E) - сума добутоків еквівалентних доз H_T в окремих органах і тканинах на відповідні тканинні зважуючі фактори W_T [16]:

$$E = H_T W_T \quad (5.38)$$

Використання поняття ефективної дози допускається при значеннях еквівалентних доз нижчих за поріг виникнення детерміністичних ефектів (0.1 Зв при гострому опроміненні чи хронічному протягом року). Одиниця ефективної дози в системі СІ –Зіверт (Зв). Позасистемна одиниця – бер[16].

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 органа 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[16].

Тканинний зважуючий фактор – коефіцієнт, який відображає відносну імовірність стохастичних ефектів в тканині (органі). Сума всіх зважуючих факторів по всіх органах дорівнює одиниці: $\sum W_T = 1$. Використовується винятково при розрахунку ефективної дози[16,17].

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 таким співвідношенням[16,17]:

$$dE/dt = 6,46 P_{exp} \quad (5.39)$$

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 (життєво важливі) елементи можуть бути виділені й у кожній окремій клітині, а не тільки в цілому організмі[16,17].

Практично існують три способи виділення критичних органів[16,17]:

- за найбільшою радіочутливістю у певній системі організму;
- за найбільшою поглиненою дозою випромінювання;
- за вибіркоким накопиченням підвищених концентрацій певного радіонукліда і, таким чином, отриманням найвищих ефективних еквівалентних доз випромінювання (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 I^{131} , вибірково накопичується в щитоподібній залозі хребетних, і тому дозу оцінюють із розрахунку на цей орган. Sr^{90} зосереджується в поверхневих шарах кісток, і дозу потрібно перераховувати на цю тканину тощо[16,17].

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[16,17].

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» (усередненої по статі з характеристиками, визначеними МКРЗ у контексті радіаційного захисту, з анатомічними та фізіологічними характеристиками), 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 [16,17].

Колективна ефективна (еквівалентна) доза – це сума індивідуальних ефективних (еквівалентних) доз опромінення певної групи населення за певний період часу, або сума добутків середньо-групових ефективних доз на число осіб у відповідних групах, що утворюють колектив, для якого вона розраховується[16]:

$$S = \sum E_i N_i \quad (5.40)$$

де, E_i - середня ефективна (еквівалентна) доза на підгрупу населення, 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 контрзаходів 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[16].

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 взято за 50 років для дорослих – середня тривалість періоду професійної діяльності людини, і 70 років для дітей (E_{70}). Одиниця очікуваної еквівалентної дози – Зіверт [16,17].

Співвідношення між одиницями величин дози іонізуючого випромінювання наведені в табл. 5.1 [16,17].

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[16].

Таблиця 5.1. Співвідношення між одиницями величин дози іонізуючого випромінювання[16,17]

Величина, її позначення	Одиниця , позначення		Співвідношення між одиницями
	СІ	Позасисте мна	
Активність радіонуклідів, А	беккерель (Бк)	кюрі (Кі)	1 Кі = 3,7·10 ¹⁰ Бк
Експозиційна доза фотонного випромінювання, D_{exp}	кулон кілограм, (Кл/кг)	на рентген (Р)	$P = 2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг

Потужність експозиційної дози фотонного випромінювання, P_{exp}	ампер на кілограм, (А/кг)	рентген (Р)	$1\text{P/c}=2,58\cdot 10^{-4}\text{А/кг}$
Поглинена доза випромінювання, D	грей, (Гр)	рад (рад)	1 рад = 0,01 Гр
Потужність поглиненої дози випромінювання, P_{abs}	грей за секунду (Гр/с)	рад за секунду (рад/с)	1 рад/с = 0,01 Гр/с
Керма, К	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 дози випромінювання, H_T (Е)	зіверт за секунду, (Зв/с)	бер за секунду, (бер/с)	1 бер/с = 0,01Зв/с
Коллективна ефективна (еквівалентна) доза, D	людино-зіверт, (люд.-Зв)	людино-бер, (люд.-бер)	1 люд.-бер. = 0,01люд.-Зв

Основними методами виявлення іонізуючих випромінювань є:

1) іонізаційний, 2) сцинтиляційний, 3) люмінесцентний, 4) фотографічний, 5) хімічний, 6) калориметричний і 7) біологічний [16,17].

Суть іонізаційного методу полягає в тому, що під дією іонізуючих випромінювань відбувається іонізація опромінюваних об'єктів – повітря, води, твердих речовин, біологічних тканин тощо з утворенням позитивно і негативно заряджених іонів. Іони в лічильнику, що знаходиться під напругою, отримують направлений рух, утворюючи іонізаційний струм. Вимірюючи силу струму, можна отримати уяву про кількість (дозу) випромінювань, а вимірюючи імпульси струму, можна визначити інтенсивність випромінювання[42].

Детекторами для виявлення і вимірювання іонізації зазвичай служать іонізаційні камери, пропорційні лічильники, лічильники Гейгера-Мюллера і напівпровідникові лічильники[13].

Можливості використання цього типу детекторів визначаються їх робочими характеристиками та метою досліджень[13].

За принципом іонізаційного методу працюють прилади

дозиметричного контролю: дозиметри (ДК-02, ДКП-50-А, ИД-1, КИД-1-6, ДКС-04, ДКГ-08А "Скаут", ДКГ-01Д "Гарант", ДКГ-05Д, ДКС-АТ3509, ДКС-АТ3509А, ДКС-АТ3509В, ДКС-АТ3509С тощо); рентгенометри (ДП-5А,Б,В), ДКС-0,5, ДРГ-01-Т, "Белла", "Прип'ять" тощо); радіометри ("Тисс", ДП-100, КРБ-1, КРА-1, "Бета", КРК-1, УМФ-1500 тощо) [13].

Сцинтиляційний метод оснований на реєстрації фотонів видимого світла, що виникають при збудженні атомів деяких речовин – сцинтиляторів під дією випромінювання. Для виготовлення даного типу детекторів найчастіше використовуються кристали хімічно чистого NaI, активованого талієм [13].

Процес виявлення іонізуючого випромінювання відбувається в такій послідовності: γ -квант вибиває з кристала фотон, який потрапляє на фотокатод фотоелектричного помножувач (ФЕП) і, в свою чергу, вибиває з нього фотоелектрон. Фотоелектрон потрапляє на пластину - динод ФЕП і вибиває з неї до 10 електронів. Цей процес повторюється стільки разів, скільки пластин (динодів) має ФЕП. Так, при шести динодах ФЕП на виході отримують близько 1 млн. електронів (наприклад, ФЕП приладу СРП-68-01 має 14 динодів) [13].

За цим принципом працюють: рентгенометри (СРП-68-01, СРП-88); радіометри (РКБ4-1еМ, РЖС-05); гамма-спектрометри (АМ-А-02-Ф1,2,3, АИ-1024-9505, АИ-4096, МУЛЬТИРАД- гамма, СКС-99 "СПУТНИК", СЕБ-01-70, СЕГ-001 «АКП-С»-63, СЕГ-001м «АКП-С»-63, СЕБ-01-150 та інші); автоматичні гамма - і бета-лічильники ("Гамма-12", "Бета-2" тощо) [13].

Люмінесцентні методи виявлення іонізуючого випромінювання оснований на ефектах радіофотолюмінесценції і термолюмінесценції. При радіофотолюмінесценції під дією іонізуючих випромінювань в люмінофорах – фосфатних скельцях (NaI, ZnS, активованих сріблом) утворюються центри фотолюмінесценції. Під час дії на них ультрафіолетових променів виникає видима люмінесценція, інтенсивність якої спочатку пропорційна дозі 10^{-2} – 10^{-1} Гр, при дозі $3,5$ – 10^{-2} Гр досягає максимуму і при подальшому збільшенні дози – падає. Під дією ультрафіолетових променів центри люмінесценції руйнуються, що дає можливість проводити вимірювання дози багаторазово [13].

При радіотермолюмінесценції поглинута енергія випромінювання перетворюється в люмінесценцію лише під дією температури, а її інтенсивність пропорційна дозі випромінювання. Тому дозиметри даного типу можуть слугувати накопичувачами дози. Для запобігання втрати дози необхідно підібрати фосфатні скельця, які висвітлять її при температурі близько 400°C . За цим принципом працюють дозиметри ДПГ-02, ДПГ-03, ИКСА, DTU тощо [13].

Фотографічний метод оснований на вимірюванні ступеня потемніння фотоемульсії під впливом іонізуючих випромінювань. Якщо опромінити

фотоплівку в світлонепроникній касеті, то після її проявлення можна виявити помітне почорніння. Його ступінь в деякому діапазоні доз пропорційна експозиційній дозі. Опромінені плівки типу РМ-5-1, РМ-5-3 і РМ-5-4 дозволяють реєструвати γ -випромінювання в діапазоні експозиційних доз 0,02-2,0 Р, 0,3-12 Р, 0,01-50,0 Р відповідно. [13]

Перевагами фотографічного методу є можливість його масового використання для індивідуального контролю, документальна реєстрація отриманої дози та неприйнятність до ударів і різких змін температури.

Недоліки даного методу – низька чутливість до малих доз, неможливість спостереження за ходом накопичення дози безпосередньо в процесі опромінення, залежність результатів вимірювань від умов проявлення плівки.

Складність використання даного методу полягає в тому, що для визначення отриманої дози необхідно мати еталон, виготовлений з такого ж матеріалу як в дозиметрі, опроміненого відомою дозою і проявленого в аналогічних умовах. Це значить, що потрібне джерело іонізуючого випромінювання, яке може створювати контрольовану дозу.

Хімічний метод оснований на тому, що під дією іонізуючих випромінювань деякі речовини можуть перетворюватись на інші. Наприклад, при опроміненні хлороформу утворюється соляна кислота. Якщо взяти хлороформ, додати до нього індикатор соляної кислоти, то при наявності іонізуючих випромінювань його забарвлення починає змінюватись. Тому на корпус такого дозиметра можна наклеїти візуальну шкалу зміни забарвлення в залежності від дози опромінення. Це дає нам можливість спостерігати за ходом її накопичення в процесі опромінення. Визначення точного значення дози проводиться на приладах типу фотоелектрокалориметрів (ФЕК), відградуєваних в одиницях дози іонізуючого випромінювання, що її спричинили [13].

В теперішній час зазвичай користуються так званими “сухими” (“сліпими”) феросульфатними дозиметрами, для яких використовують насичений повітрям розчин FeSO_4 в розбавленій H_2SO_4 в діапазоні вимірювання дози 20-400 Гр. Для більш високих доз (10^3 - 10^5 Гр) використовують церієвий дозиметр (0,1 М розчин $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)$ в 0,4 М H_2SO_4). Але продовжують використовувати й хімічні дозиметри на основі хлороформу і чотирьох-хлористого вуглецю, не зважаючи на те, що при оцінці відносно малих доз вони дають більшу похибку [13].

Чутливість хімічних методів дозиметрії значно нижча, ніж іонізаційних, сцинтиляційних, люмінесцентних і фотографічних. Крім того, для реєстрації показників необхідні значні затрати часу [13].

Калориметричний метод оснований на тому, що під дією іонізуючих випромінювань в опромінюваних об'єктах підвищується температура. Наприклад, при опроміненні біологічного об'єкта дозою 1000 Р, температура його тіла підвищується не менш як на 0.001°C . Цей метод

використовується для вимірювання надзвичайно високих потужностей дози. Без нього було б неможливо слідкувати за ситуацією, що відбувається в ядерному реакторі.

Таким чином, кожний з перерахованих методів займає певне незамінне місце у виявленні іонізуючих випромінювань[13].

Біологічний метод дещо відрізняється від вищезгаданих, так як в його основі лежать біологічні зміни в клітинах, тканинах, органах живих організмів, що зумовлені дією іонізуючих випромінювань. Найбільш розповсюдженим є метод визначення кількості клітин з абераціями хромосом у лімфоцитах периферичної крові людини[13].

Аберації хромосом – це їх поломки, які можуть у невеликих кількостях (до 1-1,5%) виникати при звичайних поділах клітин, і які можуть виникати при дії деяких фізичних і хімічних чинників у кількостях, що у багато разів перевищують норму. Одним з таких чинників є іонізуюча радіація. І кількість аберацій, що виникають при її дії, чітко прямо пропорційна дозі опромінення[44].

Для визначення кількості клітин з абераціями хромосом у людини, яка була піддана дії іонізуючої радіації, звичайним методом відбирають кров з пальця чи іншого органу. На препараті під мікроскопом чітко видні лімфоцити – великі клітини, що діляться, а в мітозі – і окремі хромосоми. У певній фазі мітозу (звичайно метафазі чи анафазі), коли всі хромосоми відокремлені одна від одної, підраховують, кількість ушкоджених хромосом, визначаючи відсоток клітин з абераціями. Зрештою, на заздалегідь приготовлених в лабораторних умовах калібровочних кривих визначають, якій кількості абераційних клітин відповідає певна доза опромінення[44].

У зв'язку з тим, що калібровочна крива будується на основі усереднених даних, а кожна людина має індивідуальну радіочутливість, метод може давати певну похибку в оцінці дози. Проте у більшості випадків ця похибка не перевищує 20-30%. І вона буде тим менше, чим меншим буде час між опроміненням і аналізом крові[18,44].

Визначення кількості аберацій можливе і в інших клітинах організму – кістковому мозку, епітеліальних клітинах – в усіх, котрі діляться і тому мають високу радіочутливість. Проте коротко описаний тут є найбільш зручним[44].

За допомогою цього методу можна визначати і дозу опромінення тварин і навіть рослин. В останніх хромосомному аналізу піддаються клітини меристем – твірних тканин, клітини котрих діляться[44].

До біологічного методу дозиметрії належить і метод визначення кількості вільних радикалів в зубній емалі ссавці в, в тому числі і людини, та інших хребетних, хітинових покривах комах, черепашках моллюсків. Цей метод отримав назву «ретроспективного», так як він дозволяє визначити дозу, яка була отримала індивідумом протягом періоду індивідуального

розвитку - життя. І якщо в житті був інцидент, пов'язаний з одержанням великої дози, як, наприклад, при випробуваннях атомної зброї, аваріях на підприємствах ядерної енергетики, метод дозволяє виявити цей випадок. Саме за допомогою його у теперішній час оцінюють чи «переоцінюють», уточнюють дози, одержані військовими під час випробувань атомних бомб, ліквідаторами ядерних аварій і просто жителями забруднених радіонуклідами територій [18,44].

Залежно від призначення виділяють два класи приладів, що використовуються для вимірювання радіоактивності в навколишньому середовищі. Це дозиметри — прилади, призначені для вимірювання експозиційної дози або потужності дози рентгенівського, γ -випромінювання, поглиненої дози або потужності поглиненої дози іонізуючих випромінювань. Радіометри - прилади, призначені для визначення питомої активності об'єктів радіометричного контролю [18,44].

У будові цих приладів особливої різниці немає. Усі вони повинні мати детектор випромінювань тієї чи іншої системи. Як правило, іонізація атомів викликає невелике збудження системи. Тому акт іонізації потрібно підсилити і зареєструвати. І, безперечно, усі ці блоки приладу повинні бути забезпечені енергією (блок живлення) [44].

Дозиметри визначають поглинену дозу в одиницях Грей (рад), потужність поглиненої дози — у Гр/с (рад/с), експозиційну дозу — у Кл/кг (Р) і потужність експозиційної дози — у Кл/кг⁻³ (Р/с) [13].

Дозиметри використовують також для визначення інтенсивності випромінювання в одиницях Вт/м² (МеВ/см²). Радіометри визначають питому об'ємну, поверхневу або масову активність відповідно в Бк/м³ (Кі/л), Бк/м³ (Кі/см²), Бк/кг (Кі/кг) [13].

Переносні радіометри в основному використовують для визначення питомої активності поверхні ґрунту, будов, матеріалів і т.п. Стаціонарні радіометри використовують для визначення питомої масової або об'ємної активності ґрунту, рослинності, кормів, продуктів харчування, води [13].

Залежно від призначення дозиметри ділять на три групи [13]:

- Кишенькові прилади для іонізуючого дозиметричного контролю;
- Переносні прилади групового дозиметричного і радіаційно-технологічного контролю;
- Стаціонарні прилади для дозиметричного і радіаційно-технологічного контролю.

5. 9 Елементи радіоекології й радіаційної безпеки

Де б ми не знаходилися - на спекотному півдні або на далекій півночі, в долинах або високо в горах, на свіжому повітрі або в приміщенні, на відпочинку в санаторії або на роботі, оточені сучасною технікою, на пароплаві, в поїзді або в літаку - наше тіло постійно пронизує високоенергетичними фотонами і корпускулами іонізуючої радіації. Падаючи на організм ззовні, вони проникають в усі тканини і органи, де віддають свою енергію молекулам і структурам клітин[45].

У великій кількості вони зароджуються всередині нашого тіла від знаходяться в ньому радіоактивних речовин, і тоді ймовірність їх поглинання тканинами підвищується. Йдеться про високоенергетичних фотонах і частинках. Їх енергія у багато разів перевищує енергію будь-хімічного зв'язку в молекулі. Зіткнення таких частинок з молекулами нашого тіла - це, як правило, катастрофа для молекули: вона розпадається, змінює свою конфігурацію, втрачає одні властивості і набуває зовсім інші[44,45].

Розрахунки показують, що кожен секунду в організмі людини вагою в 70 кг в середньому відбувається близько 500 тис. таких молекулярних катастроф, 500 тис. зіткнень молекул з іонізуючими частинками, що супроводжуються тимчасовим або постійною зміною властивостей цих молекул[44].

Опромінення від природних джерел ні на хвилину не зупиняється: секунди, хвилини, години, дні, роки безперервно йде це мікробомбардування наших клітин. Її наслідки тільки за останні роки стають зрозумілими завдяки численним радіобіологічним дослідженням. І, як часто буває в науці, то, що здавалося очевидним ще кілька років тому, набуває нового освітлення в світлі отриманих фактів. Якщо в 40-х і навіть на початку 50-х років ХХст. вчені мали взагалі дуже невиразні уявлення щодо природного тла радіації, то тепер вже стало ясно, що його не можна ігнорувати, обговорюючи такі проблеми, як походження життя, еволюція, старіння, канцерогенез і багато іншого. Ми розрізняємо зовнішнє опромінення від джерел, розташованих поза організмом, і внутрішнє - від інкорпорованих, тобто включених в організм радіоактивних нуклідів. Зовнішнє опромінення складається з опромінення вторинними космічними променями, що досягають біосфери Землі, і випромінюваннями радіонуклідів, розсіяних в оточуючих нас земних породах і будівельних матеріалах[44,45].

Природні радіонукліди постійно залучаються до кругообігу речовин, який так характерний для живих організмів. Шляхи і ступінь їх проникнення в живі організми будуть залежати від природи радіонукліду. Радіоактивний ізотоп вуглецю C_{14} постійно утворюється у верхніх шарах атмосфери завдяки ядерної реакції космічних променів (нейтронів) з

азотом: $n + N_{14} \rightarrow p + C_{14}$. Окисляючи киснем або озоном, цей вуглець перетворюється на радіоактивну вуглекислоту: $C_{14} + O_2 \rightarrow C_{14}O_2$. Остання, рівномірно перемішуючись зі звичайною вуглекислотою (на що йде близько року), поглинається зеленими листками рослин в процесі фотосинтезу[44,45].

Добре відомо, що всі частини рослини будуються з продуктів фотосинтезу. Таким чином, вуглеводи, жири, білки та інші компоненти рослин, що містять вуглець, будуть слабо радіоактивні і, потрапляючи в якості їжі в організм тварини і людини, створюють постійно діючий невеликий рівень внутрішнього опромінення. Період напіврозпаду C_{14} дуже великий (5720 років), тому він існує тисячоліття на нашій планеті[44].

Значно більший внесок у сумарну активність вносить такий природний нуклід, як радіоактивний ізотоп калію K_{40} . У звичайному калії завжди міститься в дуже невеликій кількості (0,0118%) радіоактивний ізотоп K_{40} . Без калію не відбувається нормального розвитку організмів, без нього неможливе життя. Вміст калію строго регулюється як у тваринному, так і в рослинному організмі. Його концентрація в рослинах вище, ніж в живих тканинах. Існують спеціальні механізми, що працюють в біомембранах, які регулюють розподіл калію в організмі людини. Його вміст у еритроцитах крові досягає 460 мг%, в м'язах - 360 мг%, в головному мозку - 330 мг%. Калію мало в кістковій тканині (50 мг%) і значно менше в сироватці крові (20 мг%). У чоловічому організмі в порівнянні з жіночим його більше, особливо в період статевого дозрівання. Молодий, енергійно функціонуючий організм містить більше калію на 1 кг ваги, ніж старий. Ці дані отримані при обстеженні 859 осіб обох статей в камерах, що дозволяють враховувати рівень і спектр випромінювання всього тіла[44,45].

Уран, торій, радій повсюди поширені в земній корі. Як показали спеціальні експерименти, торій майже не засвоюється рослинами. Його зміст мізерно мало в збираному врожаї і в зеленій масі рослин, тому його можна не розглядати як внутрішній випромінювач в організмах рослин, тварин і людини. Інакше поведуться уран і радій. Солі урану з ґрунту надходять в рослину. Деякі види рослин активно концентрують уран. Було навіть запропоновано використовувати деякі види як своєрідні індикатори присутності урану в навколишньому середовищі[45].

Якщо при зовнішньому опроміненні враховувалося тільки γ -випромінювання, то при внутрішньому основну дію чинять α - і β -випромінювання, мають можливість діяти безпосередньо на життєво важливі тканини і органи людини. Більшість радіоактивних ізотопів накопичується в певних тканинах, що призводить до нерівномірного опромінення окремих частин організму[16].

Внутрішнє опромінення діє весь час, поки радіоактивні речовини знаходяться всередині організму. Дані радіобіологічних досліджень показують, що не всі органи і тканини людського організму мають однакову чутливістю до опромінення[16].

Основним фундаментом, на основі якого проводиться оцінка генетичного ризику опромінення людини, є аналіз природної (спонтанної) мутаційної мінливості. Знаючи рівень спонтанної мінливості людини можна зробити розрахунок, в якій мірі цей рівень може бути змінений після радіаційного впливу[18].

Мутаційні зміни в будь-якому з генів людини, які зміни в структурі будь-якої з хромосом призводять до онтогенезі людини до тих чи інших змін у його фенотипі. Ступінь зміни фенотипу залежить від важливості для реалізації тих чи інших функцій організму, залучених до мутагенезу генів, від масштабів порушення генетичного матеріалу і від характеру успадкування виникли мутаційних змін[18].

Важливо розглянути класифікацію генетичних змін з точки зору спостережуваних в результаті таких змін фенотипів - генетичних хвороб. В даний час всі генетичні хвороби людини, з огляду на механізми їх виникнення та характер успадкування, підрозділяють на Менделя, хромосомні, мультифакторіальні, генетичні хвороби соматичних клітин і хвороби генетичної несумісності матері і плоду[18].

У зв'язку з реалізацією міжнародної програми "Геном людини" і завдяки інтенсивному вивченню спадкових хвороб в клініках багатьох країн число відомих до січня 2000 р менделевських спадкових хвороб склало 11062. Слід підкреслити стрімкий прогрес в цій області, що свідчить про високу актуальність вивчення спадкових хвороб людини[18].

Відносно багатьох спадкових хвороб вивчена локалізація мутантних генів і проведено молекулярний аналіз продуктів таких генів. Більш ніж 6980 генів з добре відомою функцією локалізовані в специфічних сайтах різних хромосом людини. З іншого боку, картіровані в певних ділянках хромосом більш ніж 1100 клінічних хвороб[18].

Про існування тих чи інших генів ми дізнаємося, коли з'являється можливість вивчити мутації цих генів. Гени, що не мутують, не можуть бути вивчені. Зазвичай спонтанна частота мутацій окремих генів у людини становить від 10^{-4} до 10^{-6} на гамети за покоління. Необхідно відзначити, що спонтанна частота мутацій залежить від віку батьків, особливо від віку чоловіків[18].

Після великих досліджень, проведених А.Чейзелом в Угорщині особлива увага прикута до мультифакторіальних хвороб. Мультифакторіальні хвороби об'єднують в собі широкий клас хвороб, проти яких відомо, що вони мають генетичну компоненту, і в той же час ці хвороби не підлягають простому спадкоємству. Такі хвороби інтерпретуються як результат взаємодії великого числа факторів

генетичної природи і чинників навколишнього середовища. Більшість мультифакторіальні хвороб не підлягає класичним законам успадкування, тобто вони не є клінічними проявами дефектів одиночних генів. У той же час вони зустрічаються серед родичів хворих з більш високою частотою, ніж у загальній популяції. Однак ризик захворіти даної мультифакторіальної хворобою серед родичів варіює залежно від особливостей даної хвороби і може бути різним у різних сім'ях. Для більшості мультифакторіальних хвороб поки вкрай обмежені знання щодо залучених в генетичний контроль цих хвороб генів, їх числа, типу мутаційних змін і характеру впливають на прояв цих хвороб факторів навколишнього середовища. З урахуванням епідеміологічних проблем класифікації мультифакторних хвороб і проблем оцінки ризику появи таких хвороб при впливі мутагенів навколишнього середовища ця група хвороб може бути підрозділена на вроджені аномалії і звичайні (хронічні) мультифакторіальні хвороби[18].

В цілому, рівень природної мінливості у людини по всіх категоріях хвороб досить високий - він становить, принаймні, 70% різних генетичних відхилень від норми протягом 70 років життя людини, прийнятих умовно за середню тривалість життя людини. Іншими словами, більш ніж у 70% людей протягом їхнього життя проявляється хоча б одне генетично обумовлене відхилення від норми, що знижує тривалість життя людини в порівнянні з нормою, або заважає нормальній працездатності людини[18].

Радіаційний вплив від атомних електростанцій навряд чи збільшить природний рівень радіоактивності на нашій планеті. Для тривоги немає підстав, особливо при зіставленні користі від атомних електростанцій з їх незмірно малим впливом на радіоактивність навколишнього нас середовища. Всі підрахунки велися крупномасштабно: щодо всієї планети і людства на десятки років вперед. Природно, виникає питання: а чи не стикаємося ми з невидимими променями в повсякденному житті? Чи не створює людина навколо себе додаткові джерела радіації при тій чи іншій діяльності, не користуємося ми цими джерелами, часом не асоціюючи їх з дією атомної радіації[18]?

Розглянемо добре відомі рентгенівські діагностичні апарати, якими забезпечені всі поліклініки і з якими ми стикаємося при всіляких профілактичних обстеженнях, що проводяться в масовому масштабі серед населення. Статистика показує, що кількість осіб, що проходять рентгенівське обстеження, зростає з кожним роком на 5-15% в залежності від країни, рівня медичного обслуговування. Всі ми добре знаємо, яку величезну користь приносить сучасній медицині рентгенодіагностика. Людина захворіла. Лікар вбачає ознаки серйозного захворювання. Рентгенівське обстеження часто дає вирішальні дані, слідуючи яким лікар призначає лікування і рятує життя людині. У всіх цих випадках вже не важливо, яку дозу опромінення отримає хворий при тій чи іншій

процедурі. Йдеться про хворого людині, про ліквідацію безпосередньої загрози його здоров'ю, і в цій ситуації навряд чи доречно розглядати можливі віддалені наслідки від самої процедури опромінення[18].

Але за останнє десятиліття в медицині намітилася тенденція посиленого використання рентгенівських обстежень здорового населення, починаючи від школярів і призовників до армії і закінчуючи населенням зрілого віку - в порядку диспансеризації. Звичайно, лікарі і тут ставлять перед собою гуманні цілі: своєчасно виявити початок ще прихованої хвороби, щоб вчасно і з великим успіхом почати лікування. В результаті тисячі, сотні тисяч здорових людей проходять через рентгенівські кабінети. В ідеалі лікарі прагнуть такі обстеження проводити щорічно. В результаті загальна опромінення населення підвищується. Про які ж дози опромінення йдеться при медичних обстеженнях[18]?

Науковий комітет з вивчення дії атомної радіації при ООН ретельно вивчив це питання, і отримані висновки багатьох здивували. Виявилось, що на сьогоднішній день найбільшу дозу опромінення населення отримує саме від медичних обстежень. Підрахувавши загальну середню дозу опромінення для всього населення розвинених країн від різних джерел радіації, комітет виявив, що опромінення від силових реакторів навіть до 2000 р навряд чи перевищить 2 - 4% від природної радіації, від радіоактивних опадів 3 - 6%, а від медичних опромінь населення щорічно отримує дози, що досягають 20% природного фону[18].

В середньому медичні діагностичні «просвічування» рентгеном для населення розвинених країн (Англія, Японія, СРСР, США, Швеція та ін.) Становлять середню річну дозу, що дорівнює одній п'ятій частині природного фону радіації. Це, звичайно, в середньому дуже великі дози, зіставні з природним фоном, і навряд чи тут доречно говорити про будь-якої небезпеки. Проте, сучасна техніка дозволяє зменшити дозові навантаження при профілактичних оглядах, і це повинно бути використано. Значного зниження дози опромінення при рентгенівських обстеженнях можна досягти, удосконалюючи апаратуру, захист, підвищуючи чутливість реєструючих пристроїв і скорочуючи час опромінення[18].

Різні види іонізуючих випромінювань викликають у людини і тварин однотипне захворювання - променеву хворобу. Швидкість і характер прояву, а також глибина радіаційних уражень залежать від ряду факторів, зокрема, від поглиненої дози, її потужності, реактивності організму і, нарешті, від умов опромінення. В процесі дослідів на лабораторних тваринах при їх загальному опроміненні понад 100 рад було встановлено, що середня тривалість життя після опромінення залежить від поглиненої дози. При опроміненні порядку 100 рад у собак лише дещо скорочується тривалість життя; при опроміненні 100-150 рад відзначаються захворювання різної тяжкості, і тривалість життя тварини різко

скорочується. При опроміненні 1000-15000 рад настає загибель тварин на третю-четверту добу після впливу радіації, а при опроміненні понад 20 000 рад тварини гинуть кілька секунд після опромінення або під час опромінення - так звана смерть під променем (молекулярна смерть). Є спостереження, що показують, що при однакових поглинених дозах у випадках меншої потужності дози шкідлива дія випромінювання знижується. Це пов'язують з процесами відновлення пошкоджених тканин за час між сеансами опромінення. Однак багаторазові повторні опромінення при малій потужності опромінення також викликають захворювання. На підставі наявних статистичних даних про променевої хвороби у людини, а також на підставі результатів, отриманих на вищих ссавців, розроблені положення про гранично допустимих дозах радіації, тобто максимальних поглинених дозах, отримання яких не викликає помітних соматичних порушень в організмі людини. Такий дозою для людини в даний час є 0,1 бер на тиждень понад природного фону для осіб, що працюють з радіоактивними джерелами, 0,01 бер в тиждень для осіб, побічно що стикаються з такими, і 0,001 бер для всіх інших людей. Істотну роль в розвитку радіаційного ураження грають індивідуальні особливості організму[42,43].

Різні види випромінювань супроводжуються вивільненням різної кількості енергії і мають різну проникну здатність, тому вони надають неоднакове вплив на тканини живого організму. Альфа-випромінювання, яке являє собою потік важких часток, що складаються з протонів і нейтронів, затримується, наприклад, листом паперу і практично не здатне проникнути через зовнішній шар шкіри, утворений відмерлими клітинами. Тому воно не становить небезпеки до тих пір, поки радіоактивні речовини, що випускають альфа-частинки, не потраплять всередину організму через відкриту рану, з їжею або з вдихуванням повітрям; тоді вони стають надзвичайно небезпечними. Бета-випромінювання має більшу проникаючу здатність: воно проходить у тканини організму на глибину один-два сантиметри. Проникаюча здатність гамма-випромінювання, яке поширюється зі швидкістю світла, дуже велика: його може затримати лише товста свинцева або бетонна плита. Ушкоджень, викликаних в живому організмі випромінюванням, буде тим більше, чим більше енергії воно передасть тканинам; кількість такої переданої організму енергії називається дозою (цей термін спочатку ставився до дози лікарського препарату, тобто дозі, що йде на користь, а не на шкоду організму). Дозу випромінювання організм може одержати від будь-якого радіонукліда або їх суміші незалежно від того, перебувають вони поза організмом або всередині нього (в результаті попадання з їжею, водою або повітрям). Дози можна розраховувати по-різному. з урахуванням того, який розмір опроміненого ділянки і де він розташований, чи одна людина піддався опроміненню або група людей і протягом якого часу це відбувалося[30].

За все своє життя людина отримує дозу опромінення від природних джерел, і при нормальному стані середовища проживання таке опромінення не викликає яких-небудь змін в органах і тканинах людини.

Але по самій своїй природі радіація шкідлива для життя. Малі дози можуть "запустити" не до кінця ще встановлену ланцюг подій, що призводить до раку або до генетичних ушкоджень. При великих дозах радіація може руйнувати клітини, пошкоджувати тканини органів і стати причиною швидкої загибелі організму[16].

Ушкодження, викликані великими дозами опромінення, звичайно проявляються протягом декількох годин або днів. Ракові захворювання, проте, проявляються через багато років після опромінення, як правило, не раніше ніж через одне-два десятиліття. А вроджені вади розвитку та інші спадкові хвороби, викликані ушкодженням генетичного апарату, за визначенням проявляються лише в наступному або подальших поколіннях: це діти, онуки та більш віддалені нащадки індивідуума, що піддався опроміненню[16].

У той час як ідентифікація швидко виявлених ("гострих") наслідків від дії великих доз опромінення не складає труднощів, виявити віддалені наслідки від малих доз опромінення майже завжди виявляється дуже важко. Частково це пояснюється тим, що для їх виявлення повинно пройти дуже багато часу. Але навіть і виявивши якісь ефекти, потрібно ще довести, що вони пояснюються дією радіації, оскільки і рак, і пошкодження генетичного апарату можуть бути викликані не тільки радіацією, але і безліччю інших причин[16].

Щоб викликати гостре ураження організму, дози опромінення повинні перевищувати визначений рівень, але немає ніяких підстав вважати, що це правило діє у випадку таких наслідків, як рак або пошкодження генетичного апарату. Принаймні, теоретично для цього досить дуже малої дози. Однак у той же самий час ніяка доза опромінення не призводить до цих наслідків у всіх випадках. Навіть при відносно великих дозах опромінення далеко не всі люди приречені на ці хвороби: діючі в організмі людини репараційні механізми звичайно ліквідують всі пошкодження. Точно так само будь-яка людина, що піддався дії радіації, зовсім не обов'язково повинна захворіти на рак або стати носієм спадкових хвороб; проте вірогідність або ризик настання таких наслідків у нього більше, ніж у людини, який не був опромінений. І ризик цей тим більший, чим більша доза опромінення[16].

Зрозуміло, якщо одна доза опромінення досить велика, опромінена людина загине. У всякому разі, дуже великі дози опромінення близько 100 Гр викликають настільки серйозне ураження центральної нервової системи, 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 серйозним, щоб привести до

летального результату, однак опромінений людина, швидше за все, все одно помре через один-два тижні від крововиливів у 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 один-два місяці з моменту опромінення головним чином через руйнування клітин червоного кісткового мозку - головного компонента кровотворної системи організму: від дози в 3-5 Гр при опроміненні всього тіла помирає приблизно половина всіх опромінених[16,17].

Рак - найбільш серйозне з усіх наслідків опромінення людини при малих дозах. принаймні безпосередньо для тих людей, які зазнали опромінення. У самому справі, великі обстеження, що охопили близько 100 000 чоловік, які пережили атомні бомбардування Хіросіми і Нагасакі в 1945 році, показали, що поки рак є єдиною причиною підвищеної смертності в цій групі населення[17].

Проблема захисту людей від шкідливого, небезпечного діяння іонізуючої радіації розробляється вже давно. У 1905 р на першому конгресі німецьких рентгенологів було піднято питання про законодавчу охорону праці рентгенологів. У Радянському Союзі діяло санітарне законодавство, яке регламентує правила використання джерел іонізуючої радіації гігієни, що є науковим і методологічним центром з розробки проблем радіаційної гігієни.

Штучні джерела іонізуючої радіації, за оцінкою ООН з вивчення дії радіації, створюють в середньому за рік дози на статеві залози близько 40 мрад; в той час як від природних джерел ця доза дорівнює 100 мрад, тобто в 2,5 рази більше[17].

Таким чином, збільшення променевого впливу за рахунок штучних джерел радіації відносно невелике. З огляду ж на коливання природного фону радіації і здатність організму пристосовуватися до підвищення радіаційного фону в деяких межах, слід визнати такі зміни величини променевого впливу в достатній мірі безпечними для здоров'я. Однак необхідно відзначити, що ці дози - середні для всього населення. В окремих випадках можуть бути значні відхилення. Так якщо кожна людина в результаті використання іонізуючої радіації в терапевтичних цілях в середньому отримує 10 мрад в рік, то хворий, що піддається радіотерапії, може отримати тисячі і десятки тисяч радій[17].

Захист від внутрішнього опромінення полягає в усуненні безпосереднього контакту працюючих з радіоактивними речовинами і запобігання потрапляння їх в повітря робочої зони. Необхідно керуватися нормами радіаційної безпеки, в яких наведені категорії опромінюваних осіб, дозові межі і заходи щодо захисту, і санітарними правилами, які регламентують розміщення приміщень і установок, місце робіт, порядок отримання, обліку та зберігання джерел випромінювання, вимоги до

вентиляції, пилогазоочистка, знешкодження радіоактивних відходів та ін[1].

Всі живі організми, і людина в тому числі, постійно знаходяться в радіаційному полі малої інтенсивності. Наше тіло щосекунди протягом усього життя пронизує високоенергетичних квантами γ -радіації, бомбардується елементарними частинками високих енергій. Опромінення нашого організму зумовлене космічною радіацією, випромінюваннями радіонуклідів, розсіяних в оточуючих нас породах, водах і атмосфері, радіонуклідів, інкорпорованих в наші тканини і органи. Опромінення від природних джерел радіації збільшилася за останні десятиліття за рахунок використання авіатранспорту, випробувань ядерної зброї, введення в лад численних атомних електростанцій, широкого використання рентгенодіагностики в медицині, використання радіоізоотопів і електронних пристроїв в побуті. Дози опромінення, одержувані людиною від усіх цих джерел, невеликі. Для порівняння вкладів різних джерел в загальну усереднену дозу для всього населення Землі вони були зіставлені з природним фоном радіації, який був взятий за 100 мрад / рік[16,17].

Все живе на Землі піддається впливу безлічі хімічних і фізичних факторів, які діють одночасно з радіацією. Які будуть наслідки одночасної дії іонізуючої радіації і радіохвиль різних діапазонів, ультрафіолетових і інфрачервоних випромінювань? Як впливатиме радіація в жаркому кліматі на екваторі і при низьких температурах Крайньої Півночі? Чи буде проявлятися синергізм в мутагенну дію радіації при одночасному впливі хімічних мутагенів, з кожним днем все більше забруднюючих оточуючих нас середу? Як позначиться дію малих доз радіації в умовах великих промислових міст, в яких повітря забруднене вихлопними газами автомобілів, оксидами азоту і сірки хімічних заводів? Зараз немає даних для вичерпної відповіді на подібні питання, але все, що ми знаємо про явище синергізму, змушує з усією серйозністю поставитися до них і розгорнути дослідження в цьому напрямку[16,17].

Все це - захоплюючі і важливі завдання для наукового пошуку і постановки нових експериментів, для роздумів і роздумів. Це завдання, які покликані вирішувати заgonи молодих вчених, які зацікавилися областю «невидимих променів» навколо нас - областю, досліджуваної радіобіологією. Вирішення цих завдань дуже важливо для всього людства в сьогоденні і майбутньому[18].

Всі хімічні елементи складаються з атомів. Більшість атомів стабільно, що означає, що вони незмінні. Але деякі з найважчих атомів, що розпадаються і перетворюються в інші. Такий розпад називається радіоактивністю. Радіоактивність - аж ніяк не нове явище; новизна полягає лише в тому, як люди намагалися її використовувати. І радіоактивність, і супутні їй іонізуючі випромінювання існували задовго до зародження на ній життя і були присутні в космосі до виникнення самої Землі[16-18].

Кожен радіоактивний елемент при розпаді випускає певні промені з якоюсь частотою. Цю частоту неможливо ні прискорити, ні уповільнити ніяким способом. Деякі елементи розпадаються швидко, інші повільно, але в будь-якому випадку це явище не підвладне людині[16-18].

В ядрі присутні частинки, звані нейтронами, оскільки вони електрично нейтральні. Ядра атомів одного і того ж елемента завжди містять однакове число протонів, але число нейтронів у них може бути різним. Атоми, що мають ядра з однаковим числом протонів, але розрізняються числом нейтронів, що відносяться до різних різновидів одного і того ж хімічного елемента, називаються ізотопами даного елемента. Ядра всіх ізотопів хімічних елементів утворюють групу " нуклідів[34].

Деякі нукліди стабільні, тобто під час відсутності зовнішнього впливу ніколи не перетерплюють ніяких перетворень. Більшість нуклідів нестабільні, вони увесь час перетворюються в інші нукліди. В якості прикладу візьмемо атом урану-238, в ядрі якого протони і нейтрони ледь утримуються разом силами зчеплення. Час від часу з нього виривається компактна група з чотирьох часток: двох протонів і двох нейтронів (альфа-частинка). Уран-238 перетворюється у торій-234, в ядрі якого містяться 90 протонів і 144 нейтрона. Але торій-234 також нестабільний. Його перетворення відбувається, однак, не так, як у попередньому випадку: один з його нейтрон перетворюється на протон, і торій-234 перетворюється в протактиній-234, в ядрі якого містяться 91 протон і 143 нейтрона. Ця метаморфоза, що сталася в ядрі, позначається і на електронах, що рухаються по орбітах: один з них стає неспареним і вилітає з атома. Протактиній дуже нестабільний, і йому потрібно зовсім небагато часу на перетворення... Далі йдуть інші перетворення, що супроводжуються випромінюваннями, і вся ця ланцюжок в кінці кінців закінчується стабільним нуклідом свинцю. Існує багато таких ланцюжків мимовільних перетворень (розпадів) різних нуклідів за різними схемами перетворень та їх комбінаціями[34].

При кожному такому акті розпаду вивільняється енергія, яка і передається далі у вигляді випромінювання. Можна сказати, що випускаються ядром частки, що складається з двох протонів і двох нейтронів - це альфа-випромінювання; випущення електрона, як у випадку розпаду торію-234, - це бета-випромінювання. Часто нестабільний нуклід виявляється настільки збудженим, що випущення частинки не призводить до повного зняття збудження; тоді він викидає порцію чистої енергії, звану гамма-випромінюванням (гамма-квантом). Як і у випадку рентгенівських променів (багато в чому подібних гамма-випромінювання), при цьому не відбувається випущення яких-небудь часток[34].

Весь 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 протактинія в будь-якому радіоактивному джерелі розпадається за час, трохи більше хвилини, у той же час половина всіх атомів урану-238 перетвориться в торій-234 тільки за чотири з половиною мільярди років[34].

Основну частину опромінення населення земної кулі одержує від природних джерел радіації (рис.1). Більшість з них такі, що уникнути опромінення від них зовсім неможливо. Протягом всієї історії існування Землі різні види випромінювання падають на поверхню Землі з космосу і надходять від радіоактивних речовин, що знаходяться в земній корі, природна радіоактивність присутній в їжі і повітрі. Кожна людина більшою чи меншою мірою піддається впливу природного випромінювання, і для більшої частини населення це випромінювання є джерелом опромінення[16].

Опромінення від природних джерел радіації піддається будь-який житель Землі, проте одні з них одержують більші дози, ніж інші. Це залежить, зокрема, від того, де вони живуть. Нормальним для проживання людини вважається рівень гамма-фону в 20 мікрорентген в годину. Але це досить умовно, тому що в принципі нормувати природне випромінювання не можна. Воно залежить від конкретної місцевості, її рельєфу: в горах, наприклад, вище, ніж на рівнині. В деяких місцях земної кулі, там, де залягають особливо радіоактивні породи, рівень радіації виявляється значно вище середнього. Але багато людей живуть там, де звикли, і нічого з ними не трапляється. Верховинці, наприклад, живуть в умовах, де рівень природної радіації в два-три рази вище середнього, а довгожителів серед них більше. Десятки тисяч людей на Крайній Півночі харчуються в основному м'ясом північного оленя (карібу), в якому присутні в досить високій концентрації нукліди свинцю-210 і полонію-210. Ці ізотопи потрапляють в організм оленів узимку, коли вони харчуються лишайниками, у яких накопичуються обидва ізотопи. Дози внутрішнього опромінення людини від полонію-210 в цьому випадку можуть у 35 разів перевищувати середній рівень. А в іншій півкулі люди, що живуть в Західній Австралії в місцях з підвищеною концентрацією урану, отримують дози опромінення, які в 75 разів перевищують середній рівень, оскільки їдять м'ясо і нутрощі овець і кенгуру. Вищезазначені нукліди великою мірою концентруються в рибі і молюсках, тому люди, що споживають багато риби й інших дарунків моря, можуть одержати відносно високі дози опромінення

Доза опромінення залежить також і від способу життя людей. Природний радіаційний фон постійно змінюється внаслідок невгамовної діяльності людини, поширення технологій переробки природних продуктів, що містять радіонукліди[16-18].

Останнім часом стає актуальною проблема радону. Радон утворюється при природному радіоактивному розпаді радію практично всюди, в тому числі і в ґрунтових породах під будівлями, в підземних питних водах. Радон виділяється з будівельних матеріалів, які застосовуються в промисловому і цивільному будівництві. Оскільки радон є важким газом, концентрація його в побутових приміщеннях першого поверху та підвальних завжди вища[18].

Перш ніж потрапити в організм людини, радіоактивні речовини проходять по складних маршрутах у навколишньому середовищі, і це доводиться враховувати при оцінці доз опромінення, отриманих від якогось джерела[16-18].

Штучні радіонукліди утворюються в результаті людської діяльності. Випробування ядерної зброї - одне з найнебезпечніших джерел радіоактивного забруднення навколишнього середовища. При випробуванні ядерної зброї в атмосфері радіоактивні речовини потрапляють у верхні шари атмосфери, з яких вони повільно переносяться в нижні шари атмосфери і потім на землю. З моменту прийняття договору про обмеження випробувань ядерної зброї 1963 р. в атмосфері було проведено лише кілька випробувань, причому останнє відбулося в 1980 р. в державі, не підписав цей договір. Концентрація радіонуклідів, що утворилися при випробуванні ядерної зброї, в повітрі, дощової води та їжі помітно зменшилася у порівнянні з максимальними значеннями на початку 60-х років і в даний час знаходиться на найнижчих рівнях, зареєстрованих протягом всіх вимірювань, виконуваних з 1953 р[16-18].

Найбільший інтерес становлять радіонукліди, що створюють велику дозу опромінення, такі, як вуглець-14, стронцій-90 і цезій-137. Ці радіонукліди переносяться по харчових ланцюжках в їжу людини і, таким чином, призводять до дози внутрішнього опромінення, обумовленої в даний час головним чином вуглець-14. Відклади радіонуклідів, що випускають гамма-випромінювання, призводять до зовнішнього опромінення[34].

26 квітня 1986 р. різке перенапруження потужності в реакторі на Чорнобильській атомній електростанції (Україна) викликало вибух, в результаті якого протягом десяти днів в атмосферу було викинуто значну кількість радіонуклідів. Потрапивши в повітря, вони поширилися по всій Європі досягли 2 травня Великобританії, де сильний дощ в Північному Уельсі, Кембрії і Південно-Східній Шотландії призвів до підвищених відкладів радіонуклідів у цих районах[16].

Викиди радіонуклідів у навколишнє середовище відбуваються і при деяких процесах в неядерній промисловості. В результаті у більшій частини цих викидів спостерігаються незначні індивідуальні дози, які вносять невеликий внесок у колективну дозу. Проте одна галузь промисловості заслуговує уваги в цьому відношенні - це отримання

електрики на електростанціях, що працюють на кам'яному вугіллі. Опромінення відбувається як при вдиханні в повітря, так і при перенесенні цих радіонуклідів по харчових ланцюжках. Вугілля, подібно більшості інших природних матеріалів, містить незначні кількості первинних радіонуклідів. У процесі видобутку і переробки руди виділяється радон, та й самі добрива радіоактивні, і що містяться в них радіоізотопи проникають із ґрунту в харчові культури. Радіаційне забруднення в цьому випадку буває звичайно незначним, але підвищується, якщо добрива вносять в землю в рідкому вигляді або згодуюють худобі речовини, які містять фосфати. Такі речовини широко використовуються в якості кормових добавок, що може призвести до значного збільшення вмісту радіоактивності в молоці. Всі ці аспекти застосування фосфатів дають за рік очікувану колективну ефективну еквівалентну дозу, рівну приблизно 6000 чол-Зв. Медичні прилади. Радіонукліди надходять в організм людини при флюорографії, рентгенографії зуба, рентгеноскопії легень, радіоізотопних обстеженнях, променевої терапії. Інші джерела радіації - польоти в літаку, телевізор, комп'ютер, гранітні споруди[16].

Радіонукліди бувають як природного (їх порівняно мало), так і штучного походження. Останніх (для всіх елементів таблиці Менделєєва) фізики отримали вже понад 2000. Десятки видів подібних активних ядер утворюються під час роботи ядерних дослідних чи енергетичних реакторів[34].

До найголовніших характеристик радіонуклідів належать[16,34]:

- кількість Z протонів (заряд ядра), яка й визначає, ізотопом якого хімічного елементу є цей радіонуклід. Спираючись на дані хімії і знаючи Z , можна багато що сказати про хімічні властивості атомів з радіоактивними ядрами;
- кількість нейтронів N і атомне число A (загальна кількість частинок у радіоактивному ядрі). Ядра з однаковими Z і різними N (їх називають ізотопами) мають різну стійкість;
- види їх випромінювання та енергії частинок;
- час напіврозпаду T_m - кількість років (дів чи й годин), за які половина початкової кількості радіонуклідів розпадається з виділенням іонізуючого випромінювання.

Стойкість ядер тим вища, чим більший час напіврозпаду. Останній для різних нестійких ядер може дуже відрізнятись. Для одних час напіврозпаду може бути значно менший за секунду, для інших (як для урану чи торію) він може перевищувати мільярд років. У таблиці наведено деякі радіонукліди, які мають певне екологічне значення, а також зазначено періоди напіврозпаду і типи їх випромінювання. У цій таблиці значком (+) позначено випромінювання з малою енергією. Частинка з такою енергією до зупинки іонізує 500-1500 молекул живої речовини. Знак (++) відповідає більшій енергії й утворенню до 6 тис. пар іонів кожною частинкою з такою

енергією. А от для енергії (+++) кількість іонізованих молекул досягає 10 тис. і більше. Найбільшу енергію (++++) мають ачастинки, які до зупинки можуть створити аж 100 тис. пар іонів [34].

Якщо кількість іонізованих молекул безпосередньо свідчить про рівень шкідливості для живого певного випромінювання, то цього не можна сказати про його “довжину пробігу” (відстань гальмування). Відстань пробігу в м'яких тканинах людини ачастинок найменша (приблизно 30 мкм = 0,03 мм), кількість пошкоджених молекул найбільша. У β -частинок середня відстань пробігу становить 23 мм, у γ -променів 30-50 см. Якщо джерело іонізуючого випромінювання розташоване всередині нас, найбільшою буде шкода саме від α -частинок, у 10-12 разів меншою - від β -частинок і ще меншою (бо вони частково вилетять з нас, не поглинувшись) - від γ -променів.

Ситуація стає протилежною, якщо джерело випромінювання поза нами і віддалене на відстань кількох десятків сантиметрів чи 1-2 метри. Такий шар повітря майже не поглинає упроменів, вони стають найнебезпечнішими. Значно краще поглинаються β -частинки, інтенсивність потоку зменшується (помірна небезпека). Повітря не пропустить до нас α -частинок, виключаючи небезпеку з їхнього боку. Якщо джерело випромінювання розташоване на шкірі чи близько від неї, то мертві клітини верхнього шару (чи одяг) поглинають всі α -частинки (ті виявляються нешкідливими). Тіло поглинає майже всі β -частинки (найшкідливіші у цій ситуації) і значну частину γ -квантів (дещо менша шкідливість, ніж у β) [34].

Доведено, що багато радіонуклідів Земля успадкувала від залишків наднових зірок. Вибух однієї з них міг бути поштовхом до початку утворення Сонячної системи з хмари космічного пилу. З того віддаленого на мільярди років часу збереглися і не розпалися лише поодинокі види ретрорадіонуклідів: калій-40, уран-238, уран-235 і торій-232. Вони та продукти розпаду важких ядер і становлять більшість природних радіонуклідів, формують природне поле радіації.

Друга (менша) частина природних радіонуклідів з невеликою масою ядер безперервно народжується (переважно у верхній атмосфері) як продукти зіткнення потоку космічних частинок з ядрами атомів атмосфери і ґрунту (вуглець-14, тритій та інші). Їхній внесок у природний радіаційний фон незначний, та нехтувати його, звичайно, не можна. Їх мало, але вони належать до тих елементів, які входять до складу живої речовини. Тому вони легше, ніж важкі елементи, “вбудовуються” в молекули білків, ДНК і шкодять, наче диверсанти [16,34].

Таблиця 5.2. - Характеристики екологічно важливих радіонуклідів[34]

	Радіонукліди	Період піврозпаду	Тип випромінювання		
			α	β	γ
1	Тритій ($^3\text{H}_1$)	12,4 р.		+	
2	Вуглець-14 (C)	5569 р.		+	
3	Натрій-24 (Na)	15 год.		+++	+++
4	Фосфор-32 (P)	14,5 дн.		+++	
5	Сірка-35 (S)	87,1 дн.		+	
6	Аргон-41 (Ar)	2 год.		++	
7	Калій-40 (K)	1,3 млрд р.		++	++
8	Калій-42 (K)	12,4 год.		+++	++
9	Кальцій-45 (Ca)	160 дн.		++	
10	Марганець-54 (Mn)	300 дн.		++	++
11	Залізо-59 (Fe)	45 дн.		++	+++
12	Криптон-85 (Kr)	10 р.		+	
13	Стронцій-90 (Sr)	27,7 р.		++	
14	Ітрій-91 (Yt)	61 дн.		+++	++
15	Рутеній-106 (Ru)	1 р.		+	
16	Йод-131 (I)	8 дн.		++	++
17	Ксенон-133 (Xe)	5 дн.		+++	
18	Цезій-137 (Cs)	32 р.		++	+
19	Церій-144 (Ce)	285 дн.		++	+
20	Радон-222 (Rn)	3,8 дн.	++++		
21	Радій-226 (Ra)	1600 р.	++++		
22	Уран-238 (U)	4,5 млрд р.	++++		
23	Плутоній-239 (Pu)	24 000 р.	++++		++
24	Торій-232 (Th)	13,9 млрд р.	++++		

З усіх природних і штучних радіонуклідів до групи екологічно суттєвих увійшли [16,34]:

- ті, що є ізотопами “елементів життя”, члени групи елементів з малими і середніми масами ядер, з яких побудована жива речовина (в тому числі й тіло людини): 1-5, 7-11;
- продукти штучного поділу найважчих і нестійких ядер на дві частини близьких мас у процесі роботи всіх ядерних реакторів і під час випробування ядерної зброї: 13-15, 18, 19, 23. Вони потрапляють у довкілля під час ядерних вибухів у повітрі чи воді і внаслідок серйозних аварій на ядерних реакторах всіх видів і конструкцій (приклад вибух реактора на Чорнобильській АЕС у 1986р.);
- група радіоактивних інертних газів, які виділяють у повітря всі ядерні реактори у процесі їх нормальної роботи: 6, 7, 12. Не беруть участь у хімічних реакціях, не можуть увійти до складу живої речовини, але опромінюють наші тканини, коли потрапляють у легені разом з повітрям;

- група важких ретрорадіонуклідів (22, 24) та продуктів їх розпаду (20, 21), яким належить невелика частка природного фону радіації.

Іонізуючі випромінювання — це випромінювання (електор о- магнітні, корпускулярні), які при взаємодії з речовиною чи опосередковано спричинюють іонізацію і порушення її атомів та молекул. Атом будь-якого хімічного елемента складається з двох основних частин: позитивно зарядженого ядра і негативно заряджених електронів, які обертаються навколо нього по різних орбітах. Ядро атома має складну структуру, воно складається з позитивно заряджених частинок — протонів, які мають однакову масу, і електрично нейтральних нейтронів. Різновиди одного елемента, що мають різну атомну масу (через різну кількість нейтронів), але однаковий заряд атомних ядер і ідентичні хімічні властивості, дістали назву ізотопів, або нуклідів[34,42,43].

Фізичні властивості іонізуючих випромінювань наведено в таблиці 5.3[34,42,43].

Таблиця 5.3 Фізичні властивості іонізуючих випромінювань

Фізичні властивості	Вид випромінювання			
	Альфа	Бета	Гамма	Нейтрони
Енергія випромінювання, МеВ	1-10	0.1-2.0	0.1-20	0.05-10
Швидкість поширення у вакуумі, км/с	20000	$280 \cdot 10^3$	300000	$1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^6$
Довжина пробігу в повітрі	До 20 см	До 15 см	Сотні метрів	Сотні метрів
Довжина пробігу в тканинах	До 50 мкм	До 1 см	Десятки сантиметрів	Сантиметри - метри
Іонізуюча здатність	$(10-20) \cdot 10^3$ пар/мм	5-10 пар/мм	1 пар/см	Сотні-десятки тисяч пар/мм

Іонізуюче випромінювання, проходячи крізь речовину, витрачає свою енергію на іонізацію та збудження зустрічних атомів і поглинається цією речовиною. Енергію, витрачену зарядженою частинкою або фотоном електромагнітного випромінювання на одиницю довжини їх пробігу в речовині, називають лінійною передачею енергії (ЛПЕ). В системі СІ її виражають в джоулях на метр. В радіобіології частіше використовують спеціальні одиниці, що використовуються для вимірювання енергії іонізуючих випромінювань – електрон-вольти (еВ). Один електрон-вольт (1 еВ) відповідає енергії, яку отримує електрон в полі напруженістю 1 вольт. $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. Тому ЛПЕ виражають в кілоелектронвольтах

(кеВ, 10^3 еВ) на мікромметр шляху у воді (1 кеВ/мкм дорівнює 0,16 нДж/м) [16-18].

Довжина пробігу залежить від енергії фотонного випромінювання, заряду, маси і швидкості частинок; ця залежність різко збільшується із зниженням швидкості і збільшенням маси частинки[34].

Гамма - (γ -) випромінювання – це потік фотонів (квантів) електромагнітного випромінювання з енергією вище 100 кеВ[34].

Енергія γ -квантів, що випускаються ядрами після α -розпаду, звичайно не перевищує 5 МеВ, після електронного розпаду – 2,0-2,5 МеВ. При анігіляції античастинок вона складає 0,511 МеВ. В середньому енергія γ -випромінювання різних радіоактивних елементів коливається в діапазоні 0,1-3 МеВ і рідко досягає 10 МеВ[34].

γ -кванти з енергією до 1 МеВ утворюють випромінювання, яке назвали[34] м'яким, а з енергією більше 1 МеВ – жорстким випромінюванням. γ -кванти, за рідким винятком, утворюють лінійчатий спектр випромінювання, постійний для кожного елемента. Моноенергетичний спектр випромінювання мають тільки деякі γ -випромінюючі ізотопи тому звичайно вказують їх середню енергію (\bar{E}).

У зв'язку з тим, що ймовірність зустрічі γ -квантів з електронами атома мала, вони мають велику проникну здатність. В повітрі γ -кванти проходять шлях у декілька сотень метрів, в деревині – до 25 см, у свинці – до 5 см, в бетоні – до 10 см, у воді - десятки метрів, а живі організми вони пронизують наскрізь, являючи для них значну загрозу як джерело зовнішнього опромінення. ЛПЕ у воді γ -квантів з енергією 1,3 МеВ дорівнює 0,3 кеВ/мкм, а при енергії 0,25 МеВ вона становить 2 кеВ/мкм[16,34].

Рентгенівське випромінювання – це електромагнітне випромінювання, що складається з гальмівного та характеристичного випромінень, діапазон енергій яких коливається в межах 0,12-200,0 кеВ, що відповідає довжинам хвиль 50-0,01 нм. У спектрі електромагнітних хвиль вони межують з ультрафіолетовими променями, довжина яких складає 50-2000 нм[34].

Гальмівне випромінювання – це фотонне випромінювання з безперервним спектром, що виникає при зменшенні кінетичної енергії заряджених частинок (електрони з енергією більше 15 кеВ) внаслідок їх гальмування в полі ядра атома важких елементів. Основними джерелами рентгенівського випромінювання є рентгенівські апарати, що широко використовуються для проведення експериментів з рослинами та тваринами, а також у рентгенодіагностиці та радіаційній терапії. В рентгенівських апаратах є можливість регулювати енергію гальмівного випромінювання, яка залежить від напруги на аноді рентгенівської трубки, та інтенсивність випромінювання, що залежить від сили струму на катоді[34].

Джерелами гальмівного випромінювання можуть бути деякі радіоактивні ізотопи, β -частинки яких при гальмуванні їх в полі ядер атомів важких елементів перетворюються в імпульси гальмівного випромінювання, енергія яких дорівнює енергії β -частинок. Інтенсивність такого випромінювання значно нижча, ніж в рентгенівських апаратах[34].

Характеристичне випромінювання – це фотонне випромінювання з дискретним спектром, яке виникає при зміні енергетичного стану електронів атомів під впливом швидких електронів та β -частинок[34].

Поглинання енергії швидкого електрона електронними оболонками, наприклад атома вольфраму чи молібдену, з яких виготовлений анод рентгенівської трубки, призводить до вибивання одного з електронів його внутрішніх шарів за межі атома. При цьому відбувається іонізація атома. На місце електрона, вибитого з внутрішнього шару, негайно переходить електрон з більш віддалених від ядра шарів. Цей перехід супроводжується випромінюванням цілого ряду фотонів з різними значеннями енергії, характерними для кожного конкретного атома. Енергія цих фотонів може знаходитись у видимому спектрі, ультрафіолетовому та інфрачервоному спектрах в залежності від енергії частинок та порядкового номера елемента. Тому даний вид випромінювання називається характеристичним[34].

γ -кванти при проходженні через речовину втрачають енергію за рахунок трьох ефектів: фотоелектричного поглинання (фотоефект), комптонівського розсіювання (комптон-ефект) і утворення електрон-позитронних пар. Відносна величина кожного з цих ефектів залежить від атомного номера поглинаючого матеріалу та енергії фотона[34].

Ефект фотоелектричного поглинання відбувається при низьких енергіях γ -квантів, як правило до 10000 eV[34].

При фотоефекті γ -квант, вибиваючи електрон (частіше з K-шару), передає йому всю свою енергію і зникає, а електрон отримує енергію його енергію за мінусом енергії зв'язку електрона у атомі[34].

При більш високих енергіях γ -квантів (100-200 keV) спостерігається комптон-ефект, який ще має назву "комптонівське розсіювання". При цьому γ -кванти, вибиваючи електрони, передають їм лише якусь частину своєї енергії, після чого міняють напрямок руху, тобто розсіюються. Цей процес триває до того часу, доки γ -квант повністю не передасть свою енергію вибитому електрону і закінчується фотоефектом[34].

γ -кванти з енергією від 1,022 MeV до 20 MeV в речовині під дією сильного електричного поля біля ядра перетворюються на пару "електрон-позитрон". В даному випадку електромагнітне випромінювання перетворюється в корпускулярні частинки. Після чого пара "електрон-позитрон" зникає (анігілює), перетворюючись на два вторинних γ -кванти з енергією, рівною енергетичному еквіваленту маси спокою часток 0,511 MeV[34].

γ -випромінювання з енергією більше 20 MeV можуть взаємодіяти з ядрами атомів (ядерний ефект), але вірогідність цього дуже мала[34].

Взаємодія корпускулярних частинок з речовиною. Заряджені частинки, проходячи через речовину, поступово витрачають свою енергію на іонізацію, тобто відрив електрона від атома (іонізаційні витрати) та на збудження атомів і молекул (радіаційні втрати), які потім проявляються у вигляді гальмівного випромінювання[34].

Заряджені частинки різних видів але з однаковою енергією утворюють практично однакоvu кількість пар іонів (однакова повна іонізація).

Альфа (α) - випромінювання – це потік позитивно заряджених α -частинок або ядер атомів гелію. α -частинки складаються з двох протонів і двох нейтронів, мають подвійний позитивний заряд, атомну масу 4,003 а.о.м. ($6,664 \cdot 10^{-27}$ г), швидкість їх руху у вакуумі становить $9 \cdot 10^7$ км/с. Їх енергія коливається в діапазоні від 2 до 11 MeV. Енергетичний спектр α -частинок монохроматичний або близький до нього і є характерним для кожного α -випромінюючого елемента[34].

α -частинки випускають нестійкі ядра важких трансуранових елементів, які мають в періодичній системі Д.І. Менделєєва порядкові номери вище 82. Ядро при цьому втрачає два протони та два нейтрони і перетворюється на ядро іншого елемента, розміщеного на дві клітини ліворуч від материнського (α -розпад). Надлишкова енергія дочірнього ядра виділяється з γ -випромінюванням[34].

Пробіг α -частинки в речовині прямо пропорційний її енергії та обернено пропорційний густині речовини. Свою енергію α -частинки витрачають на іонізацію та збудження атомів середовища, утворюючи на 1 см шляху пробігу у повітрі 116000-254000 пар іонів. Щільність іонізації середовища різко збільшується наприкінці пробігу – виникає так званий пік Брегга. ЛПЕ α -частинок у воді складає до 260 кеВ/мкм. Довжина пробігу, який здійснюється α -частинкою до повної втрати енергії, досягає в повітрі 10 см, у воді та м'якій біологічній тканині – 0,10-0,15 мм. Втративши енергію α -частинка приєднує два електрони і перетворюється на атом гелію[34].

Бета (β) - випромінювання – це потік негативно заряджених електронів ядерного походження, які отримали назву β -частинки. β -частинки випускаються ядрами радіоактивних елементів при надлишку у їх ядрах нейтронів (електронний розпад). При цьому нейтрон перетворюється на протон з виділенням β -частинки і антинейтрино. При електронному розпаді утворюються дочірні продукти, що знаходяться в метастабільному стані і мають надлишок енергії, яка виділяється у вигляді γ -квантів. Розрізняють чисті β -випромінюючі радіоактивні елементи та змішані, при розпаді яких виділяються β -частинки та в 20-80% γ -кванти[34].

Маса β -частинки дорівнює масі електрона ($0,00548$ а.о.м. або $9,11 \cdot 10^{-28}$ г). Енергія β -частинок різних природних та штучних радіоактивних ізотопів має величезний діапазон: від $0,0015$ - $0,05$ МеВ (м'яке β -випромінювання) до 3 , рідше 12 МеВ (жорстке β -випромінювання). При електронному розпаді з ядра разом з β -частинкою виділяється антинейтрино і енергія зв'язку ядра розподіляється між ними довільно. Тому величина енергії β -частинок одного й того ж елемента неоднакова, їх енергетичний спектр суцільний, або безперервний. Середня енергія β -частинок в спектрі дорівнює приблизно $1/3$ їх максимальної енергії і позначається (\bar{E}_β)[34].

При взаємодії з середовищем β -частинка витрачає свою енергію на іонізацію та збудження зустрічних атомів (іонізаційні витрати енергії) та утворення гальмівного випромінювання (радіаційні витрати енергії), котрі збільшуються із збільшенням атомної маси опромінюваної речовини. Їх шлях в речовині звивистий, так як вони легко змінюють напрямок руху під впливом електричних полів зустрічних атомів[34].

Пробіг β -частинок досягає в повітрі 25 м, в біологічній тканині – $0,85$ см. Вони утворюють 50 - 100 пар іонів на 1 см шляху в повітрі. ЛПЕ β -частинок у воді з середньою енергією $0,4$ МеВ дорівнює $0,25$ кеВ/мкм, наприкінці пробігу вона збільшується до $0,70$ кеВ/мкм[34].

Довжина пробігу β -частинок (R_β) збільшується із збільшенням енергії.

β -частинки середніх енергій майже повністю поглинаються шаром алюмінію та оргсклом товщиною 5 мм. В зв'язку з розсіяним типом іонізації повного захисту при роботі з джерелами β -випромінювання не існує. При зовнішньому впливі великої кількості β -частинок можуть виникати β -опіки шкіри та листя рослин, пошкодження кришталіка ока. Особливо небезпечними стають вони при надходженні всередину організму[34].

5.9.1. Радіаційне забруднення, його джерела й об'єкти, заходи захисту.

В результаті діяльності людини в зовнішньому середовищі з'явилися штучні радіонукліди та джерела випромінювання. У природне середовище стали надходити у великих кількостях природні радіонукліди, які добувають із надр Землі разом з вугіллям, газом, нафтою, мінеральними добривами, будівельними матеріалами. Сюди відносяться геотермічні електростанції, що створюють в середньому викид близько 41014 Бк ізотопу ^{222}Rn на 1 ГВт виробленої електроенергії; фосфорні добрива, що містять ^{226}Ra і ^{238}U (до 70 Бк/кг в Кольському апатиті і 400 Бк/кг в фосфору); вугілля, спалюється в житлових будинках і електростанціях,

містить природні радіонукліди ^{40}K , ^{232}U і ^{238}U в рівновазі з їх продуктами розпаду. За останні кілька десятиліть людина створила кілька тисяч радіонуклідів і почав використовувати їх в наукових дослідженнях, в техніці, медичних цілях і ін. Це призводить до збільшення дози опромінення, одержуваної як окремими людьми, так і населенням в цілому[14,16].

В даний час основний внесок в дозу від джерел, створених людиною, вносить також радіоактивне опромінення при діагностиці і лікуванні. У розвинених країнах на кожну тисячу населення припадає від 300 до 900 таких обстежень на рік, не рахуючи масової флюорографії і рентгенологічних обстежень зубів[14].

Для дослідження різних процесів, що протікають в організмі і для діагностики пухлин використовуються також радіоізотопи, що вводяться в організм людини. У промислово розвинених країнах орієнтовно проводиться 10 - 40 обстежень на 1 млн. жителів в рік. Колективні ефективні еквівалентні дози становлять 20 чол-Зв на 1 млн. Жителів в Австралії і 150 чол-Зв в США.

Середня ефективна еквівалентна доза, одержувана від усіх джерел опромінення в медицині, в промислово розвинених країнах становить 1 мЗв на рік на кожного жителя, тобто приблизно половину середньої дози від природних джерел [14].

5.9.2. Ядерний цикл. Ядерний реактор. Безпечність АЕС. Аварія на ЧАЕС.

Радіологічні наслідки випробувань ядерної зброї визначаються кількістю випробувань, сумарними енерговиділенням і активністю осколківподілу, видами вибухів (повітряні, наземні, підводні, надводні, підземні) і геофізичними чинниками навколишнього середовища в період випробувань (район, метеобстановка, міграція радіонуклідів та ін.). Випробування ядерної зброї, які особливо інтенсивно проводилися в період 1954-1958 та 1961-1962 рр. стали однією з основних причин підвищення радіаційного фону Землі і, як наслідок цього, глобального підвищення доз зовнішнього внутрішнього опромінення населення[41].

У США, СРСР, Франції, Великобританії та Китаї в цілому проведено не менше 2060 випробувань атомних і термоядерних зарядів в атмосфері, під водою і в надрах Землі, з них безпосередньо в атмосфері 501 випробування. Випробування в атмосфері в СРСР були завершені в 1962 році, підземні вибухи на Семіпалатинському полігоні - в 1989 р, на Північному полігоні - в 1990 р Франція і Китай до останнього часу продовжували випробовувати ядерну зброю. За оцінками в другій половині 20-го століття за рахунок ядерних випробувань в зовнішнє середовище надійшло 1.811021 Бк продуктів ядерного ділення (ПЯД), з них на частку

атмосферних випробувань доводиться 99.84%. Поширення радіонуклідів набуло планетарних масштабів\

Продукти ядерного ділення (ПЯД) представляють собою складну суміш більш ніж 200 радіоактивних ізотопів 36 елементів (від цинку до гадолінію). Більшу частину активності складають короткоіснуючі радіонукліди. Так, через 7, через 49 і через 343 діб після вибуху активність ПЯД знижується відповідно в 10, 100 і 1000 разів у порівнянні з активністю через годину після вибуху. Крім ПЯД радіоактивне забруднення обумовлено радіонуклідами наведеної активності (^3H , ^{14}C , ^{28}Al , ^{24}Na , ^{56}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co і ін.) І нероздільний частиною урану і плутонію. Особливо велика роль наведеної активності при термоядерних вибухах [41].

При ядерних вибухах в атмосфері значна частина опадів (при наземних вибухах до 50%) випадає поблизу району випробувань. Частина радіоактивних речовин затримується в нижній частині атмосфери і під дією вітру переміщається на великі відстані, залишаючись приблизно на одній і тій же широті. Перебуваючи в повітрі приблизно місяць, радіоактивні речовини під час цього переміщення поступово випадають на Землю. Велика частина радіонуклідів викидається в стратосферу (на висоту 10-15 км), де відбувається їх глобальне розсіювання і в значній мірі розпад. Нераспавшогося радіонукліди випадають по всій поверхні Землі[41].

Джерелом опромінення, навколо якого ведуться найбільш інтенсивні суперечки, є атомні електростанції. Перевага атомної енергетики полягає в тому, що вона вимагає значно менших кількостей вихідної сировини і земельних площ, ніж теплові станції, не забруднює атмосферу димом і сажею. Небезпека полягає в можливості виникнення катастрофічних аварій реактора, а також в реально не вирішеній проблемі утилізації радіоактивних відходів і витоку в навколишнє середовище невеликої кількості радіоактивності[41].

До кінця 1984 р в 26 країнах працювало 345 ядерних реакторів, що виробляють електроенергію. Їх потужність становила 220 ГВт або 13% сумарної потужності всіх джерел електроенергії. До 1994 року в світі працювало 432 атомних реактора, їх сумарна потужність склала 340 ГВт. В процесі роботи ядерних реакторів в них накопичується величезна кількість продуктів ядерного ділення і трансуранових елементів[41].

В умовах нормальної експлуатації АЕС викиди радіонуклідів у зовнішнє середовище незначні і полягають в основному з радіонуклідів йоду і інертних радіоактивних газів (Xe , Cg), періоди напіврозпаду яких (за винятком ізотопу ^{85}kr) в основному не перевищують декількох діб. Ці нукліди утворюються в процесі розподілу урану і можуть проникати через мікротріщини в оболонках твелів (тепловиділяючі елементи, що містять в собі уран). Всієї дози опромінення, можливої в результаті викиду на

атомній станції і обумовленої короткоживущими ізотопами (йод, ІРГ), населення отримує протягом року після викиду, 98% - протягом 5 років. Майже вся доза припадає на людей, що живуть поблизу АЕС[41].

Найперша велика аварія на атомній електростанції сталася в штаті Онтаріо, Канада 12 грудня в 1952 році. В результаті перегріву і часткового розплавлення активної зони величезна кількість продуктів ділення потрапила в навколишнє середовище, а радіоактивно забруднена вода була скинута прямо на землю біля річки Оттава. В результаті витоку радіоактивних матеріалів з лабораторії з виробництва плутонію (Ліверпуль, Великобританія), захворіли на рак і загинули 39 осіб[41].

У 1969 році в Швейцарії на підземному ядерному реакторі стався значний витік радіації. У цьому ж році у Франції при перевантаженні палива на працюючому реакторі АЕС «Сант-Лаурен» помилково оператором в паливний канал була завантажена НЕ тепловиділяюча речовина. З цієї причини близько 50 кілограмів розплавленого палива потрапило всередину корпусу реактора і стався викид радіації в навколишнє середовище. Реактор зупинили на один рік[41].

На чехословацькій атомній електростанції в м. Ясловске-Богуніце відбулися відразу дві аварії в 1976 і 1977 роках. Перша аварія сталася через перевантаження палива, друга - при завантаженні ядерного палива на першому енергоблоці. Після цих аварій електростанція була закрита. В результаті збоїв в роботі обладнання і помилок операторів на другому енергоблоці атомної електростанції Three Vile Island в г.Харрісбург в США сталася найбільша аварія. Сталось розплавлення 53 відсотків активної зони реактора і в атмосферу потрапили радіоактивні гази - ксенон і йод. В сусідню річку було скинуто 185 кубометрів слаборадіоактивних вод, були евакуйовані 200 тисяч осіб з довколишніх районів. На атомній електростанції TVA Sequoyah стався витік 40 тис. літрів радіоактивних матеріалів[41].

У 1981 року за аварії на електростанції Tsugura в Японії різні дози радіації отримали 56 робочих, ще 278 працівників атомної електростанції отримали підвищену дозу радіоактивного опромінення при аварійно-відновлювальних роботах. Постраждали люди при пошкодженні контейнера з радіоактивними речовинами на електростанції Керг - McGee в США. Але, напевно, найстрашніша аварія сталася на атомній електростанції в Чорнобилі. В результаті двох потужних вибухів на четвертому блоці атомної електростанції зруйнувалися частина реакторного блоку і машинного залу.

Трагедія трапилася 26 квітня 1986 року. В навколишнє середовище було викинуто близько 190 тонн радіоактивних речовин. Різні дози радіоактивного зараження отримали десятки тисяч людей, багато з яких згодом стали інвалідами, відразу загинули 28 осіб (пожежні і працівники станції), понад 400 тисяч людей були евакуйовані з зони зараження.

Величезні території (понад 160 тис. Квадратних кілометрів) були піддані сильному радіоактивному зараженню[41].

Вважається, що ця аварія наймасштабніша в історії розвитку ядерної енергетики. Крім загибелі людей і забруднення навколишнього середовища країна втратила найбільшу енергостанція. На той момент вона дійсно була найбільшою в СРСР. В результаті виникла енергетична криза, яку довгий час не могли вирішити.

Ще дві аварії на Чорнобильській атомній електростанції відбулися в цьому ж році - пожежа на аварійному четвертому блоці і схід з рейок спецвагона з відпрацьованим ядерним паливом.

Аварія на АЕС Фукусіма-1 - велика радіаційна аварія (за заявою японських офіційних осіб - 7-го рівня за шкалою INES), що відбулася 11 березня 2011 року в результаті сильного в історії Японії землетрусу і наступного за ним цунамі. Землетрус і удар цунамі вивели з ладу зовнішні засоби електропостачання та резервні дизельні генератори, що стало причиною непрацездатності всіх систем нормального та аварійного охолодження і призвело до розплавлення активної зони реакторів на енергоблоках 1, 2 і 3 в перші дні розвитку аварії[41].

Ефекти впливу радіації на людину зазвичай поділяють на дві категорії:

Соматичні (тілесні) - виникають в організмі людини, який піддавався опроміненню. Генетичні - пов'язані з пошкодженням генетичного апарату і проявляються в наступному або подальших поколіннях: це діти, онуки та більш віддалені нащадки людини, яка зазнала опромінення[19].

Розрізняють порогові (детерміновані) і стохастичні ефекти. Перші виникають коли число клітин, які загинули в результаті опромінення, які втратили здатність відтворення або нормального функціонування, досягає критичного значення, при якому помітно порушуються функції уражених органів[16-18].

Хронічне опромінення слабше діє на живий організм в порівнянні з одноразовим опроміненням в тій же дозі, що пов'язано з постійно йдуть процесами відновлення радіаційних ушкоджень. Вважається, що приблизно 90% радіаційних ушкоджень відновлюється.

Стохастичні (ймовірні) ефекти, такі як злоякісні новоутворення, генетичні порушення, можуть виникати при будь-яких дозах опромінення. Зі збільшенням дози підвищується не складність цих ефектів, а ймовірність (ризик) їх появи[16-18].

5.9.3. Міграція радіонуклідів у атмосфері.

Радіоактивні речовини мігрують різними шляхами. Це основні фактори, що зумовлюють перерозподіл первинного радіоактивного забруднення територій.

Основними джерелами радіоактивного забруднення навколишнього середовища є [13]:

1. Індукування хімічних елементів космічним випромінюванням;
2. Ядерні вибухи та інші випробування, військова діяльність;
3. Теплові енергетичні станції;
4. Промислові комплекси з повним ядерним паливним циклом, атомна промисловість;
5. Неконтрольоване використання радіонуклідної сировини та матеріалів;
6. Добування радіоактивних руд;
7. Вулканічна діяльність планети;
8. Пожежі лісів, торфовищ тощо.

Звичайно ці джерела нерівномірні за потужністю забруднення, ізотопним і фазовим станом забруднювачів. Наприклад, космічне випромінювання – це іонізуюче випромінювання, що безперервно і вічно надходить на поверхню Землі зі світового простору. У результаті взаємодії первинного космічного випромінювання (нейтронів, фотонів) з ядрами атомів кисню, азоту, аргону атмосфери утворюються космогенні радіонукліди, що потім надходять на земну поверхню з атмосферними опадами. Ця група представлена 20 радіонуклідами з періодами напіврозпаду від 32 хвилин до $7,4 \cdot 10^5$ років [13].

Особливо велика кількість радіоактивних речовин виносяться в атмосферу при випробуваннях атомної та термоядерної зброї у повітрі. Це перше за значимістю джерело радіаційного забруднення навколишнього середовища. При ядерному зриві утворюється біля 250 ізотопів 35 елементів як безпосередньо “осколків” поділу ядер важких елементів, так і продуктів їх розпаду з періодами напіврозпаду від кількох секунд до мільйонів років. Більшість цих радіонуклідів здійснюють одночасно бета - і гама - випромінювання, деякі є джерелом бета або гама-випромінювання. При наземних і надземних випробуваннях радіоактивні частинки піднімаються на значну висоту, утворюючи своєрідні течії, що рухаються над Землею зі швидкістю до 200 км/год. Радіоактивна хмара, що утворюється при вибуху ядерної бомби, може за два тижні обійти всю Землю. небезпека для людей виникає тоді, коли радіоактивні частинки з атмосфери з опадами випадають на землю, а коли, де і в якій кількості вони випадуть після вибуху, точно передбачити неможливо. Частина радіоактивних продуктів випадає недалеко від місця випробування, певна частина їх затримується в тропосфері, підхоплюється вітром і переноситься на величезні відстані. Знаходячись у повітрі біля місяця, радіоактивні речовини під час цих переміщень поступово випадають на землю. Більша частина радіоактивних продуктів викидається в стратосферу на висоту понад 10-50 км. Там вони залишаються протягом багатьох місяців, повільно опускаючись і розсіюючись по всій поверхні

Землі[13].

У сучасних найдосконаліших ядерних пристроях коефіцієнт використання заряду становить близько 20%. Частина елементів заряду (урану, плутонію), які не вступили в реакцію, розпилюються силою вибуху на найдрібніші частинки, що містять атоми з властивостями вихідних радіонуклідів, створюють радіоактивні хмари і розносяться вітром на величезні території. У результаті реакції активації в районі вибуху виникає додаткове джерело радіоактивного забруднення[13].

На сьогодні нема жодного продукту біосфери, де б не були присутні радіонукліди “бомбового” походження. Середня ефективна еквівалентна доза опромінення, зумовлена радіонуклідами ядерних випробувань становить біля 20-25 нкЗв за рік. Значні надходження радіонуклідів до навколишнього середовища становлять від використання кам’яного вугілля на паливо. Річна потреба вугілля у світі становить кілька мільярдів тонн, із яких 70% спалюється на електростанціях, 20% - у коксохімічному виробництві і 10% - використовується для опалення житла[13].

У складі кам’яного вугілля, як і в інших земних породах, містяться природні радіонукліди.

Розміри радіоактивного забруднення атмосфери при спалюванні вугілля залежить від ряду факторів: вмісту радіоактивних ізотопів у використуваному вугіллі, кількості спалюваного вугілля, технології спалювання, ефективності систем утримування попелу та інших продуктів горіння. Наприклад, за умови існуючих технологій очищення до атмосфери надходить до 10% утвореного леткого попелу[13].

На всіх етапах замкненого ядерного паливного циклу, починаючи з видобутку уранової сировини, її збагачення і закінчуючи переробкою відпрацьованого палива, захоронення високоактивних відходів, відбувається вивільнення штучних радіонуклідів у навколишнє середовище, а також прискорення темпів міграції важких природних радіонуклідів[41].

Нині атомна енергетика розвивається в основному для виробництва електроенергії, частка якої в загальному споживанні енергоресурсів становить близько 20%, а в деяких країнах – до 80%, в Україні – до 40%[41].

Масштаби і інтенсивність міграції радіонуклідів в атмосфері визначаються наступним: ефективною висотою викидів їх в атмосферу, фазовим станом викидів, формою і дисперсністю частинок аерозолі, географічними координатами місця викиду, атмосферними умовами[13].

Залежно від впливу цих факторів виділяють локальні, тропосферні (нижній шар атмосфери висотою до 8-10 км) і стратосферні (шар атмосфери, що лежить над тропосферою від 10 до 80 км) – глобальні випадіння[13].

Локальні випадіння спостерігають у районі до кількох сотень

кілометрів від джерела. Радіоактивні речовини локальних випадань поширюються в нижніх шарах атмосфери. Тривалість випадання залежить від пори року і широти місцевості[13].

Тропосферні випадіння спостерігаються при ядерних вибухах і великих аваріях на АЕС. Вибухи, потужністю в кілька кіловат тротилового еквіваленту, забруднюють в основному тропосферу. Могутні вибухи, мегатонної потужності, забруднюють стратосферу[41].

Умовно забруднення території України, Білорусі і Росії розбивають на чотири “сліди”: західний, північний, південний та північно-східний. Найбільш складний характер радіоактивного забруднення як за інтенсивністю, так і за складом основних нуклідів спостерігається на шляхах західного, північно -східного та південного слідів, що охоплюють практично повністю територію Українського Полісся та значні території на південь від Києва[41].

Отже, шляхи міграції можна поділити на такі[13]:

- ареальне випадання з атмосфери (сухе і вологе);
- водні міграції;
- поверхневими та внутрішньо-грунтовими стоками;
- у процесі повторного перерозподілу внаслідок руху повітря;
- антропогенний;
- життєдіяльність різних живих систем.

5.9.4. Міграція радіонуклідів у водоймах.

У воду рік, які беруть початок у горах, радіонукліди можуть потрапляти з гірських порід, що в різних кількостях містять радіоактивні елементи та продукти їх розпаду (уран, торій, калій-40, радон тощо). Радіоактивність поверхневих вод завжди значно нижча, ніж підземних. Найбільше урану, радію, торію міститься в підземних водах уранових покладів. Зі збільшенням глибини підземних водних джерел концентрація радіонуклідів в них підвищується[13].

У воді підземних джерел, що використовується для пиття людиною і тваринами, допускається вміст радіонуклідів тільки природного походження і в кількості, що не перевищує максимально допустимі норми для відкритих водойм[13].

У воду можуть потрапляти радіонукліди штучного походження, що потрапляють з атмосфери, з дощовими і талими водами, з відходами атомних реакторів, з підприємств радіохімічної промисловості і різних інших, що застосовують радіоізотопи.

Гідробіонти (мікро - і макроорганізми) накопичують і депонують в собі радіонукліди. Тому споживання води, що містить значний вміст гідро біонтів та мулу зростає можливість радіаційного ураження тварин і людини, які споживають воду що містить багато мулу і гідро біонтів[13].

Радіоактивні речовини до водойм можуть потрапляти з атмосфери, з ґрунту, через змиви та скиди.

Міграція радіонуклідів у водоймах забезпечується течіями, зоогідробіонтами, які поїдають фітогідробіонтів забруднених радіонуклідами. Певне місце нині має використання забрудненої води для зрошування у сільському господарстві та промисловості. Особливо значна міграція радіонуклідів здійснюється у водоймах текучих. У водоймах можуть зустрічатися тритій, цезій, цирконій, стронцій тощо[13].

Радіонукліди накопичуються у поверхневому шарі води. Так, у водосховищах у поверхневому шарі концентрація радіоізотопів може доходити до 370 мБк/л, а в товщі води – 185 мБк/л. Станом на 1965-1966 роки у водах Тихого океану концентрація стронцію-90 у поверхневому шарі води спостерігалась у 1,5 вищою, ніж на глибині 1000 м[13].

Природним фактором самоочищення водойм є мікроорганізми. Це встановлено в дослідженнях, проведених на Байкалі.

У ґрунті дна водойм концентрація радіонуклідів у десятки разів вища, ніж у воді, внаслідок їх адсорбції на поверхні мінеральних і органічних речовин. Тому гідробіонти, які ведуть бентозний (донний) або прибентозний спосіб життя, уражаються від радіаційного забруднення більшою мірою, ніж пелагічні (ті, які живуть у товщі води). У залежності від інтенсивності опромінення радіація може здійснювати на гідробіонтів стимулюючий, пригнічуючий, ушкоджуючий або летальний вплив[13].

Як правило, з підвищенням рівня організації гідробіонтів, їх радіочутливість зростає. Найбільш стійкі до радіації бактерії. Деякі з них витримують опромінення понад 1 млн Рентген. Водні рослини більш стійкі до опромінення, ніж тварини[13].

Доза радіації, що обумовлює загибель 50% опромінених протягом 30 днів організмів наступна[13]:

- для водних рослин – 0,1...0,5 Гр;
- для безхребетних – 0,01...2 Гр;
- для риб – 5...40 Гр (при високих температурах радіочутливість риб значно зростає);
- для вторинноводних ссавців – 2...5 Гр.

5.9.5. Розподіл радіонуклідів у морській екосистемі.

Роль морів і океанів у підтриманні стабільності всієї біосфери величезна. Для розуміння цієї ролі розглянемо явище транспортування радіонуклідів, трейсерів (міток) чи маркерів, що характеризують екосистеми.

Найбільші надходження радіонуклідів у моря й океани були під час випробувань ядерної зброї в 1950-1960 рр. Додаткове локальне забруднення морських екосистем відбувається від скидань і викидів

ядерних реакторів, заводів із виробництва ядерного палива, від захоронення у морях радіоактивних відходів, аварій та ін. Природні радіонукліди потрапляють у моря внаслідок ерозії гірських порід[13].

Більшість ядерних військових випробувань проводилися на континентальному шельфі й островах Тихого океану в 1946-1962 рр. Так, Велика Британія провела кілька ядерних випробувань на Тихому океані в 1952-1958 рр., Росія проводила ядерні випробування на полігонах у полярних морях біля Кольського півострова і на Новій Землі[13].

Ядерні випробування у Тихому океані призвели до локальних радіонуклідних забруднень. Дослідники вважають, що внаслідок таких випробувань у океані і моря випало більше радіонуклідів, ніж на сушу. Частина радіонуклідів, що випали на сушу, потрапляє в океан через вітровий і поверхневий стоки[13].

Найважливішою складовою поверхневого стоку радіонуклідів у морські екосистеми є стік рік. Так, стік Дніпра є визначальним в оцінці депонування радіонуклідів, зумовлених Чорнобильською аварією, в Чорному морі й Світовому океані. За проведеними оцінками активність стоку радіонуклідів у Чорне море становить $(185-740) \cdot 10^{10}$ Бк (50-200 Ки) на рік[13].

У морській воді містяться також природні радіонукліди. Це насамперед калій-40, уран, торій, радій і рубідій. Штучні радіонукліди представлені продуктами поділу урану і радіонуклідами, що утворилися зі стабільних елементів після активації нейтронами[13].

Інший важливий чинник міграції радіонуклідів у морях і океанах - хімічний склад води. Встановлено, що вміст Н, О, Na, Cl досягає 10-19 г/л, а К і Са - 380-400 мкг (у прісній воді їх вміст становить близько 10-8 г). Унаслідок цього прісноводні організми, у тому числі риби, поглинають значно більше Cs-137 і Sr-90, ніж морські[13].

Інша причина меншого накопичення цих радіонуклідів у морських організмах полягає в тому, що море, на відміну від прісноводних водоймищ, містить величезний об'єм води для розведення радіонуклідів. Радіонукліди Cs-137 і Sr-90 у морській воді містяться в розчинній формі й унаслідок високої концентрації хімічних аналогів (носіїв) у незначній кількості входять до складу морської біоти. У відкритому океані, де мала кількість біоти, радіонукліди перерозподіляються між водою та різними суспензіями. Дослідження розподілу радіонуклідів за глибиною показали, що значна частина радіонуклідів міститься на глибині менш ніж 100 м, а решта - до 1000 м[13].

Біота також впливає на міграцію радіонуклідів. Ступінь біотичного впливу залежить від радіонуклідів та інших чинників середовища. Так, планктон і вищі організми накопичують радіонукліди в значній кількості і захоронюють їх завдяки екскреції. Популяції малих організмів, наприклад фітопланктон, для якого характерні швидкі процеси обміну, переносять

значні кількості радіонуклідів у глибокі шари води й у седименти після відмирання[13].

5.9.6. Міграція радіонуклідів у ґрунті.

Основним приймачем радіоактивних опадів на Землі є ґрунт. Але ґрунт значною мірою вкритий рослинами, сумарна площа листя може в багато разів перевищувати площу ґрунту, на якій вони ростуть.

Якщо радіоактивні речовини вже потрапили в атмосферу, то зменшити у великих масштабах їхнє випадання на ґрунт і рослини неможливо.

Незалежно від типу ґрунту велика кількість нуклідів затримується у верхній частині ґрунтового профілю (0-10 см). Вміст радіонуклідів поступово зменшується з глибиною.

Міграція радіонуклідів у ґрунті залежить від хімічних властивостей радіоактивних елементів, стану та форми їх розміщення: дифузія в ґрунтовому розчині та перенесення з гравітаційною течією води. Під час конвективного перенесення вологи радіонукліди мігрують у ґрунті не лише в розчиненому стані, але й у стані твердої форми[13].

Міграція радіонуклідів у ґрунті може здійснюватися поверхневими та ґрунтовими стоками води, процесами дефляції (перенесення ґрунтових мас водою), вітрової ерозії (перенесення ґрунтових мас вітром), тваринами. Певне місце у цьому має і антропогенний фактор, зокрема, сільськогосподарська, транспортна, будівнича, вугільно - та рудно-добувна діяльність тощо[13].

Рослинний покрив і тварини є важливим регулюючим фактором перерозподілу радіонуклідів у ґрунті. Є повідомлення про те, що, наприклад, рапс підіймає радіонукліди глибини на поверхню ґрунту, здійснюючи якби вертикальну міграцію радіонуклідів у ґрунті.

Певною мірою міграція радіонуклідів залежить і від типу ґрунту, а також ізотопного складу радіоактивних частинок, рельєфу. Так, радіонукліди, як і більшість елементів мінерального живлення рослин, мають підвищену рухливість і здатність надходити в рослини у кислому середовищі. Ґрунти Полісся належать до кислих і слабокислих (рН = 3,5 - 6) [13].

За певних умов вітром можуть підійматися радіоактивні частинки з ґрунту у повітря й осідати на ґрунт, рослини, водойми уже в іншому місці. Вони можуть змиватися з поверхні ґрунту дощовим й талими водами з площ водозборів у водойми, забруднюючи їх додатково.

Із рештками рослин, відходами тваринництва радіоактивні речовини знову потрапляють у ґрунт і знову починають свій шлях ланцюгами живлення.

5.9.7. Міграція радіонуклідів в лісі.

Серед природно-кліматичних зон ліс є такою, що найбільшою мірою накопичує радіонукліди, окрім того, ліс найдовше їх утримує. Найінтенсивніше радіонукліди накопичуються в ростучих частинах організму рослин і тварин. Так, у рослин до таких частин відносяться листя, плоди, ягоди, молоді пагони, внутрішня частина кори, колючки, а найменше радіонуклідів у деревині[13].

Рослини є основними переносниками радіоактивних речовин з ґрунту в організм тварин і людини. Хоча на переході ґрунт – рослина можна досить істотно впливати на нагромадження радіоактивних речовин сільськогосподарськими рослинами. Радіонукліди надходять у рослини тоді, коли вони переходять у ґрунтові розчини. Цей процес, як і взагалі рухомість речовин, прискорюється у кислому середовищі[13].

Радіоактивне забруднення продукції рослинництва залежить не тільки від ступеня забруднення ґрунту, але й від його здатності до зв'язування і утримування радіонуклідів. Ця здатність визначається фізико-хімічними та агрохімічними властивостями ґрунтів. Наприклад, на Поліссі вона найслабкіша, значно вища – у сірих лісових, ще вища - у чорноземів Лісостепу[13].

Накопичення радіонуклідів залежить також від фітомаси. Так, завжди радіонуклідів більше в наземній частині рослини, а серед наземної – в ягодах, плодах. Щодо тварин, то їх найбільше в шерсті, шкірі, червоному кістковому мозку, у паренхімі залоз внутрішньої секреції[13].

Накопичення радіонуклідів проходить інтенсивніше в умовах вологого клімату. Кількість опадів, вологість ґрунту впливають на міграцію радіонуклідів.

Міграція радіонуклідів повною мірою відповідає закону В.І. Вернадського про біогенну міграцію атомів, що формулюється так: міграція хімічних елементів на земній поверхні і в біосфері в цілому здійснюється або при безпосередній участі живої речовини (біогенна міграція), або ж протікає у середовищі, геохімічні особливості якого зумовлені живою речовиною, як тією, яка нині населяє біосферу, так і тією, яка діяла на Землі протягом всієї геологічної історії. Цей закон з особливою силою проявляється на такій природній арені, до якої відноситься ліс[13].

Особливе місце в екосистемі лісу займають гриби. Внесок грибів у біологічний кругообіг ^{137}Cs у кілька разів перевищує внесок деревного і трав'янисто-чагарникового ярусу. Гриби є одним із головних факторів, що визначають роль підстилки як біохімічного бар'єру на шляху вертикальної міграції радіонуклідів у лісових екосистемах[13].

Значну небезпеку в перерозподілі радіоактивних частинок становлять лісові пожежі, внаслідок яких різко знижується радіомісткість

лісових екосистем, оскільки радіоактивні частинки у складі аерозолів і газоподібних сполук виносяться в повітря. Згідно із загальноприйнятою класифікацією лісових пожеж (верхові, низові, підземні) найбільше радіонуклідів виносяться за межі лісового біогеоценозу при верховій стійкій пожежі. При підземних пожежах на торфовищах, коли торф вигоряє повністю, всі радіонукліди, що містяться в ньому, можуть перейти в аерозольний стан. При низових пожежах горить сухий ґрунтовий покрив, при цьому вивільнюється 5-20% загального запасу радіонуклідів лісового масиву. Лісові пожежі порушують надійне депонування радіоактивних частинок у лісових екосистемах і призводять до перерозподілу первинного радіозабруднення території[13].

Біоіндикатором забруднення рослин є реакція на них бджіл.