

ТЕМА 1. РАДІОБІОЛОГІЯ ЯК НАУКА. ПРЕДМЕТ, ЗАВДАННЯ, ІСТОРІЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

1.1. *Визначення радіобіології як науки. Зв'язок радіобіології з іншими науками.*

1.2. *Загальна радіобіологія та радіоекологія.*

1.3. *Коротка історія радіобіології.*

1.4. *Основні методи дослідження в радіобіології.*

1.1. *Визначення радіобіології як науки*

Радіобіологія – це наука, що вивчає дію іонізуючих випромінювань на біологічні системи різних рівнів організації, в тому числі на живі організми та їх угруповання.

Із визначення очевидно, що коло конкретних об'єктів, на яких досліджуються механізми впливу іонізуючих випромінювань, надзвичайно широке. Радіобіологія досліджує реакції на опромінення будь-яких біологічних об'єктів – вірусів, бактеріофагів, клітинних органел, клітин, тканин, багатоклітинних організмів тваринного й рослинного світу, людини, видових популяцій, угруповань організмів і біосфери в цілому, а також вивчає механізми процесів, які спричиняють формування радіобіологічної відповіді клітини. Ці процеси відбуваються на різних рівнях: взаємодія фотонів або частинок іонізуючих випромінювань з атомами й молекулами, формування активних форм молекул, ушкодження біологічно важливих макромолекул, індуковані іонізуючим випромінюванням процеси в ядрі клітини, в мембранних системах, інших ультраструктурах клітини, в клітинних популяціях, у складних організмах, у видових популяціях, в екосистемах.

Головним завданням радіобіології є вивчення загальних закономірностей біологічної дії іонізуючих випромінювань на організм з метою оволодіння управлінням його реакціями на опромінення.

Практичне значення наукових проблем, що вивчає радіобіологія, полягає в захисті від дії іонізуючого випромінювання, а також розроблення шляхів використання іонізуючих випромінювань в медицині, сільському господарстві та інших сферах народного господарства.

Відповідно до рівнів досліджуваних систем у радіобіології виділяють розділи, які набули рис самостійних наук із властивими для них методологією досліджень, системою понять і логікою теоретичного аналізу досліджуваних явищ.

До групи розділів, що вивчають процеси індуковані під впливом іонізуючих випромінювань на різних рівнях організації біологічних систем належать: радіаційна біофізика, радіаційна хімія, біохімія, молекулярна радіобіологія, радіаційна мембранологія, клітинна радіобіологія, радіаційна цитогенетика, радіобіологія клітинних популяцій, радіаційна генетика.

З метою вивчення видоспецифічності дії іонізуючого випромінювання із переходом на вищі рівні організації процесів, дістали розвиток розділи радіобіології, що вивчають радіобіологічні реакції представників царств живої природи, а саме: радіаційна вірусологія, радіаційна мікробіологія, радіобіологія

найпростіших, радіобіологія безхребетних, радіобіологія комах, радіобіологія рослин та тварин.

Радіаційна біофізика досліджує процеси взаємодії іонізуючого випромінювання з речовинами клітини: збудження електронів, іонізація молекул, внутрішньо-молекулярна міграція електронно-збудженого стану. Тобто радіаційна біофізика займається вивченням механізмів біологічної дії іонізуючих випромінювань.

Радіаційна хімія досліджує властивості хімічних форм, що виникають унаслідок взаємодії іонізуючих випромінювань із речовинами, особливості їх хімічних перетворень. Із застосуванням відповідних методів хімії й хімічної фізики вивчаються хімічні реакції, що відбуваються за участю індукованих опроміненням активних хімічних форм молекул (збуджені або іонізовані молекули).

Радіаційна біохімія вивчає радіаційно-хімічні ушкодження біологічно важливих молекул. Розглядає не лише первинні, індуковані опроміненням біохімічні процеси, а й віддалені наслідки – відхилення від норми перебігу метаболічних реакцій у опромінених клітин.

Радіаційна цитологія вивчає патологію опроміненої клітини у всіх напрямках і тісно переплітається з радіаційною біохімією.

Радіаційна молекулярна біологія досліджує вплив іонізуючого випромінювання на процеси, в яких беруть участь біологічні макромолекули, зокрема – ДНК, а саме на реплікацію ДНК, транскрипцію, трансляцію, біосинтез білкових молекул, біогенез клітинних структур, тощо.

Радіаційна мембранологія досліджує механізми впливу іонізуючих випромінювань на стан хімічних компонентів мембран, їхню структурну організацію та на їх функції: транспорт речовин і води, сприймання сигналів, підтримання мембранного біоелектричного потенціалу, біоенергетичні й регуляторні процеси тощо. Особливо істотних молекулярних ушкоджень зазнають ліпіди, які становлять основу біологічних мембран, і тому в клітинах під впливом іонізуючих випромінювань спостерігається порушення структури й функції мембран.

Клітинна радіобіологія вивчає вплив іонізуючого випромінювання на клітинні процеси: мітотичні й мейотичні поділи, проходження етапів клітинного циклу, регуляцію онтогенезу клітини та її диференціацію, міжклітинні взаємодії, біогенез субклітинних структур, генерацію клітинних потоків.

Радіаційна генетика досліджує механізми виникнення генетичних, спадкових змін, мутацій унаслідок опромінення клітин, механізми їх збереження, припинення, поширення в геномі популяції, роль у формотворенні.

Радіаційна біоценологія досліджує вплив радіації на біогеоценози різних рівнів, у тому числі на тваринні та рослинні угруповання й людину. Водночас вона досліджує реакції на опромінення будь-яких біологічних систем, а також особливості процесів, що спричиняють формування екологічної відповіді біогеоценозу на вплив радіації. Внаслідок дії іонізуючої радіації на угруповання, або біоценози, можуть відбуватися зміни в їхньому видовому складі через зниження конкурентоспроможності домінантних видів або посилення життєвих позицій недомінантних, що й призводить до

реконструктивізації всього консорціуму. Зазначені явища досліджуються із заснуванням методів біоценології.

Радіаційна вірусологія досліджує вплив радіації на структуру бактеріофагів і вірусів та їхні властивості. Завдяки таким дослідженням розкрито механізми дії іонізуючих випромінювань на молекулярно-біологічні процеси.

Радіобіологія мікроорганізмів. Результати досліджень дії радіації на клітини бактерій і віруси реалізуються широко на практиці, зокрема радіаційна інактивація клітин є зручним способом стерилізації, а індукований мутагенез дає змогу одержувати нові штами для розв'язання різних завдань біотехнології. Мікроорганізми як об'єкти досліджень мають безперечні переваги над іншими організмами завдяки порівняній простоті й доступності вивчення молекулярно-біологічних механізмів.

Радіобіологія рослин. В радіобіології широко використовують як об'єкт дослідження і рослинні організми. На них досліджують механізми біологічної дії іонізуючого випромінювання на будь-які молекулярні, клітинні й багатоклітинні структури та притаманні їм метаболічні й фізіологічні процеси. Результати досліджень радіобіології рослин мають практичне значення для розв'язання низки проблем селекції, рослинництва, біоценології та біотехнології.

Радіобіологія тваринних організмів досліджує радіобіологічні реакції в різних видів тварин. Експериментально оцінено радіостійкість до дії іонізуючого випромінювання чималої кількості представників тваринного світу. Проте найбільше радіобіологічних досліджень здійснено на мишах і щурах. Мета цих досліджень полягала в добуванні даних щодо формування радіобіологічних реакцій, які можна було б застосувати до людського організму. Важливе значення у розв'язанні багатьох проблем радіобіології людини займають спеціальні розділи радіобіології – радіаційна гематологія, радіаційна імунологія, радіаційна онкологія, медична радіологія та ін.

Радіаційна гематологія. Система кровотворення належить до найрадіочутливіших, і зміна числа клітин у периферичній крові є визначальним чинником у формуванні радіаційного ураження людини за певних доз опромінення. Вивчає механізми впливу радіації на утворення клітин крові, зміни у клітинному складі периферичної крові, способи фармакологічного захисту від наслідків дії іонізуючих випромінювань на систему кровотворення.

Радіаційна імунологія. Уражена імунна система може супроводжуватися негативними для життєдіяльності організму змінами – втратами властивостей клітинного й гуморального імунного захисту. Радіаційна імунологія узагальнює результати імунологічних досліджень опроміненого організму.

Радіаційна онкологія досліджує радіобіологічні реакції пухлинних клітин, вплив іонізуючого випромінювання на злоякісне перетворення клітин. У онкології широко застосовують здатність іонізуючого випромінювання гальмувати проліферацію клітин. Під його дією вповільнюється або й повністю блокується ріст злоякісних пухлин.

Медична радіологія розв'язує практичні завдання, пов'язані з мінімізацією наслідків опромінення людини, визначає принципи нормувань умовно безпечних доз опромінення, розробляє засоби безпечної рентгенодіагностики, оцінює дозові навантаження на людину за різних умов опромінення.

Крім розглянутих розділів радіобіології виділяють:

- **кількісну радіобіологію** – створює математичні моделі для характеристики дозових залежностей радіобіологічних ефектів;
- **стохастичну радіобіологію** – опрацьовує концепцію ймовірнісного характеру первинних подій радіаційного ушкодження макромолекул у клітині та їх участь у подальшому формуванні радіаційного ураження;
- **мікродозиметрію** – досліджує розподіл передаваної енергії випромінювань за мікрооб'ємами клітини та вплив цього розподілу на розвиток радіаційного ураження;
- **теоретичну радіобіологію** – узагальнює погляди на механізми радіаційного ураження.

Таким чином, радіобіологія – це комплексна, мультидисциплінарна галузь знань, що складається з окремих напрямів. Окремі напрями і розділи радіобіології тісно пов'язані між собою і об'єднуються узагальненою теорією – загальною радіобіологією.

1.2. Загальна радіобіологія та радіоекологія

Загальна радіобіологія – наука порівняно молода, виникнення її пов'язано з відкриттям рентгенівського випромінювання та природної радіоактивності. Разом з тим існують відомості, що згадані промені вперше були відкриті українським вченим Іваном Пулюєм з Тернопільщини ще задовго до В. Рентгена (1895р.).

Дослідження в радіобіології спочатку зводились до постановки гіпотез і логічного їх обґрунтування. Перші експерименти носили переважно описовий (якісний) характер. Поступовий розвиток дозиметрії сприяв суттєвому розширенню радіобіологічних досліджень, було зроблено перші фундаментальні узагальнення. В радіобіології надзвичайно велика практична значимість та відповідальність надається отриманим результатам досліджень. Це викликано тим, що існує необхідність в екстраполяції даних на більш високі рівні організації матерії. З практичної точки зору важливо встановити особливості надходження радіонуклідів у зовнішнє середовище і ознайомитися з джерелами опромінення людини й біоти іонізуючою радіацією.

Основними завданнями загальної радіобіології є:

- дослідження радіаційного ураження організмів за умови їх тотального опромінення;
- пізнання загальних закономірностей променевої реакції клітин на дію іонізуючого опромінення;
- з'ясування причин різної радіочутливості організмів;
- керування радіобіологічними ефектами;
- пошуки різних способів захисту організмів від опромінення;
- пошуки способів і шляхів після радіаційного відновлення від ураження;
- прогнозування небезпеки для людства рівня радіації довкілля, що підвищується;
- пошуки нових шляхів використання іонізуючого випромінювання в медицині, сільському господарстві, харчовій і мікробіологічній промисловості тощо.

Радіоекологія (радіаційна біогеоценологія) досліджує розподіл, міграцію та кругообіг радіоактивних речовин в екосистемах та біосфері в цілому, а також вплив іонізуючого випромінювання, зумовленого наявністю радіоактивних речовин у довкіллі, на біогеоценози.

Радіоекологію розглядають і як розділ радіобіології, і як цілком самостійну науку, що сформувалася на стику екології і радіобіології. Тісно пов'язана з радіоекологією і сільськогосподарська радіологія, яка розробляє і обґрунтовує різні агротехнічні й агрохімічні заходи для запобігання накопичення радіоактивних речовин у продуктах харчування й кормах, а відтак, потрапляння їх до організму людини. Великий внесок у розвиток радіоекологічних досліджень щодо природної радіоактивності ґрунтів, сільськогосподарських рослин і тварин, шляхів міграції радіоактивних речовин в цих об'єктах внесли українські вчені Ю.О. Кутлахмедов, Д.М. Гродзинський, І.М. Гудков, О.О.Городецький та ін.

Коло об'єктів, у межах яких досліджується вплив іонізуючого випромінювання на природне середовище охоплює всі складові екосистеми: літогенну основу, ґрунтовий покрив, водне та повітряне середовища, рослинний та тваринний світ, а, зрештою, й людину. Об'єктом радіоекологічних досліджень також вважається сукупність природних (геологічних, геоморфологічних, фізико-географічних та ін.) процесів, що відбуваються в екосистемах.

Важливою проблемою радіоекології є вивчення радіоекологічних аспектів впливу радіонуклідів на людину – методів розрахунку та оцінки індивідуальних і колективних еквівалентних доз опромінення, особливостей вибіркового впливу випромінювання на різні органи і тканини, змін в організмі внаслідок тривалого проживання на радіоактивно забруднених територіях. При цьому потрібно враховувати принципові відмінності в радіоекологічній оцінці впливу іонізуючого випромінювання на біоту й людину. Так, для біоти основним показником впливу радіації є здатність популяцій підтримувати свою чисельність, а для людей, які проживають на забруднених радіонуклідами територіях, – це стан їхнього здоров'я і генетичні порушення у потомства.

1.3. Коротка історія розвитку радіобіології

Розвиток радіобіології як науки пов'язано з трьома важливими відкриттями кінця XIX століття:

- 25 березня 1895 року німецький фізик, професор Вищої сільськогосподарської школи в Хоенхеймі, а пізніше ректор Мюнхенського університету Вільгельм Конрад Рентген, відкрив невідомі X-промені (названі пізніше його ім'ям). В. Рентген був першим фізиком, який 10 грудня 1901 року отримав за дане відкриття Нобелівську премію;

- 26 лютого 1896 року професор фізики Паризького музею історії А. Беккерель, фахівець в галузі люмінесценції, відкрив природну радіоактивність солей урану;

- 1898 року М. Складовською-Кюрі і П. Кюрі зроблено відкриття радіоактивних властивостей полонію і радію.

За ці відкриття вчені одержали Нобелівську премію.

Перший етап (1896 – 1945рр.) розпочався відразу ж після відкриття рентгенівських променів, який започаткував дослідження дії іонізуючого випромінювання, в тому числі і на біологічні об'єкти. Вважають, що народження радіобіології відбулось в 1899 році, коли була опублікована перша наукова праця Ф. Шаудину – відомого німецького вченого, який дослідив реакцію декількох видів простіших організмів на дію іонізуючого випромінювання.

Нові промені були не тільки невидимі, а також невідчутні. Міф про їх нешкідливість швидко розвіявся. Виянилось, що результатами впливу іонізуючого випромінювання можуть бути опіки шкіри, променеві виразки, випадання волосся. Було встановлено, що іонізуюче випромінювання може впливати на статеві залози, згадані невідомі промені можуть вбивати мишей. Тоді ж було помічено, що різні клітини тканин і органи організму мають неоднакову чутливість до дії іонізуючого випромінювання, а всередині клітини найбільш чутливим є ядро. Загальною реакцією клітини на опромінення виявилось припинення клітинного ділення. Ті та інші факти стали фундаментом для поступового формування певних закономірностей дії іонізуючого випромінювання. В 1906 році був сформульований фундаментальний закон (правило) радіобіології І. Бергоньє - Л. Трибондо (французькі біологи) – *чим активніше проліферують (розростання тканин організму тільки шляхом новоутворення і розмноження клітин) клітини, тим вони є радіочутливіші*. Тобто, чим більша здатність клітин до розмноження (ділення) і слабше виражена їх морфологія і функції (або диференціація) тим вони є більш радіочутливішими. Таким чином було пояснено різну чутливість різних клітин в організмі, а отже стало можливим пригнічувати пухлинні клітини з допомогою випромінювання.

У 1925–1927 рр. відкрито мутагенну дію іонізуючого випромінювання – виникнення спадкових змін – мутацій. Це відкриття було зроблено Г.А. Надсоном, Г.С. Філіповим і Л.М. Делоне в експериментах на дріжджах, а пізніше Г. Меллером – на прикладі спеціальної генетичної системи в дрозофіли. Зокрема було виявлено, що іонізуюче випромінювання не тільки пошкоджує спадковий механізм клітини, а також викликає в ньому необоротні зміни – мутації. Саме мутагенна дія та пригнічення проліферації лягли в основу поділу радіобіології на дві галузі практичного її застосування – променева терапія та радіаційна селекція.

Через недостатній розвиток дозиметрії на той час (*розділ фізики, що вивчає вимірювання іонізуючого випромінювання*) даний період розвитку радіобіології характеризується переважно роботами описового характеру. З часом поступовий розвиток дозиметрії сприяв становленню кількісних принципів радіобіології, метою яких було пов'язати біологічний ефект з дозою випромінювання. В цей час було висунуто ряд теорій, а саме: "мішені", "точкового тепла", "унікальних" та "масових" структур клітини та інші. По суті вся історія радіобіології являє собою ряд послідовних спроб науково пояснити існування *«радіобіологічного парадоксу»* – *явища, що полягає у невідповідності між дуже малою величиною поглинутої дози опромінення та ступенем прояву реакцій біологічного об'єкта, що нерідко призводить до його загибелі*. Така перша спроба і була зроблена фізиком Ф. Десауером в 1922 –

1923 рр., який запропонував теорію "точкового тепла". Дана теорія пояснювала пошкодження клітини при іонізації (і точковим перегрівом) в деякому чутливому об'ємі, що становить невелику частину клітини. Згадана теорія пізніше була розвинена радянськими вченими М.В. Тимофєєвим-Ресовським, К. Циммером та ін., що пізніше було сформульовано, як "теорію мішені".

Розвиток радіобіології пов'язано і з відкриттям пострадіаційного відновлення і відкриття молекулярних механізмів такого відновлення – репарації ДНК (від лат. "reparatio" – відновлення). *Репарація* – це процес повного або часткового відновлення природної структури ДНК, пошкодженої при γ - опроміненні або хімічними агентами, який властивий клітинам всіх організмів. Було встановлено, що формування кінцевого радіобіологічного ефекту – це поєднання процесів, що ведуть до пошкоджень і одночасних відновлювальних актів, що протидіють негативним змінам в організмі.

Другий етап (1945 – 1986рр.) розвитку радіобіології припадає на роки масових випробувань ядерної і термоядерної зброї на Землі та становлення ядерної енергетики. Цей період характеризується значним забрудненням біосфери Землі радіонуклідами, що утворилися при застосуванні, випробуванні ядерної зброї, а також внаслідок аварій на підприємствах повного ядерного циклу (ПЯПЦ). Наприклад, аварії на Уралі (м. Киштим 29 вересня 1957р.), на заводі Уіндскейлі (США, 1957р.).

Водночас розпочалося формування радіоекології, яка вивчала поширення в природі продуктів поділу урану, котрі після проведення ядерних вибухів розносилися по всій планеті й у вигляді глобальних опадів осідали на поверхні континентів і океанів. Становлення нової методології радіоактивних досліджень пов'язане з працями О.М. Алексахіна. Фундаментальний внесок у розвиток радіоекології зробили дослідження М.В. Тимофєєва-Ресовського, М.В. Куликова, І.В. Молчанової, А.Н. Тюрюканова та ін., які було проведено на Уралі в 40 – 60-х роках.

Нові складні завдання постали перед радіобіологами після вибухів атомних бомб над японськими містами Хіросіма та Нагасакі 6 і 9 серпня 1945 року. Наслідки ядерного бомбардування підтвердили вкрай небезпечність атомної зброї.

Актуальними стають такі практичні завдання, як вивчення закономірностей протікання гострої променевої хвороби та наслідків короткотривалої дії великих доз іонізуючого випромінювання; в'яснення механізмів променевої загибелі організму; в'яснення природи відмінностей в радіочутливості органів та тканин; розгляд і визначення причин близьких та віддалених наслідків променевого пошкодження; дослідження генетичних аспектів променевого пошкодження стосовно соматичних (злаякісне переродження) і статевих (зміни в потомстві) клітин; пошук ефективних засобів від гострих променевих пошкоджень та їх лікування.

Важливим етапом в розвитку радіобіології стала Женевська конференція з проблем мирного використання атомної енергії, збільшення радіаційного фону внаслідок випробування ядерної зброї, що відбулася у 1955 році. Були розгорнуті програми наукових досліджень в різних країнах, об'єктами досліджень стали десятки тисяч людей, що постраждали від атомних

бомбардувань Хіросіми та Нагасакі. В експериментах на лабораторних тваринах стали вивчати ефекти різної потужності та різної дози випромінювання, були випробувані десятки тисяч різних препаратів, як засоби від гострих променевих пошкоджень та їх лікування. У 1949 р. були винайдені радіозахисні властивості амінокислоти цистеїну, ціаніду натрію, амінів. У 1951р. бельгійський радіобіолог З.Бак показав високу протипроменеву ефективність синтезованої ним сполуки цистеаміну. В тих роках була експериментально доведена властивість клітини відновлюватись після ушкоджень внаслідок опромінення.

Третій етап у розвитку радіобіології розпочався після катастрофи на Чорнобильській АЕС (26 квітня 1986р). Після катастрофи стало зрозуміло, що ядерні вибухи – це не єдина небезпека для людства. Для вирішення проблем, що виникли в результаті аварії на Чорнобильській АЕС, накопичений радіобіологією досвід значною мірою виявився непридатним, адже, як виявилось, загрозою для здоров'я та життя людей може бути не лише короткотривале опромінення в малих дозах, а також і тривале опромінення при відносно малій потужності дози. Стало відомо, що при низьких дозах опромінення механізм пошкоджень, а також докази його променевої природи ускладнені, а роль взаємодії променевих та непроменевих факторів різко зростає. Тому терміново виникла потреба в нових широкомасштабних дослідженнях особливостей дії малих доз випромінювання, зокрема таких:

- особливості механізмів біологічної дії малих доз іонізуючого випромінювання;
- механізми пошкоджуючої та стимулюючої дії на різні живі системи;
- особливості комбінованого променевого пошкодження від сукупної дії радіонуклідів, що надходять всередину організму;
- взаємодія малих доз з іншими факторами середовища (забруднення атмосфери, води та ґрунту забруднювачами різної природи);
- пошук принципово нових протипроменевих засобів, придатних для тривалого введення в організм та інше.

Радіобіологічні дослідження охоплюють майже всі аспекти дії іонізуючих випромінювань на біологічні системи: всебічне вивчення нейтронів на тваринний організм (О.О. Городецький, Є.Ю. Чеботарьов, Б.Р. Киричинський), обґрунтовано радіопротектори нового класу (В.А. Барабой), закономірності дії іонізуючої радіації на живі клітини (І.М.Гудков), нові радіобіологічні технології (А.А. Булах), досліджено механізми радіо сенсibiliзації клітин (О.П. Дмитрієв), радіоекологічні дослідження (Ю.О. Кутлахмедов), дослідження природної радіоактивності ґрунтів, сільськогосподарських рослин, тварин, шляхів міграції природних і штучних радіонуклідів в цих об'єктах (Д.М. Гродзинський, О.О. Городецький, А.І. Даниленко). Особливої актуальності набули дослідження біологічної дії малих доз опромінення, канцерогенний вплив. Над проблемами запобігання захворюванням, що спричинені дією випромінювань від радіонуклідів, котрі потрапили в довкілля, працює Національний центр радіаційної медицини.

Зазначимо, що найбільш важливими характеристиками іонізуючого випромінювання є потужність експозиційної і поглинутої доз, час опромінення,

які дозволяють встановити кількісну залежність між дією радіації і радіаційними ефектами. Саме кількість енергії, що передається іонізуючим випромінюванням клітинам живих організмів, обумовлює первинні радіаційні пошкодження в них: іонізацію, радіоліз води, зміщення атомів, розрив ланцюгів біополімерних сполук та генетичні пошкодження. Здатність імунної системи організму відновлювати нормальне функціонування клітин і нівелювати наслідки зазначених первинних пошкоджень обумовлює відсутність або появу незворотних ушкоджень. Знання цих кількісних залежностей “доза – ефект” необхідно для розробки норм радіаційної безпеки і санітарних правил захисту від впливу радіації, а також дозволяє прогнозувати ступінь тяжкості радіаційного ураження і визначати ефективну методику лікування.

Результати наукових досліджень є основою для розробки норм допустимих рівнів радіоактивності продуктів харчування, будівельних матеріалів, інших норм радіаційної безпеки і санітарних правил захисту від дії іонізуючого випромінювання. Санітарні правила захисту від дії радіації використовують результати досліджень властивостей різних видів іонізуючого випромінювання і характеристик їх взаємодії з речовиною. Ці правила, а також заходи щодо забезпечення радіаційної безпеки персоналу і населення використовують три можливості, встановлені ядерною фізикою: захист часом (скоротити час експозиції), відстанню (за допомогою маніпуляторів, інших дистанційних і автоматизованих технологій) і екраном (свинець, бетон, вода, полімери, свинцеве скло тощо). Розробка і дотримання зазначених норм і правил є важливим завданням комунальної і промислової радіаційної гігієни, практичної діяльності, що пов'язана з використанням джерел іонізуючого випромінювання.

Результати радіобіологічних досліджень разом з радіаційними нормами і санітарними правилами використовуються при проектуванні і експлуатації АЕС, інших радіаційних і ядерних технологій, для визначення радіаційних ризиків, обґрунтуванні методів і засобів радіаційної безпеки персоналу і населення, і здійснення необхідних природоохоронних заходів.

1.4. Основні методи дослідження в радіобіології

Основні методи дослідження в радіобіології пов'язані з кількісним співставленням дози, часу і площі опромінення.

У радіобіології широко застосовується метод безперервного *моніторингу* за навколишнім середовищем, біосферою, світом рослин і тварин, ґрунтом і водоймами тощо. Широко застосовуються ***фізичні, хімічні, біологічні та комплексні*** методи дослідження. Окрім того, постійно використовуються такі методи, як ізотопних індикаторів, груп (контрольно-дослідної), радіометрії (абсолютний, розрахунковий, відносний, експрес-метод), авторадіографії, експрес-аналіз, телеметрії, комп'ютерної обробки, біометрії, індукованого мутагенезу. Досить часто застосовують логічно-віртуально-символічний та метод моделювання, тобто створюються логічні імітаційні схеми та моделі, які є дуже близькі до реальних. За певних умов і поставленої задачі дослідження застосовують цитологічні, гістологічні, фізіологічні, морфологічні та інші методи.

Для визначення механізмів радіаційно-хімічних реакцій застосовують методи досліджень, які дозволяють виявлення первинних хімічних форм, що

виникають внаслідок поглинання енергії іонізуючих випромінювань, а також дають змогу вивчати природу вільно радикальних станів молекул, реєструвати проміжні продукти радіаційно-хімічних перетворень із дуже коротким періодом існування, кількісно оцінювати кінетику швидкоплинних реакцій. Найчастіше використовують методи **спектроскопії, імпульсного фотолізу (радіолізу)** та ін.

У радіобіології й інших галузях науки широко застосовується метод **ізотопних індикаторів (мічених атомів)**. *Ізотопні індикатори* – це ізотопи, які за масою відрізняються від атомів елемента, можуть бути використані в якості індикатора при вивченні різноманітних процесів його розподілу, переміщення і перетворення у складі різних речовин у різноманітних складних системах, у тому числі живих організмах. Серед ізотопних індикаторів розрізняють стабільні і радіоактивні природні та штучні ізотопи. Чутливість методу ізотопних індикаторів дуже висока і значно перевищує чутливість інших фізичних і хімічних методів.

У біологічних, фізіологічних, агротехнічних дослідженнях рослин і тварин частіше використовують стабільні ізотопи ^2H , ^{13}C , ^{15}N , ^{18}O та радіоактивні – ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S , ^{45}Ca . Методом ізотопних індикаторів вивчають переміщення, трофічні ланцюги і розподіл в організмі, роль у метаболічних процесах тих чи інших речовин й елементів. Метод ізотопних індикаторів базується на двох основних положеннях:

- хімічні властивості різних ізотопів одного елемента практично однакові, тому їх поведінка в процесах, що вивчаються, не відрізняється від поведінки інших атомів того ж елемента;

- радіоактивні ізотопи повинні використовуватись у таких дозах, котрі не повинні здійснювати біологічної дії на організми.

Використання в дослідженнях радіоактивних ізотопів вимагає дотримання техніки безпеки, постійно здійснювати контроль рівня радіаційного забруднення в лабораторіях, де проводяться такі дослідження.

У біології, медицині і ветеринарній медицині використовуються методи *in vitro* застосування радіоізотопів, коли вони не вводяться в організм. Зокрема, метод *in vitro* застосовують в ендокринології, імунології, мікробіології, фармакології. Так радіоімунологічний аналіз дозволяє швидко і надійно визначати в біологічних рідинах і екстрактах з тканин вміст гормонів, ферментів, рецепторних білків, а також лікарські препарати.

Методи дослідження, що застосовуються в радіобіології дозволяють одержувати вірогідні дані про радіобіологічні ефекти, фізичну, хімічну і біологічну дію радіації на живі системи.

Перелік запитань для контролю знань

1. Дайте визначення радіобіології як науки.
2. Вкажіть предмет та об'єкт дослідження радіобіології.
3. Охарактеризуйте зв'язок радіобіології з іншими науками.
4. Назвіть та охарактеризуйте етапи розвитку радіобіології.
5. Назвіть зарубіжних і вітчизняних вчених, які зробили значний внесок у розвиток радіобіології.
6. Назвіть основні методи дослідження в радіобіології.

ТЕМА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ. ЯВИЩЕ РАДІОАКТИВНОСТІ ТА ЙОГО ФІЗИЧНА СУТЬ. ДЖЕРЕЛА РАДІАЦІЇ

- 2.1. Визначення поняття «іонізуюче випромінювання».
- 2.2. Типи іонізуючих випромінювань.
- 2.3. Явище радіоактивності. Закон радіоактивного розпаду.
- 2.4. Природні джерела іонізуючих випромінювань.
- 2.5. Антропогенні джерела іонізуючих випромінювань.

2.1. Визначення поняття «іонізуюче випромінювання»

Одним із фізичних чинників навколишнього середовища, який здатний негативно впливати на здоров'я людини, є іонізуюче випромінювання природного або техногенного походження.

Іонізуючим випромінюванням називають будь-яке випромінювання, взаємодія якого із середовищем, що опромінюється, викликає розпад нейтральних атомів і молекул на частинки іонів, які несуть електричний заряд.

Іонізуючим є все випромінювання, що супроводжує радіоактивний розпад та ядерні реакції. Тобто, радіоактивне випромінювання є одним із видів іонізуючих випромінювань.

Термін «радіація» у перекладі з латинської (radiation) означає «випромінювання», введений у науку П'єром Кюрі і Марією Складовською-Кюрі (1898) і застосовується не тільки до іонізуючого випромінювання, але і цілого ряду інших фізичних явищ, наприклад, сонячна радіація, теплова радіація тощо.

Іонізуюча радіація – це потоки елементарних частинок і електромагнітних хвиль (електронів, позитронів, мезонів, нейтронів, ядер елементів, електромагнітних коливань), проходження яких крізь речовину викликає її іонізацію.

Іонізація – це перетворення нейтральних атомів чи молекул на частинки, які несуть позитивний або негативний заряд.

Радіація є скрізь. Вона надходить з космосу, з природних земних речовин, утворюється при горінні та ядерно-паливному циклі. Наземні джерела радіації забезпечують приблизно 5/6 дози природного опромінення населення, а космічні – менше 1/6 дози.

2.2. Типи іонізуючих випромінювань

Іонізуюче випромінювання об'єднує різноманітні види випромінювань за своєю природою, але всі вони подібні тим, що несуть високу енергію, іонізуючу дію та вражають біологічні об'єкти.

Електромагнітне випромінювання являє собою сукупність змінних станів електричного й магнітного полів, які поширюються докільціям у вигляді хвиль.

До електромагнітного випромінювання відносять ультрафіолетові промені з довжиною хвилі (λ) від 400 до 50 нм, рентгенівські промені (λ від 50 до 0,01 нм) та гамма-випромінювання (λ менш як 0,01 нм). Оптичні і радіохвилі теж відносяться до електромагнітних випромінювань, але вони не здійснюють іонізації, оскільки мають низьку енергію.

Ультрафіолетові промені мають природне походження і надходять на Земну поверхню від Сонця із космічного простору. Вони шкідливі для живих складових екосистеми. Останнім часом потужність ультрафіолетового випромінювання значно збільшилася внаслідок зменшення щільності захисного озонового шару Землі і виникнення «озонових дір».

Корпускулярне випромінювання – це потік частинок, які мають ненульове значення маси спокою (Бак, Александер, 1963).

До цього типу випромінювань відносять потоки найменших частинок атома (електронів, протонів), ядер різних хімічних елементів (гелію, кисню та ін.), а також нейтронів – елементарних незаряджених частинок.

Бета-випромінювання є потоком прискорених електронів (β -частинок) або античастинок електрона позитронів (β^+ -частинок), які виникають під час розпаду відповідних радіоактивних ізотопів.

Протони є стабільною елементарною частинкою з масою $1836,13 m_e$, де m_e – маса електрона, й позитивним зарядом. До джерел швидких протонів належать багато ядерних реакцій. У відкритому космосі є потужні потоки швидких протонів із дуже великими значеннями енергії. Як іонізуюче випромінювання розглядають потоки прискорених протонів – ядер атомів водню з масовим числом 1, потоки дейтронів – ядер дейтерію – ізотопів водню з масовим числом 2, або тритію – ізотопу водню з масовим числом 3.

Альфа-промені – випромінювання, що складається з альфа-частинок (α -частинок), які утворюються під час альфа-розпаду радіоактивних ізотопів. Альфа-частинки – це ядра атомів гелію, що складаються з чотирьох нуклонів – двох протонів і двох нейтронів.

Нейтрони – електрично нейтральні елементарні частинки масою $1836 m_e$. Потоки нейтронів одержують в ядерних реакторах і у спеціальних нейтронних генераторах на основі ланцюгових ядерних реакцій, які є важливою складовою випромінювання і супроводжує будь-який атомний вибух.

До корпускулярних іонізуючих випромінювань відносяться **мезони** – нестабільні елементарні частинки, маса яких більша за масу електрона, але менша від маси протона. Мезони є як електрично нейтральні, так і заряджені. Завдяки цим частинкам здійснюється зв'язок нуклонів у атомних ядрах. Час існування мезонів дуже короткий. Розрізняють пі-мезони і К-мезони. **Мюони** (мю-мезони) – елементарні частинки з негативним зарядом, енергією 25-100 МеВ та масою, що майже у 207,3 разів перевищує масу електрона. Їх дістають бомбардуванням швидкими протонами мішеней, що приводить до утворення пі-мезонів, під час розпаду яких і виникають мюони.

Найважливішими в гігієнічному відношенні характеристиками будь-яких іонізуючих випромінювань є їх *проникна здатність, енергія та щільність іонізації (інтенсивність іонізації середовища, яке опромінюється)*.

Для **α -променів** (за енергії 4МеВ) проникна здатність (довжина пробігу) становить: у повітрі – 2,5см, у біологічній тканині – 0,03 мм, в алюмінії – 0,016мм. Ці промені легко затримуються навіть тонким шаром паперу. Тому в разі зовнішнього опромінення α -промені суттєвої біологічної загрози для людини не становлять. Однак ця загроза значно зростає у випадках так званої інкорпорації, тобто проникнення α -частинок до організму з водою, повітрям, їжею та ін. У таких випадках дія α -променів особливо згубна, оскільки

притаманна їм щільність іонізації в декілька тисяч разів більша ніж у β -частинок і γ -променів. Під час проходження шляху в повітрі довжиною в 1см α -частинки утворюють до 100000 пар іонів.

β -частинки можуть мати негативний (електронний β -розпад) або позитивний (β -розпад) заряд. Їх проникна здатність значно вища, ніж в α -частинок. Довжина пробігу β -частинок у повітрі може сягати декількох метрів, у воді – 2,6мм, алюмінії – 9,7мм. Однак щільність іонізації менша, ніж в α -частинок у сотні тисяч разів – під час проходження 1см повітряного середовища вони створюють лише 50-150 пар іонів.

γ -промені являють собою потік електромагнітних хвиль завдовжки від 0,1 до 0,01 нм і мають швидкість руху, що близька до швидкості світла. Проникна здатність і довжина їх пробігу значно вищі, ніж в α - і β -частинок. Вони вільно проникають не тільки крізь тіло людини, а й крізь значно щільніші середовища. Однак щільність іонізації значно менша, ніж при α - або β -опроміненні.

До корпускулярних випромінювань, які виникають унаслідок ядерних реакцій, відносять також нейтрони. Проникна здатність нейтронного випромінювання приблизно така сама, як і у γ -променів. Залежно від типу (швидкості руху) нейтронів вони поглинаються різними матеріалами, які містять бор, графіт, свинець, парафін, бетон та ін.

Одним із поширених видів електромагнітного випромінювання, яке теж здійснює іонізуючий ефект, є рентгенівське. Отримують штучно в результаті гальмування заряджених частинок в електричному полі, яке й генерує це електромагнітне випромінювання. Для генерації рентгенівського випромінювання застосовують поширені у медицині рентгенівські апарати. Рентгенівським променям притаманна висока проникність (чим менша довжина хвилі, яка залежить від напруги, що подається на трубку, тим більша проникна здатність).

2.3. Явище радіоактивності. Закон радіоактивного розпаду

Радіоактивність – це спонтанне (не вимушене, не спричинене зовнішніми факторами) перетворення нестійкого ізотопу одного хімічного елемента із основного або збудженого (метастабільного) стану в ізотоп іншого елемента, що супроводжується виділенням енергії шляхом випускання елементарних частинок або ядер. Такі перетворення ядер та ядра, а також відповідні атоми називаються **радіоактивними**.

Характерним прикладом радіоактивного перетворення є ланцюгова реакція перетворення урану 238 у стабільний нуклід свинцю 206:

Уран 238 – Торій 234 – Протактиній 234 – Уран 234 – Торій 230 – Радій 226 – Радон 222 – ... – Полоній 210 – Свинець 206.

Час від часу від атома ^{238}U відривається компактна група з чотирьох частинок: двох протонів і двох нейтронів. Таку групу називають α -частинкою, а процес відокремлення альфа-розпадом або альфа-випромінюванням.

При цьому ^{238}U перетворюється у торій-234 (^{234}Th), проте й він нестабільний. Трансформація ^{234}Th відбувається дещо інакше: один з нейтронів ядра змінюється на протон. Водночас один електрон втрачає пару і вилітає з атома. Такий процес називають бета-розпадом або бета-випромінюванням. Розрізняють електронний і позитронний бета-розпади. Під час таких розпадів

виникає ядро нового хімічного елемента, який займає відповідно попереднє або наступне місце у таблиці Менделєєва. У нашому випадку – це протактиній-234 (^{234}Pa).

Кожний альфа- або бета-розпад супроводжується звільненням енергії, яка передається далі у вигляді короткохвильового електромагнітного випромінювання. Нестабільний радіонуклід стає настільки збудженим, що викидає порцію чистої енергії і при цьому не втрачаються будь-які його частинки. Спостерігається лише виділення γ -фотона у процесі гамма-випромінювання. Далі з ^{238}U відбуваються інші перетворення, що супроводжуються альфа-, бета- і гамма-випромінюваннями. Весь цей довгий ланцюг радіоактивних перетворень закінчується стабільним нуклідом свинцю (^{210}Pb).

Радіоактивність значною мірою обумовлюється фізичними, хімічними особливостями будови і властивостями атома. Тому доцільно звернути особливу увагу на будову і властивості атома.

Термін “*атом*” означає “*неподільний*”. Атом – елементарна, доцільна досконало збудована частинка елемента, що зберігає його хімічні властивості.

У сучасному уявленні атом складається з ядра, що має позитивний електричний заряд, і хмари негативно заряджених електронів, що обертаються навколо ядра. Кількість електронів в атомі рівна сумарному позитивному заряду ядра, тому атоми нейтральні. Електрони рухаються по орбітах, що характеризуються основними, орбітальними і магнітними квантовими числами. Заряд ядра характеризує атомний номер і визначає його місце в таблиці хімічних елементів Менделєєва. Сучасні уявлення про будову атома базуються на квантовій механіці.

Ядро будь-якого атома складається з елементарних частинок – протонів і нейтронів. Протони мають позитивний заряд, чисельно рівний і протилежний за знаком заряду електрона, і масу спокою. Нейтрони не мають електричного заряду, але мають теж масу спокою. Протони і нейтрони мають спільну назву – нуклони.

Кожен вид атомів (ядер) називається нуклідом. *Нуклід* – це вид атомів і ядер, що відповідає певному числу протонів і нейтронів.

Нукліди, ядра яких мають однакову кількість протонів, але різну кількість нейтронів, називаються *ізотопами*. Ізотопи хімічно тотожні, але відрізняються масою і ядерними властивостями. Всі хімічні речовини мають ізотопи. Найменшу кількість відомих ізотопів має водень (три – водень, дейтерій, тритій), а найбільшу ксенон і цезій (36). Всього відомо близько 1300 ізотопів, з них 250 стабільні, інші радіоактивні. Ізотопи вуглецю і тритій утворюються під впливом космічної радіації.

Радіоактивний ізотоп – це атоми одного елемента, котрі мають різну масу, тобто різну кількість нейтронів при однаковій кількості протонів, наприклад, радіоактивний ізотоп йоду (^{131}I), радіоактивний ізотоп кобальту (^{60}Co). Терміни «ізотоп», «радіоактивний ізотоп» використовуються тоді, коли мова йде про атоми одного і того самого елемента.

Радіонуклід – це нестійкий нуклід, такий, що розпадається. Термін «радіонуклід» застосовується для визначення атомів радіоактивних речовин,

оскільки радіоактивні ізотопи, як правило, бувають у складі сполук і дуже рідко у вільному стані, наприклад радіонукліди ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs тощо.

Будова атома всіх елементів обумовлена проявом фундаментальних гравітаційних, електромагнітних та ядерних сильних і слабких взаємозв'язків, завдяки яким атоми з'єднуються один з одним і утворюють молекули. Без чіткого і точного прояву цих взаємозв'язків стали б не можливі хімічні реакції, атомні і ядерні перетворення, а також було б не можливим органічне життя у величезному різноманітті його форм прояву. Сильні взаємозв'язки забезпечують наявність стабільних елементів, слабкі взаємозв'язки роблять можливим радіоактивний розпад. Згідно з співвідношенням Ейнштейна, кожному значенню маси m відповідає енергія – $E = mc^2$ (c – швидкість світла у вакуумі).

Чим далі електрони знаходяться від ядра, тим слабший зв'язок мають з ядром і тому легше вступають у різні хімічні реакції. Електрони, що містяться на зовнішній орбіті, визначають хімічні властивості атома, тобто його властивості вступати у сполуки з іншими атомами. Атом за певних умов перебуває в стані основному (стабільному, спокою), збудження, іонізації, реіонізації, рекомбінації.

При наданні електронам додаткової енергії, меншої, ніж енергія зв'язку електрона з ядром, вони будуть переходити з одного енергетичного рівня на інший. Такий атом залишається електрично нейтральним, але уже з надлишком енергії.

Атоми, що мають надлишок енергії, називаються *збудженими*, а перехід електронів з одного енергетичного рівня на інший – *процесом збудження*.

Оскільки ядро завжди прагне набути основного стану, за якого її енергія буде мінімальною, то атом зі збудженого стану переходить у початковий стан спокою. При цьому надлишкова енергія вивільнюється у вигляді порцій енергії – квантів. Наприклад, перехід електронів зі зовнішніх оболонок на внутрішні супроводжується рентгенівським випромінюванням з довжиною хвилі, характерною для кожного атома (характеристичне рентгенівське випромінювання).

Закон радіоактивного розпаду

Суть радіоактивного перетворення ядер полягає у наступному: маса ядра атома є меншою маси окремих нуклідів, з яких складається ядро на величину енергії зв'язку між нуклонами в ядрі (що виходить з принципу еквівалентності А.Ейнштейна, що встановлює рівність між енергією та масою $E=mc^2$). Тому різні ядра мають різну енергію зв'язку, так як ядра з однаковою кількістю нуклонів, але різною кількістю протонів і електронів будуть мати різну енергію, про що згадувалось раніше.

Основний закон радіоактивного розпаду виражається формулою:

$$N = N_0 \exp(-\lambda t), \text{ де}$$

N_0 – кількість ядер в об'ємі речовини на початку моменту часу,

N – кількість ядер на момент часу t ,

λ – постійна розпаду, що має зміст вірогідності розпаду ядра за 1 секунду.

Радіоактивний розпад характеризується середнім часом життя радіоактивного ізотопу $\tau = 1/\lambda$ і періодом напіврозпаду, що виражається формулою $T_{1/2} = \tau \ln 2$.

Тому радіоактивні перетворення ядер – це здатність їх переходити з одного стану в інший з меншою енергією і випускати при цьому заряджені частинки або γ -кванти.

Альфа-розпад – тип спонтанного радіоактивного перетворення важких атомних ядер, що полягає у викиданні α -частинки з ядра. Альфа-частинки являють собою ядра атомів гелію ${}^4\text{He}$ й складаються з двох протонів і двох нейтронів. Альфа-розпад властивий 25 природним радіоактивним ізотопам та близько 100 штучним ядрам із дефіцитом нейтронів. Енергія α -частинок при α -розпаді становить від 2 до 9 МеВ.

Бета-розпад – тип спонтанного радіоактивного перетворення нестабільних атомних ядер. Розрізняють електронний і позитронний β -розпади. Електронний β -розпад полягає у викиданні з ядра електрона, який утворюється внаслідок перетворення нейтрона на протон. Під час такого розпаду виникає ядро нового елемента, який є наступним у таблиці Менделєєва, бо в ядрі стало на один протон більше. Позитронний β -розпад полягає у викиданні з ядра позитрона, що виникає внаслідок перетворення протона на нейтрон. Відповідно в дочірньому ядрі протонів стає на одиницю менше, а відтак, дочірнє ядро належить атому елемента, який у таблиці Менделєєва передує тому, що зазнав радіоактивного розпаду. Бета-розпаду зазнають 20 природних і 1000 штучних радіоактивних ізотопів. Здебільшого викидання β -частинок супроводжується випромінюванням γ -фотонів.

Одиниці радіоактивності

За міжнародною системою одиниць СІ одиницею радіоактивності прийнятий бекерель (Бк) – це одиниця активності нукліда, рівна одному радіоактивному розпаду за секунду. Досить часто використовують позасистемну одиницю кюрі (Кі), яка відповідає активності 1 г радію (${}^{226}\text{Ra}$) ($1 \text{ Кі} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк}$).

Характерним показником радіаційної небезпеки контрольованої речовини чи матеріалу є питома радіоактивність. Цей параметр використовують як головний критерій забрудненості продуктів харчування, питної води, ґрунту, будівельних матеріалів, сировини і продукції промислових підприємств. Виділяють **масову та об'ємну питому радіоактивність**, які відповідно вимірюють в Бк/кг (Кі/кг) та Бк/м³ (Кі/м³).

2.4. Природні джерела іонізуючих випромінювань

За звичайних умов будь-який організм найбільшу дозу опромінення отримує від природних джерел іонізуючих випромінювань, а саме – від природних радіоактивних елементів.

Більшість з природних джерел радіації такі, що уникнути опромінення від них практично неможливо. Упродовж усієї історії розвитку Землі різні види іонізуючого випромінювання потрапляли на її поверхню з космосу або надходили у результаті розпаду радіоактивних речовин, які містяться в глибинах земної кори. Академік В.І. Вернадський наголошував, що життя на Землі виходить із двох джерел енергії – сонячного світла та енергії атомного розпаду.

Опромінення від природних джерел іонізуючих випромінювань більшою або меншою мірою зазнає будь-який живий організм, зокрема і людина, бо наявність їхніх полів – невід'ємна властивість довкілля.

У земній корі виявлено 340 ізотопів хімічних елементів, що мають радіоактивні ядра. З них близько 70 належать до важких металів. Усі елементи з атомним номером вищим за 80 є радіоактивними.

Виділяють три групи радіонуклідів, що містяться в земній корі:

- радіоактивні елементи, поява яких зумовлена ядерними реакціями із зарядженими частинками космічних променів – космогенні природні радіонукліди;

- радіонукліди, походження яких, не пов'язане з важкими радіоактивними елементами – поодинокі природні радіонукліди;

- радіонукліди, що входять до радіоактивних сімейств.

Космічне випромінювання. Космічне випромінювання за своїм походженням поділяють на первинне і вторинне. Первинне складається з частинок легких елементів – водню, гелію, літію, берилію, бору та інших. Ці частинки енергії утворюються в надрах Галактики та Сонця.

Вторинне космічне випромінювання – це енергія, утворена в результаті взаємодії первинних космічних часток з атмосферою Землі. Воно складається з електронів, протонів, мезонів, фотонів тощо.

Космічні промені, досягаючи поверхні Землі та взаємодіючи з атмосферою, утворюють різноманітні **космогенні радіонукліди**. Космогенні радіонукліди виникають унаслідок ядерної реакції між ядрами хімічних елементів земного походження й частинками космічних променів.

У глибинних товщах земної кори космічні промені швидко поглинаються іншими хімічними елементами, тому найбільше цих природних радіонуклідів міститься в атмосфері, особливо у тропосфері, а також у верхніх земних шарах – ґрунтовому покриві та четвертинних відкладах. Шар атмосферного повітря служить природним захисним екраном від радіації та ультрафіолетових променів. Найбільші концентрації серед радіонуклідів космічного походження мають тритій (^3H) та радіовуглець (^{14}C).

До поодиноких природних радіонуклідів належить досить багато радіоізотопів різних хімічних елементів із такими масовими числами, що мають по кілька ізотопів, і деякі з них є радіоактивними. Внаслідок біогеохімічних або геохімічних перетворень елементів з вказаними значеннями масових чисел їхній ізотопний склад практично не змінюється. Зрозуміло, періоди напіврозпаду поодиноких радіонуклідів дуже великі, бо інакше за час існування Землі вони мали б практично повністю розпастися.

Таблиця 2.4.1.

Характеристика поодиноких радіонуклідів земного походження

Радіонуклід	Ізотопне збагачення, %	Період напіврозпаду, роки	Головні типи випромінювання /енергія МеВ/ вихід, %	Питома активність елемента, Бк/л
^{40}K	0,012	$1,26 \times 10^9$	$\beta/1,33/89$ $\gamma(\text{E3})^*/1,46/11$	31,6
^{50}V	0,250	$6,0 \times 10^{15}$	$\gamma(\beta^-)/0,78/30$ $\gamma(\text{E3})/1,55/70$	$1,1 \times 10^{-4}$
^{87}Rb	27,000	$4,8 \times 10^{10}$	$\beta/0,28/100$	$8,9 \times 10^2$
^{115}In	95,800	$6,0 \times 10^{14}$	$\beta/0,78/100$	0,18
^{123}Te	0,870	$1,2 \times 10^{14}$	E3/-/	0,08
^{138}La	0,089	$1,12 \times 10^{11}$	$\beta/0,21/80$ $\gamma(\text{E3})/0,81; 1,43/70$	0,77

¹⁴² Ce	11,070	$>5,0 \times 10^{16}$	$\alpha/-/-$	$0,9 \times 10^{-2}$
¹⁴⁴ Nd	23,900	$2,4 \times 10^{15}$	$\alpha/1,83/-$	$0,92 \times 10^{-2}$
¹⁴⁶ Sm	13,820	$>1,0 \times 10^{15}$	-	129,5
¹⁴⁷ Sm	15,100	$1,05 \times 10^{11}$	$\alpha/2,23/-$	$5,07 \times 10^{-2}$
¹⁴⁸ Sm	11,270	$>2,0 \times 10^{14}$	-	$1,22 \times 10^{-2}$
¹⁵² Cd	0,200	$1,1 \times 10^{14}$	$\alpha/2,1/-$	$1,6 \times 10^{-3}$
¹⁵⁶ Dy	0,052	$>1,0 \times 10^{14}$	-	$4,4 \times 10^{-8}$
¹⁷⁴ Hf	0,163	$2,0 \times 10^{15}$	$\alpha/2,5/-$	$6,2 \times 10^{-5}$
¹⁷⁶ Lu	2,600	$2,2 \times 10^{10}$	$\beta^-/0,43/-$	88,8
¹⁸⁰ Ta	0,012	$>1,0 \times 10^{12}$	-	$0,9 \times 10^{-2}$
²²⁶ Re	62,900	$4,3 \times 10^{10}$	$\beta^-/0,003/-$	1036
¹⁹⁰ Pt	0,013	$6,9 \times 10^{11}$	$\alpha/3,18/-$	$1,3 \times 10^{-2}$

*ЕЗ – електронне захоплення

З даних табл. 2.4.1. випливає, що найбільше значення, як джерело іонізуючого випромінювання, має калій. Ядра радіоактивних ізотопів ⁴⁰K розпадаються таким чином: 89% ядер, що зазнають радіоактивного перетворення за типом бета-розпаду, утворюють ізотопи ⁴⁰Ca, а решта 11% – шляхом електронного захоплення перетворюються на ⁴⁰Ar. За акт радіоактивного розпаду виділяється енергія 1,35 МеВ.

Сімейства важких природних радіоактивних елементів. Важкі природні радіоактивні елементи відрізняються від поодиноких радіонуклідів тим, що вони пов'язані між собою як продукти послідовних радіоактивних перетворень у трьох групах елементів, що дістали назву радіоактивних сімейств. Практичне значення в природі мають три радіоактивні сімейства: урану-радію, родоначальником якого є ²³⁸U, актиноурану (²³⁵U), торію, родоначальником якого є ²³²Th.

У біосфері радіонукліди важких елементів містяться в будь-яких природних матеріалах у розсіяному стані. В ґрунтах важкі природні радіоактивні ізотопи можуть міститися в кристалічних ґратках алюмосилікатних мінеральних частинок, у формі розчинних у воді основ, у вигляді іонів і молекул, адсорбованих органічними й глинистими колоїдами, а також у формі окисних та інших важкорозчинних сполук. Лише в деяких із цих форм радіонукліди доступні для живих організмів, зокрема рослин, а відтак, здатні до біогеохімічної міграції. Співвідношення між доступними й малодоступними формами радіонуклідів важких природних елементів істотно залежить від типу ґрунту, кислотності ґрунтового розчину, обмінної ємності та деяких інших властивостей ґрунтів.

Середні значення коефіцієнтів накопичення важких радіоактивних елементів у рослинах здебільшого доволі низькі – порядку 10^{-3} , проте іноді спостерігаються й істотні коливання їх у межах $(0,01...60)10^{-3}$.

Найвагомішим радіонуклідом щодо дозоутворення найчастіше буває дочірній продукт ²²⁶Ra – ²²²Rn. Середня концентрація цього радіонукліда в повітрі за межами приміщень варіює в межах $(0,37...1,85)10^{-2}$ Бк/л. До благородних газів належить також і продукт розпаду ²²⁴Ra із сімейства ²³²Th – (²²⁰Rn). Радон і торон дифундують із ґрунту в атмосферу. Навесні, внаслідок розморожування шару ґрунту, часом спостерігається вихід у атмосферу значних активностей радону, який нагромадився за зиму.

В приміщеннях будівель, споруджених із матеріалів, що мають підвищений вміст радію, концентрація радону може досягати небажано високих значень. Розпад радіонукліда ²²²Rn супроводжується появою низки короткотривалих

ізоотопів, які в ході радіоактивних перетворень випромінюють α - і β -частинки. Ці дочірні радіонукліди адсорбуються пиловими частинками, котрі в такий спосіб стають носіями радіоактивності й, потрапляючи під час дихання в організм, зумовлюють формування інгаляційної дози. В організмі людини 80 % радію міститься в кістках. Середня активність радію в тілі становить 0,85 Бк, хоча буває й вищою (до 3,7 Бк у кістяку).

Радіаційний фон – це фон, що створюється космічним випромінюванням, природними і штучними радіоактивними речовинами та джерелами іонізуючого випромінювання.

У різних регіонах нашої планети радіаційний фон різний. Він збільшується у регіонах, де є родовища уранових руд, радіоактивних сланців тощо. Чим вище над рівнем моря, тим інтенсивнішою є радіація, оскільки повітря значною мірою захищає Землю від космічного випромінювання. Так, доза опромінення протягом року на рівні моря становить 0,3 мЗв, на висоті 4000 м над рівнем моря – 1,7 мЗв, а на висоті 12 км вона зростає у 25 разів. Тому опромінення при польотах залежить від висоти і тривалості польоту.

Доза опромінення людини від природної радіоактивності (сумарна річна доза становить 4,88 мЗв) формується за рахунок таких складових:

- внутрішнього β - опромінення (0,2 мЗв, 4,1%);
- космічного випромінювання (0,3 мЗв, 5,9%);
- природного γ -фону (0,15 мЗв, 3,1%);
- ^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{222}Rn у воді (0,17 мЗв, 3,5%);
- радіоактивності будівельних матеріалів (0,26- мЗв, 5,5%);
- ^{222}Rn у повітрі (3,8 мЗв, 77,9%).

2.5. Антропогенні джерела іонізуючих випромінювань

Значний внесок у підвищення радіаційного фону дають антропогенні джерела випромінювань:

- ядерні установки (реактори АЕС, склади атомної зброї, підприємства з переробки радіоактивних відходів, речовин);
- промислові прилади дозиметричного контролю, які широко використовуються у виробництві при неруйнівних методах контролю якості виробів;
- випробовування ядерної зброї у різних середовищах Землі;
- промислові процеси, що збільшують дозоутворювальну здатність природних радіонуклідів;
- використання іонізуючих випромінювань у медицині для діагностики й терапії;
- наукові дослідження із застосуванням методу мічених радіоактивних атомів.

Атомна енергетика. Виробництво електроенергії на атомних електростанціях супроводжується викидами радіонуклідів у довкілля навіть за нормальних умов експлуатації. Експлуатація реакторів супроводжується викиданням у довкілля продуктів поділу урану, виникають внаслідок ядерних реакцій, що здійснюються за участю потоків нейтронів: ^{60}Co , ^{14}C , ^3H , благородні газы ^{85}Kr , ^{133}Xe . Викидаються в довкілля також ізоотопи йоду. Для забезпечення атомних електростанцій паливом здійснюється так званий

ядерний паливний цикл: видобування й переробка уранової руди, виробництво ядерного палива, експлуатація ядерних реакторів, переробка відпрацьованого ядерного палива, транспортування радіоактивних відходів, їх поховання. У ході технологічних процесів радіоактивні речовини потрапляють у довкілля.

Випробовування ядерної зброї. За період з 1945 по 1980 р. здійснено більш як 400 ядерних вибухів у атмосфері. Найінтенсивніше випробування ядерної зброї проводилися в 1957 – 1958 й 1961 – 1962 рр. – здійснено 128 вибухів атомних бомб. Випробування атомної зброї супроводжується викидами великої кількості радіонуклідів, що виникають внаслідок поділу урану, а також у ядерних реакціях за участю нейтронів. Найбільшу небезпеку для сучасного й майбутніх поколінь становлять радіонукліди з великими періодами напіврозпаду: ^{14}C ($T_{1/2} = 5730$ років), ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30$ років), ^{90}Sr ($T_{1/2} = 30$ років), тритій ($T_{1/2} = 12$ років). Найважливіша роль у формуванні піввікової дози належить радіо вуглецю. Із трансурановими елементами нагромаджуються дози на дуже тривалий період – тисячі років (бо саме такий період напіврозпаду цих ізотопів). Найнебезпечніші з них є ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am .

Промислові процеси. До промислових процесів, які призводять до винесення на поверхню землі матеріалів, у яких концентрація природних радіоактивних елементів перевищує середній рівень, належить насамперед видобування урану, виробництво та використання фосфорних добрив, виробництво електроенергії, на теплових електростанціях, використання геотермальної енергії, що є джерелом додаткового опромінення.

Використання іонізуючих випромінювань у медицині. Опромінення в медичних цілях зумовлює істотну складову дози, поглинутої людиною. Опромінення відбувається під час проведення рентгенодіагностики, внаслідок вживання препаратів, до складу яких входять радіоактивні речовини, з метою діагностики, у ході проведення радіаційної терапії. Встановлено, що щорічна середня доза опромінення від застосування медичної техніки становить 0,4 – 1 мЗв. Найбільшою дозою опромінення супроводжується рентгенографія грудної порожнини.

Перелік запитань для контролю знань

1. Дайте визначення поняттям «іонізуюче випромінювання», «радіація».
2. Дайте характеристику типам іонізуючих випромінювань.
3. Які із випромінювань характеризуються найбільшою іонізаційною здатністю?
4. Розкрийте суть явища радіоактивності.
5. Охарактеризуйте будову атома.
6. Поясніть процес збудження атома та іонізації.
7. Вкажіть сили, що забезпечують стійкість атома.
8. Якою формулою виражається основний закон радіоактивного розпаду?
9. Назвіть одиниці радіоактивності.
10. Вкажіть основні джерела іонізуючих випромінювань.
11. Назвіть радіоактивні сімейства та з'ясуйте послідовність радіоактивних перетворень.
12. Назвіть радіоізотопи, які належать до поодиноких природних радіонуклідів.

ТЕМА 3. ДОЗИМЕТРІЯ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

3.1. *Поняття дози іонізуючого випромінювання. Види доз та одиниці їх виміру.*

3.2. *Способи передавання дози опромінюваним об'єктам.*

3.3. *Класифікація потужностей доз опромінення.*

3.4. *Методи дозиметрії.*

3.5. *Апаратура для дозиметричних і радіометричних досліджень.*

Дозиметрія (від грец. «*dosis*» – частка, порція і «*metreo*» – вимірюю) – розділ прикладної ядерної фізики, який розглядає фізичні величини, що характеризують поле випромінювання, або взаємодію випромінювання з речовиною, а також принципи і методи визначення цих величин.

Методи дозиметрії дозволяють визначати дози випромінювання в різних речовинах, насамперед у тканинах живого організму для виявлення, оцінки і попередження будь-якої можливої радіаційної небезпеки для людини та для розробки спеціальних засобів радіаційного захисту.

3.1. Поняття дози іонізуючого випромінювання. Види доз та одиниці їх виміру

Всі види радіоактивного випромінювання супроводжуються звільненням різної кількості енергії і високою проникною здатністю, відтак вони мають різний вплив на живі організми і екосистеми взагалі.

Пошкодження, викликані в живих організмах опроміненням, є тим більшими, чим більше енергії передано їхнім тканинам. Кількість енергії, яку виділяє джерело випромінювання або яка передається об'єкту опромінення називається *дозою*.

Дозу іонізуючого випромінювання людина може зазнати від будь-якого радіонукліда або їхньої суміші незалежно від того, містяться вони поза організмом або всередині нього.

Поглинута доза – це енергія іонізуючого випромінювання, яка поглинута речовиною, що опромінюється (повітря, тканини організму), в перерахунку на одиницю маси.

Одиницею поглинутої дози в системі СІ є грей (1 Гр = 1 Дж енергії, поглинутий масою в 1 кг). Позасистемною одиницею – рад «radiation absorbed dose» (енергія в 1 ерг поглинута в масі 1г). Один рад дорівнює 0,01 Гр.

Якщо кількість поглинутої енергії гамма- або рентгенівського випромінювання розглядати не для речовини, а для повітря, то слід ввести поняття його іонізації. Причому, для атмосфери існує спеціальна одиниця, яка співвідносить заряд іонів кожного знаку в 1 см³ сухого повітря, що виникло у процесі його іонізації з дозою цього випромінювання. Загальний обсяг випромінювання, що викликає іонізацію називають **експозиційною дозою**, яка в системі СІ вимірюється в кулонах на кілограм (Кл/кг). Поряд існує позасистемна одиниця вимірювання – рентген (1Р = 2,58 × 10⁻⁴ Кл/кг).

Рентген – це така кількість іонізуючих випромінювань, яка утворює в 1 см^3 сухого повітря при нормальних умовах біля $2 \text{ млрд. пар іонів}$. $1 \text{ Р} = 2,08 \cdot 10^9$ пар іонів на 1 см^3 повітря.

Велику роль в опроміненні всього живого в екосистемі відіграє не лише кількість іонізуючого випромінювання, поглинутого тілом, а й якість цього випромінювання. Якісна характеристика випромінювання визначається показником лінійної щільності іонізуючого потоку. Вважається, що щільність бета-, гамма- і рентгенівського випромінювання є однаковою, умовно вона приймається за одиницю. Тоді показник щільності повільних нейтронів дорівнює 5, звичайних нейтронів – 10, а для α -частинок та надшвидких нейтронів – 20. Перераховану в такий спосіб дозу опромінення називають еквівалентною дозою. Її у системі СІ вимірюють у зівертах (Зв).

Еквівалентна доза – це поглинута доза, помножена на коефіцієнт якості випромінювання, який враховує здатність певного виду випромінювань пошкоджувати тканини організму. Коефіцієнт якості випромінювання є найбільшим для α -випромінювання і дорівнює 20. Коефіцієнт якості для β - та γ -випромінювання становить 1.

Позасистемною одиницею еквівалентної дози є **біологічний еквівалент ради (бер)**. **Бер** – це така кількість енергії будь-якого виду випромінювання, поглинутої в 1г тканини при якій спостерігається такий же радіобіологічний ефект, як при 1 рад фотонного випромінювання. $1 \text{ бер} = 0,01 \text{ Зв}$; $13\text{Зв} = 100 \text{ бер}$.

Водночас важливо врахувати й те, що не всі частини тіла людини (органи, тканини) чи інших організмів екосистем мають однакову чутливість. Наприклад, при однаковій еквівалентній дозі опромінення виникнення раку в легенях людини більш вірогідне, ніж у її щитовидній залозі. Саме тому дози опромінення для різних органів і тканин необхідно перераховувати за різними коефіцієнтами. Підсумувавши ці коефіцієнти по всіх тканинах людини, отримують ефективну еквівалентну дозу. Найменш чутливою до опромінення є шкіра і поверхня кісток людини, а найбільш – яєчники і сім'яники.

Ефективна доза – це еквівалентна доза, помножена на коефіцієнт, який враховує ступінь чутливості різних тканин до впливу іонізуючого випромінювання.

Усе це характеризує лише індивідуальні дози іонізуючого випромінювання. Підсумувавши індивідуальні ефективні еквівалентні дози, здобуті певною групою людей, ми виявляємо **колективну ефективну еквівалентну дозу**, вимірювану в людино-зівертах (люд-Зв).

Більшість радіонуклідів розпадаються надзвичайно повільно, відтак вони залишаються радіоактивними й у далекому майбутньому. Колективну ефективну еквівалентну дозу, яка припадає на кілька поколінь від певного джерела іонізуючого випромінювання за весь час його існування, називають **повною (очікуваною) колективною ефективною еквівалентною дозою**.

З метою прогнозування інтенсивності радіоактивного впливу на довкілля і людину введено поняття **потужності дози**. Відповідні потужності поглинутої, експозиційної чи еквівалентної доз дорівнюють кількості енергії, що отримана будь-якою речовиною за одиницю часу від джерела радіації.

Наприклад, дозиметр показує потужність еквівалентної дози гранітних сходів – 0,8 мкЗв/год. За умов, якщо людина просидить на цих сходах 5 годин, вона отримає таку дозу радіаційного опромінення:

$0,8 \text{ мкЗв/год} \times 5 \text{ год} = 4 \text{ мкЗв}$ (400 мкбер), що в 25-50 разів вище дози отриманої нею від сонячної радіації за аналогічний період часу.

Розглянуті величини доз іонізуючого випромінювання використовують не лише для нормування дозових навантажень людини, але й для всієї екосистеми чи будь-якого її компонента.

Для дозиметричної характеристики ефекту дії іонізуючого випромінювання на довкілля (повітря) і біологічні об'єкти використовують різні одиниці випромінювання: рентген, грей, бер, зіверт та ін., які наведено в таблиці 3.1.1.

Таблиця 3.1.1.

Основні дозиметричні одиниці та їх співвідношення

Дозиметрична одиниця	Одиниця виміру		Співвідношення одиниць
	СІ	позасистемна	
Активність, <i>A</i>	Беккерель, Бк	Кюрі, Кі	$1 \text{ Бк} = 2,7 \times 10^{11} \text{ Кі}$
			$1 \text{ Кі} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк}$
Питома активність, <i>Am</i>	Беккерель на кілограм, Бк/кг	Кюрі на грам, Кі/г	$1 \text{ Кі/г} = 3,7 \times 10^{11} \text{ Бк/кг}$
			$1 \text{ Бк/кг} = 2,7 \times 10^{-14} \text{ Кі/г}$
Експозиційна доза випромінювання	Кулон на кілограм, Кл/кг	Рентген, Р	$1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$
			$1 \text{ Р} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Кл/кг}$
Потужність експозиційної дози	Ампер на кілограм, А/кг	Рентген за секунду, Р/с	$1 \text{ А/кг} = 3879 \text{ Р/с}$
			$1 \text{ Р/с} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Кл/кг}$
Поглинена доза, <i>D</i>	Грей, Гр	Рад	$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$
			$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$
Потужність поглиненої дози, <i>D</i>	Грей за секунду, Гр/с	Рад за секунду, рад/с	$1 \text{ Гр/с} = 100 \text{ рад}$
			$1 \text{ рад/с} = 0,01 \text{ Гр}$
Еквівалентна доза, <i>H</i>	Зіверт, Зв	Біологічний еквівалент раду, бер	$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бер}$
			$1 \text{ бер} = 0,01 \text{ Зв}$
Потужність еквівалентної дози, <i>H</i>	Зіверт за секунду, Зв/с	Бер за секунду, бер/с	$1 \text{ Зв/с} = 100 \text{ бер}$
			$1 \text{ бер/с} = 0,01 \text{ Зв}$
Ефективна доза, <i>E</i>	Зіверт, Зв	Біологічний еквівалент раду, бер	$1 \text{ бер} = 0,01 \text{ Зв}$
			$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бер}$
Щільність забруднення, <i>b</i>	Кюрі на 1 квадратний кілометр, Кі/км ²		$1 \text{ Кі/км}^2 = 3,7 \times 10^4 \text{ Бк/м}^2$

3.2. Способи передавання дози опромінюваним об'єктам

Способи передавання дози опромінюваним об'єктам, тобто часові характеристики опромінення, здебільшого визначають особливості процесів, що розвиваються внаслідок опромінення. За часом передавання дози об'єкту розрізняють кілька способів опромінення: гостре, гостре фракціоноване, нееквівалентне фракціоноване, хронічне з постійною потужністю дози, пролонговане з постійною потужністю дози, пролонговане з змінною потужністю дози, переривчасте.

Якщо дозу дають за порівняно короткий проміжок часу (протягом якого не встигає змінитися фізіологічний стан організму, клітини), опромінення називають *гострим*. Очевидно, гострому опроміненню в дозі D відповідає й інтервал потужностей доз, нижня межа якого $P_{min} = D/t_{max}$, де t_{max} – найбільша тривалість процесу опромінювання, за якої опромінення ще можна вважати гострим.

Якщо нагромадження дози досягається внаслідок кількаразові гострого опромінення відповідною частинкою дози, опромінення називають *гострим фракціонованим*.

Якщо дозу подрібнено на однакові порції, то йдеться про *еквівалентне фракціоноване опромінення*, якщо на різні, – про *нееквівалентне*. Проміжки часу між окремими опромінюваннями також можуть бути однаковими або різними. Найчастіше використовують еквівалентне фракціоноване опромінення двома однаковими порціями дози (по $0,5D$). Гостре фракціоноване опромінення застосовують у рентгено- й радіотерапії при злоякісних пухлинах.

Пролонгованим опроміненням називають такий спосіб радіаційного впливу, коли об'єкт отримує дозу за час, що значно перевищує тривалість гострого опромінення. При цьому під час опромінювання стан об'єкта може істотно змінюватися. Пролонговане опромінення буває *безперервним і фракціонованим*. У разі фракціонованого пролонгованого опромінення можна змінювати порції дози, часові інтервали між ними, тривалість процесу передавання об'єкту кожної порції дози.

Доза пролонгованого опромінення D_{prol} пов'язана з потужністю дози P таким співвідношенням: $D_{prol} = P t$.

Приклад фракціонованого пролонгованого опромінення – передавання дози рослинам, які вирощуються в умовах гамма-поля, де джерело іонізуючого випромінювання вимикається на кілька годин. Пролонгованого безперервного опромінення зазнають організми, які живуть в умовах радіонуклідного забруднення.

Якщо об'єкт зазнає дії іонізуючих випромінювань протягом усього життя, то таке опромінення називають *хронічним*. Потужність дози в разі хронічного опромінення може бути постійною або змінюватися з часом. Дозу, яку отримує організм за хронічного опромінення D_{chr} , називають *довічною*.

3.3. Класифікація потужностей доз опромінення

Традиційно умовно виділяють чотири групи потужностей доз опромінення:

- *надвисокі* (порядку $10^{13} \dots 10^{11}$ сГр/хв), коли доза передається організму за частки секунди (ефект потужності дози залежить від вмісту кисню в середовищі);
- *високі* (порядку $10^6 \dots 10^2$ сГр/хв), коли доза передається кілька хвилин, тобто гостре опромінення (ефект потужності дози не виявляється);
- *низькі* (порядку $10^3 \dots 10^{-1}$ сГр/хв), коли доза передається протягом багатьох годин або днів, тобто пролонговане опромінення (ефект потужності дози виявляється найсильніше);
- *дуже низькі* (порядку до 10^{-1} сГр/хв), коли передавання дози триває тижні, місяці й навіть роки, тобто хронічне опромінення (ефект потужності дози не виявляється).

3.4. Методи дозиметрії

Величини, що характеризують іонізуючі випромінювання. Для проведення екологічного дослідження дії іонізуючого випромінювання на довкілля необхідне розуміння радіаційного поля, тобто простору, в якому реєструється це випромінювання. Специфіку радіаційного поля аналізують методами радіометрії (розділ фізики, що вивчає способи вимірювання енергії випромінювання). У нашому випадку, **радіометрія** – сукупність методів для вимірювання активності (кількість розпадів за одиницю часу) радіонуклідів в радіоактивних об'єктах.

До основних радіометричних параметрів, які вивчаються за допомогою лабораторних методів, відносять:

- кількість альфа- і бета-частинок випромінених, перенесених або поглинутих опромінюваним об'єктом;
- потік іонізуючих частинок або випромінювання;
- щільність потоку іонізуючих частинок та випромінювання;
- міграція іонізуючих частинок або випромінювання;
- енергія іонізуючого випромінювання.

В результаті взаємодії іонізуючого випромінювання з довкіллям передусім відбуваються структурні зміни або розпад (радіоліз) на рівні молекул і атомів. Ці зміни супроводжуються подальшими молекулярними перетвореннями, що зумовлюють появу нових хімічних речовин і впливають на трансформаційні процеси в екосистемах. Вивчення процесів перетворення екосистем на молекулярному рівні неможливе у польових умовах за допомогою простих й компактних дозиметрів. Воно потребує проведення детальних досліджень у спеціально обладнаних наукових лабораторіях з радіометрії чи радіоспектроскопії.

Відомо чимало різних методів радіометрії, радіоспектроскопії та радіоекологічного контролю складових довкілля, які слід проводити в лабораторних умовах. Серед них особливе місце посідає група радіаційно-хімічних методів.

Радіаційно-хімічні методи. Дія іонізуючого випромінювання на хімічні сполуки супроводжується зміною їхнього складу. Кількість молекул, що зазнали відповідних перетворень, залежить від дози їхнього опромінення. На цьому принципі ґрунтується дія хімічних дозиметрів.

Для визначення особливостей радіаційно-хімічних реакцій речовини застосовуються різні методи досліджень, з яких найчастіше використовують спектроскопію, а також методи реєстрації флуоресценції й хемілюмінесценції.

Методи спектроскопії і люмінесценції дають можливість виявлення первинних хімічних форм, що виникають унаслідок поглинання енергії іонізуючого випромінювання, а також домагають вивчати природу походження певних станів молекул і атомів, реєструвати проміжні продукти радіаційно-хімічних перетворень речовин із дуже коротким періодом існування.

Для вивчення швидкоплинних процесів радіолізу застосовують різні методи спектроскопії, зокрема абсорбційну спектроскопію, раманову резонансну спектроскопію, спектроскопію електронного парамагнітного резонансу. Використовуючи ці методи, об'єкт дослідження опромінюють певними нормованими порціями радіації, спостерігаючи за появою нових хімічних форм.

Люмінесценція, що супроводжує процес опромінення деяких хімічних речовин радіацією, також дає можливість вивчити явища трансформації екосистем на молекулярному рівні. Збуджені іонізацією електрони випромінюють флуоресцентне або люмінесцентне світло, що дає змогу досліджувати процеси заміни катіон-електронних пар у хімічних розчинах.

Окрім радіаційно-хімічних і радіоспектроскопічних методів, використовують й інші лабораторні методи радіометрії та радіоекологічного контролю, які мають свою специфіку:

- 1) авторадіографічний;
- 2) іонізаційний;
- 3) напівпровідниковий;
- 4) сцинтиляційний;
- 5) калориметричний;
- 6) біологічний.

Авторадіографічний метод полягає в аналізі інформації за допомогою фотографічних зображень, одержаних у результаті дії іонізуючого випромінювання від об'єктів дослідження на різні фоточутливі матеріали. Цей метод використовують для визначення просторової локалізації джерел високої радіоактивності в межах досліджуваного об'єкта. Як фоточутливі матеріали використовують рентгенівську чи фотополімерну плівки, різні фотопластинки і особливі ядерні емульсії. Більш темні плями на фотоматеріалі (плівці, папері, склі) свідчать про вищий рівень іонізації, менш темні – менший рівень іонізації, а світлі – вказують на відсутність іонізації. Це одержало назву авторадіограми (радіоавтографу), тобто, фотографічного зображення розподілу радіоактивних речовин у об'єкті, що досліджується. А слід, полосу, що залишає іонізація на фотоматеріалі називають “трек”. Розрізняють макроавторадіографію та мікроавторадіографію. Мікроавторадіографія вимагає готувати фіксовані препарати окремих органів.

Іонізаційний метод ґрунтується на здатності радіоактивних частинок рухатися з великою швидкістю, спричиняючи іонізацію газів. Іонізаційні дозиметри являють собою герметичні камери, заповнені певним газом, з двома підведеними електродами, до яких під'єднано високу напругу. Як тільки у камері з'являються носії електричного заряду (іони), виникає імпульс струму, силу якого реєструють за допомогою високочутливого гальванометра.

Напівпровідниковий метод здійснюється за допомогою приладів, в яких за детектор іонізуючого випромінювання служить напівпровідник, електропровідність якого змінюється під впливом радіації. Більшість напівпровідників реагують лише на нейтронне випромінювання, тому їх переважно використовують у радіометрії нейтронів.

Сцинтиляційний метод. Високочутливим щодо реєстрації іонізуючого випромінювання вважається метод, що ґрунтується на використанні сцинтиляторів – органічних чи неорганічних речовин у вигляді хімічних розчинів або кристалів, наприклад йодиду натрію, нафталіну, антрацену. У сцинтиляторах під дією іонізуючого випромінювання виникають світлові спалахи, які реєструються за допомогою фотоелектронного множника. Цей ефект застосовують у сцинтиляційних дозиметрах.

Хімічний метод. Під дією іонізуючого випромінювання деякі речовини можуть перетворюватися на інші, змінювати забарвлення тощо. Це дає можливість спостерігати за ходом накопичення дози, визначити точне значення.

Калориметричний метод використовується для вимірювання надзвичайно високих потужностей дози. Він дає можливість стежити за ситуацією, що відбувається в ядерному реакторі.

Біологічний метод заснований на врахуванні біологічних ефектів, котрі виникають у опроміненому організмі. Деякі види рослин і тварин є надзвичайно чутливими до дії іонізуючого випромінювання і разом з тим вони не реагують на багаторазове повторення їхнього опромінення. Реакцію таких біологічних об'єктів на опромінення використовують як оригінальні радіобіологічні дозиметри.

Таким чином, кожен з перерахованих методів займає певне незамінне місце у виявленні іонізуючих випромінювань. Крім розглянутих лабораторних радіометричних методів відомі й інші методики радіометрії, які виникли в результаті синтезу науково-методичних підходів у радіаційній фізиці, радіаційній хімії, радіобіології і радіаційній генетиці. Це значно розширює можливості радіологічних досліджень.

3.5. Апаратура для дозиметричних і радіометричних досліджень

Для якісного та кількісного аналізу складу випромінювання, а також радіонуклідного складу розроблено цілий сектор приладів. Залежно від способу застосування і методу реєстрації даних прилади класифікують на:

- дозиметри;
- радіометри;
- радіометри радону;
- гамма-спектрометри;
- бета-спектрометри;
- альфа-спектрометри;
- спектрометри вимірювання людини СВЛ;
- рентгенометри.

Дозиметри – прилади індивідуального дозиметричного контролю, призначені, як правило, для визначення поглинутої або еквівалентної дози фотонного та нейтронного опромінення людини у надзвичайних ситуаціях. Обов'язково використовуються у випадках, коли є ймовірність перевищення еквівалентної дози $1/3$ частини ліміту дози, встановленого НРБУ-97 для опромінення осіб категорії А.

Радіометри – прилади, що призначені для визначення інтенсивності потоку частинок та квантів іонізуючих випромінювань за одиницю часу. За їх допомогою визначають концентрацію радіоактивних речовин в об'єктах навколишнього середовища та біологічних речовинах, питому активність, щільність забруднення різних поверхонь.

α , β , γ -спектрометри застосовують для визначення якісного і кількісного аналізу α , β , γ -випромінювань радіонуклідів, відповідно, в об'єктах навколишнього середовища, продукції сільського і лісового господарства, продуктах харчування, будівельних матеріалів тощо. Ці аналізатори

складаються з відповідного детектора, блоку формування електричних сигналів від детектора, багатоканального аналізатора і обчислювального приладу.

Рентгенометри – прилади, що призначені для визначення потужності дози фотонного випромінювання в повітрі.

Класифікація цих приладів умовна. Деякі з приладів є універсальними і можуть виконувати функцію як рентгенометра, так і радіометра і дозиметра. Все залежить від конструктивних властивостей приладу. Дозиметричні прилади різного функціонального призначення повинні відповідати вимогам радіологічного контролю.

Залежно від конструктивних властивостей прилади поділяють на:

- стаціонарні;
- переносні;
- комбіновані.

За методами виявлення іонізуючих випромінювань та в залежності від типу детектора прилади поділяють на:

- іонізаційні;
- сцинтиляційні;
- люмінесцентні;
- фотографічні;
- хімічні;
- калориметричні;
- нейтронно-активаційні;
- біологічні.

Перелік запитань для контролю знань

1. Що є предметом вивчення дозиметрії?
2. Дайте визначення еквівалентної і ефективної дози.
3. Вкажіть співвідношення між одиницями: *рентген, грей, бер, зіверт* .
4. Які ви знаєте способи передавання дози опромінюваним об'єктам?
5. Назвіть основні методи радіометрії.
6. Для яких цілей призначені α , β , γ -спектрометри ?
7. Назвіть основні радіометричні параметри іонізуючих випромінювань, які вивчаються за допомогою лабораторних методів.

ТЕМА 4. БІОЛОГІЧНІ ЕФЕКТИ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

4.1. *Поняття радіобіологічного ефекту.*

4.2. *Первинні й вторинні процеси у формуванні радіаційного ураження клітин і багатоклітинного організму.*

4.3. *Детерміністичні й стохастичні радіобіологічні ефекти.*

4.4. *Соматичні й генетичні радіобіологічні ефекти.*

4. 1. *Поняття радіобіологічного ефекту*

Ефекти опромінення біологічних систем дуже різняться за рівнем реалізації, формою прояву, а також за часом їх здійснення, який варіює від мільйонних часток секунди до багатьох десятків років.

Радіобіологічний ефект – відповідь живої клітини або багатоклітинного організму на опромінення. Реалізується в послідовності окремих явищ, які відбуваються на різних рівнях біологічної системи.

У радіобіології розрізняють такі *рівні реалізації радіобіологічних ефектів* у біологічних системах:

- радіаційно-фізичних взаємодій;
- первинних радіаційно-хімічних реакцій;
- радіаційних перетворень біологічно важливих молекул;
- індукованих опроміненням порушень молекулярно-біологічних процесів;
- радіобіологічних реакцій клітинних органел;
- клітинних реакцій;
- реакцій клітинних популяцій;
- реакцій органів і системи органів;
- реакцій інтактного організму;
- біоценотичний;
- системи, що еволюціонує.

Радіобіологічний ефект розпочинається з поглинання об'єктом енергії іонізуючого випромінювання (процесом суто фізичним), і завершується кінцевим проявом на відповідному рівні біологічної системи. Тому є підстава стверджувати, що формування будь-якого радіобіологічного ефекту – це кілька етапний процес, і кожному з етапів відповідають певні міри.

На етапі поглинання енергії мірою радіобіологічного ефекту є поглинута доза, на етапі переходу молекул в іонізовані та збуджені стани – виходи первинних продуктів дії радіації. При ушкодженні біологічно важливих молекул мірою ефекту є виходи продуктів прямої й непрямої дії радіації, при порушенні регуляції метаболізму – параметри зміни характеристик метаболізму як наслідок радіаційного ураження. Параметри зміни клітинного циклу, поведінки клітинних популяцій, морфогенезу багатоклітинного організму є показниками етапу порушення регуляції онтогенезу. На формування генетичних ушкоджень вказують виходи цитогенетичних і генетичних ушкоджень.

Часові характеристики радіобіологічних реакцій на зазначених рівнях дуже різні: від порядку 10^{-15} - 10^{-4} с (радіаційно-хімічні процеси) до десятків років (радіобіологічні відповіді на рівні популяцій клітин, системи органів, тощо).

Таблиця 4.1.1.

Часові характеристики радіобіологічних реакцій

<i>Типи реакцій</i>	<i>Тривалість перебігу</i>	<i>Головні процеси радіаційного ураження</i>
Радіаційно-хімічні	10^{-15} .-. 10^{-4}	Утворення вільних радикалів Первинний розмін енергії іонізуючих квантів або частинок
Фізико-хімічні	Частки секунди	Дифузія вільних радикалів, іонів та кисню
Клітинні	Хвилини - години	Репарація клітин Зміни метаболізму Перебудова мембранної системи Поділ клітини
Соматичні	Дні - роки	Порушення морфогенезу Канцерогенез Зміна тривалості онтогенезу
Генетичні	Багато десятиліть	Формування мутації
Еволюційні	Багато десятиліть	Міграція генних мутацій Сукцесійні процеси

У міру ускладнення біологічної системи формування радіобіологічних ефектів дедалі більше зумовлюється не прямими радіаційними ушкодженнями молекулярних структур клітини, а спричиненими цим вторинними «нашаруваннями» метаболічного, цитогенетичного і фізіологічного характеру.

4.2. Первинні й вторинні процеси у формуванні радіаційного ураження

У радіаційно-хімічних реакціях до **прямих ефектів опромінення** належать ушкодження молекул під час безпосереднього передавання їм енергії фотона або зарядженої частинки.

До **опосередкованих ефектів** належать ушкодження молекул внаслідок дії на них активних хімічних форм, що виникли в результаті прямих радіаційно-хімічних перетворень.

Під **первинними процесами** розуміють ушкодження біологічно важливих молекул унаслідок прямого передавання їм енергії іонізуючого випромінювання чи в результаті атакування хімічно активними продуктами, що виникають під час опромінення складних хімічних сумішей або розчинів. Отже, первинні процеси охоплюють пряму й непряму дію іонізуючого випромінювання, тобто біофізичні й радіаційно-хімічні процеси.

З появою змінених унаслідок опромінення біологічно важливих молекул розпочинаються **вторинні процеси**. Ці процеси охоплюють низку клітинних явищ, в яких беруть участь ушкодження молекули, що спричинює формування летального ураження клітини. До таких явищ належать реплікація ДНК, якщо йдеться про радіаційне ушкодження молекули. В разі реплікації відбувається дублювання ушкодження ДНК з появою двониткового розриву подвійної спіралі. За подальшого поділу клітини з таким двонитковим розривом ДНК може настати проліферативна загибель клітин унаслідок формування хромосомної аберації. Якщо ж інактивації зазнала молекула білка, котра до того ж має унікальний для клітини характер, та розвиток вторинних процесів

відображує дефіцит певної функції здійснення якої потребує наявності ушкодженої опроміненням молекули білка.

Якщо ж первинний процес завершився порушенням молекулярної структури, яка забезпечує перетворення сигналів, що визначають функціональну орієнтованість клітинних процесів, що спостерігається. У таких активних реакціях реалізується стратегія виживання клітини або багатоклітинного організму.

4.3. Детерміністичні й стохастичні радіобіологічні ефекти

За характером дозових залежностей розрізняють радіобіологічні реакції двох типів:

- 1) від значення дози залежить інтенсивність їх прояву;
- 2) від значення дози залежить частота їх прояву.

Ефекти першого типу називають **детерміністичними**. До них належать, наприклад: променева хвороба, яка проявляється комплексом патологічних змін – *радіаційним синдромом*; численні прояви радіаційного ураження – гальмування процесів росту, уповільнення просування клітин клітинним циклом, індукція безплідності, розлади імунної системи тощо.

Детерміністичні радіобіологічні ефекти не мають рис, які притаманні ймовірнісному процесові: опромінення в певній дозі провокує радіаційне ураження відповідного рівня.

За дуже малих доз опромінення детерміністичні ефекти можуть не проявлятися, що свідчить про існування *дозового порога* – межі дозового навантаження, лише в разі перевищення якого проявлятиметься ефект. Інтенсивність прояву радіобіологічного детерміністичного ефекту є функцією дози. Значна частина детерміністичних ефектів є наслідком багатоетапних процесів розвитку радіаційного ураження.

Ефекти другого типу називають **стохастичними (ймовірнісними)**. До них належать такі реакції біологічної системи на опромінення, прояв яких характеризується ймовірнісною величиною: після опромінення радіобіологічний ефект може проявитись, а може й не проявитись. Інтенсивність прояву стохастичного ефекту не залежить від дози (від неї залежить частота його прояву).

Стохастичними ефектами є: втрата проліферативної активності клітиною як наслідок цитогенетичних ушкоджень, поява мутацій, трансформація клітин, що супроводжується канцерогенезом.

Утрата проліферативної активності клітини, що проявляється в припиненні поділів, є наслідком ймовірнісних за своєю природою цитогенетичних ушкоджень.

Формування точкових мутацій того чи іншого гена спричиняє відповідними структурними перебудовами в ділянках генів, відкладення енергії випромінювання в яких є ймовірнісним процесом.

Оскільки трансформацією клітин розпочинається пухлинне переродження тканини, то формування злоякісних пухлин, індукованих опроміненням, також є стохастичним ефектом.

До стохастичних ефектів належать і поява хромосомних аберацій.

Для прояву стохастичних ефектів іноді потрібні досить тривалі проміжки часу після опромінення: первинні ушкодження ДНК молекул можуть реалізуватись у віддалених нащадків опромінених у кількох їх поколіннях.

4.4. Соматичні й генетичні радіобіологічні ефекти

Соматичні радіобіологічні ефекти – це зміни, що відбуваються в організмі протягом його онтогенезу – періоду індивідуального розвитку.

Серед соматичних ефектів виділяють: радіаційну стимуляцію; морфологічні зміни; променеву хворобу, прискорення старіння; загибель.

Радіаційна стимуляція – прискорення росту та розвитку організму внаслідок дії іонізуючого випромінювання. Вперше радіаційну стимуляцію було описано французькими вченими М.Мальдінеєм та К Тувіненом в 1898 році, як явище прискорення проростання опроміненого насіння. Дози опромінення були в десятки разів нижчі за ті, що спричиняють гальмування зазначених процесів.

В умовах радіобіологічної лабораторії при наявності джерела іонізуючого випромінювання можна підібрати для насіння, проростків, вегетативних рослин, мікроорганізмів, комах, тварин та інших організмів будь-якого виду дозу, при якій спостерігається ефект радіаційної стимуляції. Ці дози варіюють у досить широких межах, що залежить від чутливості організмів до іонізуючого випромінювання, їх фізіологічного стану, виду випромінювання та інших факторів.

Радіобіологічні дослідження з лабораторними щурами, мишами, морськими свинками, свідчать про те, що при малих дозах у ссавців спостерігається прискорення росту, збільшення маси тіла, підвищення плодючості.

Слід зазначити, що радіаційна стимуляція спостерігається не тільки при одноразовому, а й при хронічному опроміненні, коли рослини і тварини опромінюються протягом усього періоду розвитку або значної її частини.

Морфологічні зміни – зміни зовнішнього вигляду організму, окремих його органів, анатомічної структури, ознак, що відрізняють його від батьківських форм. Ці ознаки не є спадковими, а відхилення від норми. Особливо характерні вони для рослин: часто спостерігається збільшення або зменшення розмірів і кількості листків, зміна їх форми, скручуваність, зморшкуватість, порушення жилкування, асиметричність, потовщення, зрощення листкових пластинок, розсічення листка на частини, зміна кольору, утворення пухлин, некротичних плям, втрата листкової пластинки та ін. Багато з цих ознак можуть виникати і стеблі, корінні, квітках, плодах, насінні.

У тварин морфологічні зміни можна виділити не завжди. Однак, при опроміненні дорослих особин ушкоджуються клітини тканин, що перебувають у стані поділу. Можуть виникати морфологічні зміни: кольору шкіри й волосяного покриву, випадання волосся, припинення росту рогових утворень, катаракта, зміни розмірів і форм окремих органів, різні ступені дистрофії, утворення пухлин на різних органах тощо.

Променева хвороба – це загальне порушення життєдіяльності організму, яке характеризується глибокими функціональними і морфологічними змінами всіх його систем і органів внаслідок ушкодження їх різними видами іонізуючих випромінювань.

В залежності від дози, потужності дози, а також кратності і тривалості опромінення тварин променева хвороба може протікати гостро або хронічно.

Гостра променева хвороба – це загальне захворювання, при якому пошкоджуються всі системи організму. Виникає гостра променева хвороба внаслідок короткотривалого (до 4 діб) впливу доз зовнішнього опромінення, або при надходженні до організму радіоактивних речовин, створюючи в тілі поглинуту дозу понад 1Гр.

В розвитку гострої променевої хвороби виділяють чотири періоди: початковий (період первинних реакцій на опромінення); другий – латентний або прихований (період уявного благополуччя); третій – (виражених клінічних ознак променевої хвороби); четвертий – період відновлення (повного або часткового одужання) та чотири ступені її проявів: легкий, середньої важкості, важкий, дуже важкий.

Вказані періоди захворювання на променеву хворобу спостерігаються у всіх сільськогосподарських тварин опромінених напівлегальною і більшою дозою.

Хронічна променева хвороба – це хвороба, яка виникає внаслідок багатократного і повторювального, впродовж тривалого часу, зовнішнього опромінення малими дозами, а також при надходженні до організму радіоактивних ізотопів, які тривалий час затримуються в тканинах і органах.

При хронічній променевій хворобі ушкоджуються майже всі системи і органи тварин. Встановлено, що на ранніх етапах хвороби спостерігаються функціональні порушення (дистрофія органів, пригнічується імунна система, настає безпліддя). Через рік можливий розвиток лейкозів і злоякісних новоутворень.

Легка форма хронічної променевої хвороби характеризується змінами складу крові (кількість клітин крові перебуває на нижній межі норми). Спостерігається раннє старіння організму.

Для середньої форми хронічної променевої хвороби характерне пригнічення функції органів кровотворення. Порушується обмін речовин, функціональна недостатність органів травлення, нервової, серцево-судинної систем. Хвороба ускладнюється різними інфекційними хворобами, що нерідко спричиняє загибель організму.

Тяжка форма хронічної хвороби характеризується виникненням необоротних змін в організмах, прогресуючим погіршенням загального стану. У тварин випадає шерсть, внаслідок імунобіологічного синдрому розвивається ускладнення інфекційної природи, що спричиняє смерть тварин.

Лікування променевої хвороби. Лікування променевої хвороби повинно бути комплексним. Лікування тварин при зовнішньому опроміненні зводиться, насамперед, до покращень умов їх утримання. Призначають антибіотики, препарати бромю, кофеїну. Рекомендується тваринам, що зазнали опромінення, вводити кров або кровозамінники. В скритий період хвороби застосовують препарати, що зміцнюють стінки кровоносних судин, назначають вітамін С. Саме складне лікування проводять в період найбільшого спалаху променевої хвороби. В цей період застосовують в'яжучі засоби типу дубильних речовин, а також перманганат калію, настій дводомної кропиви. Корм потрібно давати невеликими порціями, а воду не обмежувати. В період видужування застосовують засоби, що стимулюють процеси кровотворення.

Лікування тварин при внутрішньому ураженні. У цих випадках лікування зводиться до зменшення всмоктування радіоактивних речовин та прискорення їх виведення з організму тварин. Щоб досягти цього тваринам вводять адсорбуючі речовини: барій сірчаноокислий, вугілля, білу глину тощо. Для прискорення виведення радіонуклідів з крові тварин застосовують сечогінні засоби. Застосовують і цеоліти.

Віддалені наслідки дії радіації. Розрізняють непухлинні і пухлинні форми віддалених наслідків дії радіації.

Непухлинні форми включають три види патологічних процесів: гіпопластичні стани, склеротичні процеси, дисгормональні стани.

Гіпопластичні стани розвиваються головним чином в кровотворній тканині, слизових оболонках органів травлення, дихальних шляхів, в шкірі і інших органах. Ці порушення настають при дозах опромінення 3-7 Гр. Цей стан важко піддається лікуванню і організм важко відновлюється.

Склеротичні процеси є наслідком пошкодження судинної сітки опромінених органів. Морфологічно вони проявляються такими процесами як цироз печінки, хронічні променеві дерматити, атеросклероз, променеві катаракти, ушкодження нервової системи.

Дисгормональні стани спостерігаються у 50-100% опромінених тварин. Дисгормональний стан проявляється в формі ожиріння або виснаження.

Пухлинні форми. Пухлини виникають найчастіше при опроміненні тварин альфа- і бета-випромінюваннями. При цьому пухлини, зазвичай, виникають в критичних органах.

Частоту появи пухлин у тварин збільшує сукупна дія радіаційних й інших хвороботворних факторів.

Іонізуючі випромінювання можуть викликати також і генетичну дію. Нові ознаки, які набуває організм внаслідок мутацій, можуть бути позитивними і негативними. Слід зазначити, що в більшості випадків мутації бувають негативними і проявляються нерідко підвищеною їх захворюваністю.

Генетичні ефекти – ушкодження, що передаються нащадкам, тобто реалізуються в наступних поколіннях. Вони виникають внаслідок мутацій, тобто їх називають *мутагенними ефектами*.

Мутація – це порушення, що виникають у спадковому матеріалі і призводять до зміни окремих ознак організму або навіть до виникнення нових ознак.

Залежність кількості виниклих мутацій від дози іонізуючого випромінювання має лінійний або близький до лінійного характер. З одного боку, це свідчить про те, що ступінь генетичного ушкодження збільшується прямо пропорційно дозі, а з іншого – на безпороговість цієї радіобіологічної реакції. Тобто, якою б малою не була доза, вона індукуватиме мутації. При підвищенні радіаційного фону, ступеня забруднення продуктів харчування і кормів радіонуклідами ймовірність виникнення мутацій зростає.

Спадкові зміни спостерігаються як у спеціалізованих клітинах, що зазнали диференціації й здебільшого далі не діляться, так і в клітинах твірних тканин (меристемах), у репродуктивних клітинах. Відповідно розрізняються *мутації соматичних клітин* і *мутації гамет* (це стосується лише багатоклітинних організмів, яким властива наявність соматичних і генеративних клітин).

Мутації гамет можуть проявитися в появі *мутантів* – організмів зі зміненими спадковими ознаками. Для підтвердження спадкової природи морфологічних або фізіологічних змін застосовують гібридологічний аналіз.

Перелік запитань для контролю знань

1. Що таке радіобіологічний ефект?
2. Які етапи можна виділити при формуванні радіобіологічного ефекту?
3. Назвіть міри, які відповідають кожному етапу формування радіобіологічного ефекту?
4. Яка роль вторинних процесів у формуванні радіаційного ураження?
5. Назвіть відмінності між детерміністичними й стохастичними ефектами?
6. Наведіть приклади соматичних радіобіологічних ефектів. Укажіть особливості їх прояву.
7. Розкрийте особливості утворення генетичних ефектів.
8. Що називають мутацією?

ТЕМА 5. КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ БІОЛОГІЧНОЇ ДІЇ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

5.1. Основні закономірності біологічної дії іонізуючого випромінювання

5.2. Принципи теорії мішені

5.3. Теорія непрямой дії іонізуючих випромінювань

5.4. Теорія ліпідних радіотоксинів (первинних радіотоксинів і ланцюгових реакцій)

5.5. Структурно-метаболична теорія радіаційного ураження

5.1. Основні закономірності біологічної дії іонізуючого випромінювання

Основний механізм дії радіації пов'язаний з процесами іонізації атомів і молекул біогенної матерії, зокрема молекул води, що міститься в клітинах. Саме вони і піддаються інтенсивному ураженню. Викликані ураження можуть бути зворотними і незворотними, протікати у формі різної тяжкості променевої хвороби, або обумовлювати летальні наслідки.

Існує думка, що іонізація атомів і молекул, яка виникає під дією випромінювання, веде до розривання зв'язків у білкових молекулах, а це призводить до загибелі клітин і ураження усього організму. У формуванні біологічних наслідків іонізуючих випромінювань суттєву роль відіграють продукти радіолізу води, якої в складі організму може бути до 70% його маси. Продукти радіолізу води вступають у хімічну взаємодію з молекулами білків та ферментів, руйнуючи їх, у результаті утворюються сполуки, не властиві живому організму. Це призводить до порушення обмінних процесів, пригнічення ферментних і окремих функціональних систем, порушення життєдіяльності всього організму.

Специфічність дії іонізуючого випромінювання полягає в тому, що інтенсивність хімічних реакцій, індукованих вільними радикалами, підвищується, й у них втягуються багато сотень, тисяч молекул, не уражених іонізуючим випромінюванням. Ефект дії іонізуючого випромінювання зумовлений не кількістю поглинутої енергії об'єктом, який опромінюється, а формою, в якій ця енергія передається. Ніякий інший вид енергії (теплова, електрична), що поглинається біологічним об'єктом у тій самій кількості, не призводить до таких змін, які спричиняє іонізуюче випромінювання.

Радіація діє на субмолекулярні, молекулярні, клітинні, тканинні системи, на органи та системи органів (імунну, нервову, травлення, виділення, розмноження тощо) і на організм як єдине ціле, ушкоджуючи всі рівні життя і здійснюючи вплив на всі феномени живого (ріст, розмноження, спадковість, мінливість, резистентність і тривалість життя). Змінює такі властивості живого як мінливість і спадковість, обумовлює мутації, може бути причиною дрейфу генів, кросинговеру, змінювати напрям доцільного розвитку організму. Вона руйнує інтегруючу, регулюючу функції нервової, імунної, гематогенної систем. Вносить до організму так званий біологічний "безлад". З особливою силою уражається нервова функція на рівні рецепторів, де передача нервових імпульсів здійснюється значною мірою на електричних закономірностях взаємодії молекулярних компонент медіаторів, що мають різні заряди.

Якщо доза опромінення висока або багато разів повторюється, то електрони, атоми не встигають рекомбінуватися, репаруватися. Молекулярні зв'язки не відновлюються. Виходить з ладу велика кількість клітин, робота тканин і органів розладнується. Нормальна життєдіяльність організму стає неможливою.

Особливості іонізуючого опромінення:

- органи чуття не реагують на опромінення;
- малі дози опромінення мають кумулятивний ефект, накопичуються;
- іонізуюче опромінення має генетичний ефект, тобто, вражає не лише об'єкт, який опромінюється, але і його потомство;
- різні організми, навіть одного виду, мають різну радіочутливість;
- іонізуюче опромінення піддається радіопротекції і радіосенсибілізації.

Людина не відчуває дії радіоактивних випромінювань. В її організмі вони викликають зміни, що залежать від потужності дози: 1 мкбер – перегляд одного фільму по телебаченню; 3,0 бер – при рентгеноскопії зубів; 10,0 бер – аварійне опромінення населення поблизу АЕС; 25,0 бер – аварійне опромінення персоналу АЕС; 30,0 бер – опромінення організму при рентгеноскопії тіла; 75,0 бер – короточасні зміни в складі крові; 100,0 бер – легкий ступінь променевої хвороби; 450-500 бер – важкий ступінь променевої хвороби (гине 50% опромінених людей); 500 і більше – гинуть 100 % опромінених людей; 0,1 бер – фонове випромінювання за рік. Тому необхідно знати елементарні правила радіаційної гігієни, про підступність іонізуючих випромінювань, і як послабити їх дію.

Особливо складний механізм впливу іонізуючого випромінювання на спадковість. У цьому випадку з підвищенням дози опромінення збільшується не тільки вплив, а й частота проявів (>5бер). Вже в 1934 р. Міжнародна комісія радіаційного захисту встановила толерантну дозу 0,2 рентгена за добу. В наш час цей рівень зменшили до 0,05 бер за рік для населення і 1 бер за рік для категорії А – персоналу, який працює з джерелами іонізуючих випромінювань.

Щоб послабити дію випромінювань, використовують три головні **принципи захисту**:

- захист часом – скорочення часу перебування в небезпечній зоні;
- захист відстанню – збільшення відстані між джерелом випромінювання і людиною;
- захист екрануванням – зменшення потужності випромінювання за допомогою товстих прошарків речовин, що послаблюють його дію, наприклад свинцю.

Важливим є використання біологічних радіопротекторів, наприклад сірковмісних амінокислот, препаратів рослинного походження – женьшень, елеутерокок, лимонник китайський, солодка гола, деревій, екстракти мідій, вітаміни. В умовах підвищеного радіоактивного фону велике значення має повноцінне харчування – наявність у достатній кількості білків, вуглеводів, вітамінів.

5.2. Принципи теорії мішені

Вплив іонізуючих випромінювань на клітини та організми визначається енергією випромінювань, що передається атомам і молекулам, з якими вони взаємодіють. Це лише перший фізичний етап дії іонізуючого випромінювання,

в результаті якого відбувається збудження та іонізація молекул. На наступному етапі збуджені та іонізовані молекули вступають у ряд перетворень, що можуть завершуватись утворенням нових хімічних сполук. Це так званий хімічний етап променевого ураження клітини.

В основі первинних радіаційно-хімічних перетворень молекул можуть бути два механізми, зумовлені прямим та непрямим впливом радіації.

Прямим називають такий вплив випромінювання, в результаті якого потрапляння іонізуючої частки або кванта іонізуючого випромінювання спричиняє пошкодження молекули, якій безпосередньо було передано енергію частки чи кванта.

Непрямим впливом називають такий вплив, в результаті якого пошкодження молекул відбувається внаслідок впливу продуктів радіаційно-хімічних перетворень інших молекул, а не внаслідок енергії випромінювання, поглинутої молекулами.

Розвиток поглядів на першопричини радіаційного ураження клітини відображені в **теорії мішені**. Теорію мішені було розвинено в працях К. Ціммера, Дж. Лі, М.В. Тимофєєва-Ресовського. Ця теорія пояснює наявність у клітині життєво важливого центра (гена або ансамблю генів) – мішені, влучення в яку однієї або декількох високоенергетичних часток радіації досить для руйнування й загибелі клітини.

Теорія мішені ґрунтується на трьох принципах: влучання, мішені, посилювача.

Принцип влучання – характеризує особливість діючого агента (випромінювання). Ця особливість полягає в дискретності поглинання енергії випромінювання, тобто поглинання порцій енергії при випадковому влучанні в мішень. Таке передавання енергії здійснюється за механізмами пружного співударяння (фотоелектричного ефекту) або непружного розсіяння (ефекту Комптона).

Фотоелектричний ефект полягає в передаванні всієї енергії фотона електрону. Внаслідок цієї взаємодії енергія фотона витрачається на відрив електрона з відповідної електронної орбіти лі атома або молекули й передавання залишку енергії фотона. За аналогією з механічним процесом пружного співударяння фотоелектричний ефект називають пружним співударянням.

Ефект Комптона відбувається при більш високих енергіях гамма-квантів (100 – 200кеВ). Гамма-кванти, вибиваючи електрони, передають їм лише частину енергії, після чого розсіюються. Цей процес продовжується до того часу, поки гамма-квант не передасть свою енергію вибитому електрону і закінчується фотоефектом.

Принцип мішені – враховує особливість об'єкта, що опромінюється (клітини), тобто розбіжності в її реакції на одне і те саме влучення. Інактивація клітини відбувається лише за умови влучання в певні її ультраструктури.

Під **унікальністю структури** розуміють одиничність в клітині й жодна інша структура не здатна компенсувати її функцію, крім того, вона не відтворюється в ході метаболічних процесів. Така ситуація притаманна для ДНК, молекули якої відтворюються лише раз за клітинний цикл, під час фази реплікації, а в клітин, що зазнали диференціації, такого відтворення ДНК не відбувається.

Окремі гени представлені унікальними послідовностями нуклеотидів, і ушкодження цих структур може спричинити катастрофічні події в клітині. Тому мішені пов'язують з ядерними структурами еукаріотичних клітин або кільцевими хромосомами прокариот.

Масові структури клітини – це структури, які можуть відтворюватися в клітинних процесах, а відтак, у разі їх часткової або повної загибелі вони знову з'являються внаслідок біогенезу.

Принцип посилювача – інактивація мішені досягається в акті передавання енергії випромінювання речовині, внаслідок чого молекули зазнають іонізації і збудження. Поглинання малої кількості енергії ініціює інактивацію, спричинює розвиток інактивації клітини, якій передують складні процеси з перетворенням різноманітних молекул і складних молекулярних структур. Власне у неадекватності масштабів ініціюючої й результативної подій внаслідок дії іонізуючого випромінювання полягає принцип посилювача.

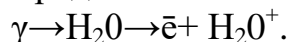
«Мінуси» теорії – не пояснює залежність радіобіологічного ефекту від температури й наявності в опромінюваному середовищі кисню.

5.3. Теорія непрямой дії іонізуючих випромінювань

При непрямій дії іонізуючих випромінювань найбільш виражений процес радіолізу (радіаційного руйнування) води, тому що вода становить основу найважливіших структур клітини (80-90%). Саме у воді розчинені білки, нуклеїнові кислоти, ферменти, гормони й інші життєво важливі речовини, що є основними компонентами клітини, яким легко може бути передана енергія, спочатку поглинена водою.

Процес радіолізу води відбувається в три фази: у фізичній - триває 10^{-13} - 10^{-16} с; у фазі первинних фізико-хімічних перетворень - 10^{-6} - 10^{-9} с; у фазі хімічних реакцій – 10^{-5} - 10^{-6} с. Фізична фаза - один з моментів прямої дії іонізуючого випромінювання на молекулярні й біологічні структури клітини.

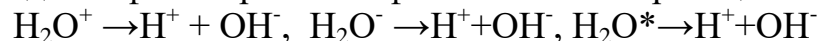
У фізичній фазі відбувається взаємодія іонізуючого випромінювання з молекулою води, у результаті чого вибивається електрон із зовнішньої орбіти атома й утворюється позитивно заряджений іон води:



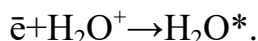
«Вирваний» електрон приєднується до нейтральної молекули води, утворюючи негативний іон води: $\bar{e} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^-$.

При ефекті збудження утвориться нейтрально заряджена молекула води з надлишком енергії, привнесеної іонізуючим випромінюванням: $\gamma \rightarrow \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^*$.

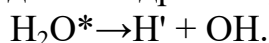
Фізико-хімічні властивості іонізованих і збуджених молекул води будуть відрізнятися від молекул води електрично нейтральних. Тривалість існування таких молекул дуже коротка; вони розпадаються (дисоціюють), утворюючи високореактивні вільні радикали водню й гідроксилу (H^+ і OH^+); настає друга фаза радіолізу води — фаза первинних фізико-хімічних реакцій:



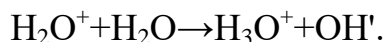
Гідроксильні радикали (OH^+) – сильний окислювач, а радикал водню (H^+)-відновник. Утворення вільних радикалів може йти й іншим шляхом. Вирваний з молекули води під дією випромінювання електрон може приєднатися до позитивно зарядженого іона води з утворенням збудженої молекули:



Надлишкова енергія цієї молекули витрачається на її розщеплення з утворенням вільних радикалів водню й гідроксилу:



Іонізована молекула води (H_2O^+) може реагувати з іншою нейтральною молекулою води (H_2O), у результаті чого утвориться високореактивний радикал гідроксилу (OH'):



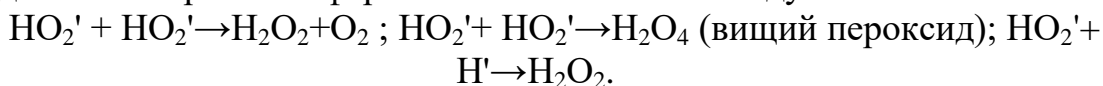
На цьому закінчується фізико-хімічна фаза і розвивається третя фаза дії ІВ - *фаза хімічних реакцій*.

Маючи дуже високу хімічну активність за рахунок наявності неспареного електрона, вільні радикали взаємодіють один з одним або з розчиненими у воді речовинами. Реакції можуть іти наступними шляхами:

- рекомбінація, відновлення води, $\text{H}' + \text{OH}' \rightarrow \text{H}_2\text{O}$;
- утворення молекул водню, $\text{H} + \text{H}' \rightarrow \text{H}_2$;
- утворення молекул води й виділення кисню, що є сильним окислювачем, $\text{OH}' + \text{OH}' \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}$;
- утворення пероксиду водню, $\text{OH}' + \text{OH}' \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$.

При наявності в середовищі розчиненого кисню O_2 можлива реакція утворення гідрпероксидів: $\text{H}' + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2'$ (гідрпероксидний радикал). Ця реакція вказує на роль кисню в ушкоджуючому ефекті іонізуючого випромінювання.

Гідрпероксиди можуть взаємодіяти між собою, утворюючи пероксиди водню й вищі пероксиди, які мають високу токсичність, але вони дуже швидко розкладаються в організмі ферментом каталазою на воду й кисень:



Поява вільних радикалів і їхня взаємодія, становлять етап первинних хімічних реакцій води й розчинених у ній речовин, а у випадках опромінення тварин і рослин - і біологічних молекул.

Взаємодія вільних радикалів з органічними й неорганічними речовинами йде по типу окислювально-відновних реакцій і становить ефект непрямой дії.

Величина прямої й непрямой дії в первинних радіобіологічних ефектах різних систем неоднакова. В абсолютно чистих сухих речовинах буде переважати пряма, а в слабо-розчинених - вплив непрямой дії радіації. У тварин, за даними А.М. Кузина, приблизно 45% поглиненої енергії випромінювання діє безпосередньо на молекулярні структури - пряма дія, а інші 55% енергії викликають непряму дію.

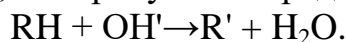
Про відмінність прямої й непрямой дії радіації на біологічні об'єкти й величину їхнього впливу на розвиток променевого ураження, на думку авторів теорії, можна судити за двома феноменами - ефекту розведення й кисневого ефекту.

Ефект розведення - стан, при якому абсолютне число ушкоджених молекул речовин у слабкому розчині не залежить від його концентрації й залишається для даної експозиційної дози постійним, тому що в цих конкретних умовах у розчині утвориться постійна кількість активованих радикалів.

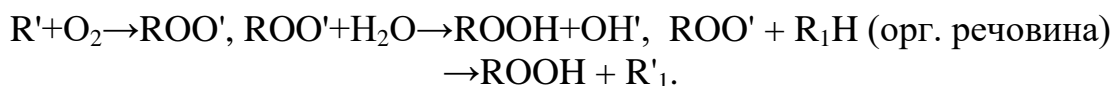
Кисневий ефект. З підвищенням концентрації кисню в навколишньому середовищі й об'єкті опромінення підсилюється ефект променевого ураження, і навпаки, при зниженні концентрації кисню спостерігається зменшення ступеня променевого ураження. Виразність кисневого ефекту в різних видів випромінювань, неоднакова й залежить від їхнього лінійного передавання енергії (ЛПЕ); з підвищенням його ефект зменшується. При дії випромінювань із малою щільністю ЛПЕ (гамма- і рентгенівські промені) спостерігається найбільший ефект, а при впливі випромінювань із високими ЛПЕ (альфа-частинки) він повністю відсутній.

Кисневий ефект проявляється у всіх радіобіологічних реакціях ослабленням або посиленням біохімічних змін, мутацій у всіх біологічних об'єктів (рослин і тварин) і на всіх рівнях їхньої організації – молекулярному, субклітинному, клітинному, тканинному тощо.

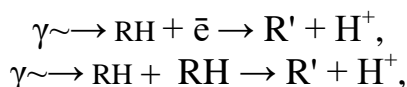
У присутності кисню відбувається значне посилення непрямої дії продуктів радіолізу води й низькомолекулярних органічних сполук. Вільні радикали, взаємодіючи з киснем, утворюють гідропероксиди, пероксиди й вищі пероксиди, які проявляють токсичну дію на організм. Стабілізація радикалів OH^\cdot у присутності кисню збільшує ймовірність утворення активних вільних радикалів органічних речовин, які присутні в середовищі що опромінюється:



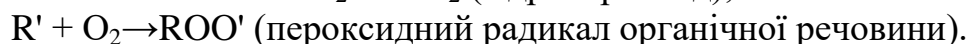
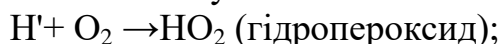
Утворені вільні радикали органічних речовин у присутності кисню будуть реагувати з ним, утворюючи пероксидний радикал (ROO^\cdot), що, у свою чергу, реагуючи з будь-якою органічною речовиною або молекулами води, ініціює ланцюгову реакцію утворення активних вільних радикалів і гідропероксидів, що роблять токсичну дію на клітину:



Наявність кисню в опроміненому середовищі підсилює також пряму дію радіації. При влученні γ -кванта в молекулу органічної речовини, так само як і у випадку з водою, утворюються активні радикали в результаті іонізації й збудження молекул:



Ці радикали, взаємодіючи з киснем, утворять гідропероксиди й пероксиди, які приводять до глибокої зміни молекул:



Крім того, ліпіди біомембран під дією іонізуючого випромінювання в присутності кисню утворюють пероксиди й продукти їхнього розпаду (малоновий альдегід і ін.). Таким чином, у кисневому середовищі утворюється більше токсичних речовин, їхня концентрація вища, що і пояснює кисневий ефект.

5.4. Теорія ліпідних радіотоксинів (первинних радіотоксинів і ланцюгових реакцій)

У перші години після опромінення в тканинах тварин утворюються речовини, які при наступному введенні їх інтактною твариною викликають гемоліз. Ідентифікація речовин установила їхню ліпідну природу, що дало підставу називати їх ліпідними радіотоксинами (ЛРТ).

Ліпідні радіотоксини являють собою лабільний комплекс продуктів окислювання ненасичених кислот, гідропероксидів, альдегідів, епоксидів і кетонів. Вони викликають: гемоліз, гальмування клітинного розподілу, порушення кровотворення, ушкодження хромосомного апарата й ін.

Для здійснення ланцюгових реакцій необхідні радикали з великою енергією, достатньою для утворення наступних радикалів. У випадках, коли на один радикал утворюється два або три, виникає самоприскорюваний процес, що називають реакцією з розгалуженими ланцюгами. В організмі тварин у нормальних умовах низький рівень окислювання біоліпідів обумовлюють антиокислювачі – природні антиоксиданти. При променевому впливі така рівновага порушується внаслідок появи великої кількості радикалів. Автокаталітичний режим ланцюгових реакцій виникає у випадках, коли вміст природних антиокислювачів зменшується на 10-15% (О.І. Журавльов). У міру зменшення числа реакційно здатних молекул у субстраті реакція згасає, при цьому знижується кількість радикалів і пероксидів, і збільшується вихід кінцевих продуктів.

На думку авторів гіпотези, при опроміненні спочатку уражуються ліпіди клітинних мембран, що приводить до порушення хімізму клітини, а ліпідні радіотоксини, що потім утворюються, викликають окислювання молекул інших органічних сполук живої тканини.

"Мінуси" теорії – нагромадження ліпідних радіотоксинів кількісно не пов'язане із ЛПЕ, а ЛПЕ в основному визначаються ВБЕ іонізуючого випромінювання.

Лінійне передавання енергії (ЛПЕ) – основна величина, що характеризує передавання енергії іонізуючого випромінювання атомам і молекулам речовини. Ця величина показує, яка кількість енергії була передана в актах взаємодії випромінювання й речовини на одиницю довжини треку (сліди у формі скупчення іонів, що їх залишають заряджені частинки високих енергій у речовині). 1Дж/м, позасистемна одиниця – еВ/нм. Значення ЛПЕ залежить від енергії фотонів або частинок. Для рентгенівського та гамма-випромінювання з енергією 0,01 – 10^4 МеВ ЛПЕ становить 0,2 – 10 еВ/нм, для альфа-променів з енергією 4 МеВ – 110 еВ/нм, для ядер ^4He (8МеВ) – 22 еВ/нм, ядер ^{12}C (3 МеВ) – 410еВ/нм, ядер ^{40}K (1,5 МеВ) – 3000еВ/нм. Випромінювання з малими значеннями ЛПЕ, яке індукує рідке розташування іонів на одиницю треку, називають *рідкоіонізуючим*. Відповідно *щільноіонізуюче* випромінювання характеризується великими значеннями ЛПЕ й високою щільністю розташування іонів.

5.5. Структурно-метаболична теорія радіаційного ураження

Російський радіобіолог А.М. Кузин створив структурно-метаболичну теорію. В основу цієї теорії покладено принцип багатофакторності як головної причини формування радіобіологічних ефектів.

Внаслідок ушкодження масових структур порушуються метаболичні процеси, що спричиняє появу аномальних метаболітів, низькомолекулярних сполук, які виявляють біологічну активність. Такі аномальні метаболіти було названо радіотоксинами. Таким чином, у структурно-метаболичній теорії до радіаційного ураження ядерних макромолекул як фактора прямої дії відповідно до теорії мішені додаються порушення цитоплазматичних структур і зміна нормального їх функціонування.

Під дією радіації вміст токсичних метаболітів збільшується й з'являються нові токсичні з'єднання. Первинні радіотоксини утворюють велику кількість вторинних радіотоксинів, які відіграють істотну роль у патогенезі.

Імовірнісний характер радіобіологічних ефектів структурно-метаболична теорія пов'язує не з імовірністю влучання в певні ультраструктури клітини, а з імовірністю різних нетипових для норми взаємодій у деформованій мережі метаболичних процесів опроміненої клітини.

Отже, променеве ураження клітини є складним інтегрованим процесом, який має низку етапів. Початковий етап – це первинні ефекти взаємодії випромінювань з окремими молекулами речовин що входять до складу ультраструктур клітини. Подальші етапи охоплюють радіаційно-хімічні зміни структури молекул, а також індуковані цими змінами порушення окремих метаболичних і регуляторній функцій і, нарешті, формування кінцевого радіобіологічного ефекту. На першому етапі реалізуються принципи теорії мішені, на наступних – принципи структурно-метаболичної теорії.

Перелік запитань для контролю знань

1. В чому полягають фундаментальні закономірності біологічної дії іонізуючого випромінювання?
2. Охарактеризуйте загальну схему впливу іонізуючого випромінювання на біологічні об'єкти.
3. В чому полягає суть теорії прямої дії радіації?
4. Які погляди на радіаційне ураження клітини відображені в теорії мішені? На яких принципах вона ґрунтується?
5. Охарактеризуйте теорію непрямой дії іонізуючих випромінювань.
6. Поясніть вплив кисню на ефект променевого ураження.
7. Що таке ЛПЕ?
8. В основу якої теорії покладено принцип багатофакторності як головної причини формування радіобіологічних ефектів?