

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РАДІОБІОЛОГІЯ :

курс лекцій для здобувачів початкового рівня (короткий цикл) вищої освіти ОПП «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва» спеціальності 204 «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва» денної форми здобуття вищої освіти

**Миколаїв
2023**

УДК 577.43

P15

Друкується за рішенням науково-методичної комісії факультету ТВШПТСБ Миколаївського національного аграрного університету від 27.02.2023 р., протокол №7.

Укладачі:

С. І. Луговий – доктор с.-г. наук, доцент, завідувач кафедри біотехнології та біоінженерії Миколаївського національного аграрного університету;

І. М. Люта – асистент кафедри біотехнології та біоінженерії Миколаївського національного аграрного університету.

Рецензент:

О. О. Стародубець – кандидат с.-г. наук, доцент кафедри птахівництва, якості та безпечності продукції Миколаївського національного аграрного університету.

© Миколаївський національний
аграрний університет, 2023

© Луговий С.І., Люта І.М., 2023

ЗМІСТ

ВСТУП	5
ЛЕКЦІЯ 1. ВВЕДЕННЯ В ДИСЦИПЛІНУ	6
1. Радіобіологія та основні етапи розвитку.	6
2. Предмет, задачі та методи дослідження радіобіології.	9
3. Історія науки та внесок зарубіжних та вітчизняних вчених у розвиток радіобіології.	11
4. Дослідження радіобіології на території України.	19
ЛЕКЦІЯ 2. ПЕРВИННЕ ЗАБРУДНЕННЯ І ПЕРЕРОЗПОДІЛ РАДІОНУКЛІДІВ У ПРИРОДІ	24
1. Розвиток радіоекології. Поняття «радіонукліди»	24
2. Характеристика радіонуклідів	26
3. Вміст природних радіонуклідів у навколишньому середовищі	29
4. Штучні радіонукліди	30
ЛЕКЦІЯ 3. РАДІОМЕТРІЯ	33
1. Радіометрія	33
2. Прилади для дозиметрії та радіометрії	35
3. Фізичні та хімічні методи реєстрації радіоактивного випромінювання	40
4. Радіонукліди у хімічному аналізі	42
ЛЕКЦІЯ 4. БІОЛОГІЧНА ДІЯ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ	45
1. Характеристика іонізуючих випромінювань та взаємодія їх з речовиною	45
2. Реєстрація іонізуючих випромінювань	50
3. Захист від іонізуючого випромінювання	60
ЛЕКЦІЯ 5. РАДІОБІОЛОГІЧНІ ЕФЕКТИ І ПІСЛЯРАДІАЦІЙНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ОРГАНІЗМУ	64
1. Класифікація радіобіологічних ефектів	64
2. Близькі та віддалені, детерміновані та стохастичні радіобіологічні ефекти	67

3. Післярадіаційне відновлення	69
ЛЕКЦІЯ 6. РАДІАЦІЙНА БЕЗПЕКА І ЗАХИСТ	74
1. Основні принципи радіаційної безпеки	74
2. Чинні норми радіаційної безпеки України	76
3. Радіаційно небезпечні об'єкти	78
4. Поводження з радіоактивними відходами	83
ЛЕКЦІЯ 7. ЗАСОБИ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ, ҐРУНТУ, ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ ВІД РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ	91
1. Радіоекологічний моніторинг водою	91
2. Радіоекологічний моніторинг ґрунту	95
3. Радіоекологічний моніторинг біоти	98
4. Радіоекологічний моніторинг сфери агропромислового виробництва	100
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	104

ВСТУП

Життя на нашій планеті виникло, розвивалось і перебуває в умовах, часом далеких від сприятливих. На рослини, на тварин, на людей діють великі перепади температур, атмосферні опади у вигляді дощів і злив, граду і снігу, рух повітря від слабкого вітерцю до ураганів і бур, зміни атмосферного тиску, чергування дня і ночі та багато інших факторів. Серед них особливе місце займає іонізуюча радіація, джерелом якої є природні радіоактивні ізотопи різних хімічних елементів і космічне випромінювання. Вона утворює на Землі так званий природний радіаційний фон.

У середині 20-го століття почали створюватися штучні радіоактивні ізотопи і джерела іонізуючих випромінювань. Початок їм поклало створення атомних бомб у США, а пізніше і в інших країнах, розвиток атомної енергетики. Під час атомних вибухів, роботи підприємств так званого ядерного паливного циклу, а особливо при радіаційних аваріях на них, у навколишнє середовище може потрапляти велика кількість природних і штучних радіоактивних ізотопів, що призводить до появи окремих осередків і великих територій із високим рівнем радіоактивності. Як надходять і поширюються радіоактивні речовини в біосфері, якими шляхами вони переходять в рослини та організм тварин і людини, як діє іонізуюча радіація природних та штучних ізотопів на живі організми, як можна захистити їх від надходження радіоактивних речовин і дії їхніх випромінювань – ці та інші суміжні питання вивчає галузь біології, яка дістала назву радіобіологія.

Вона межує з науками, що досліджують біологічну дію низько енергетичних електромагнітних хвиль інфрачервоного, видимого й ультрафіолетового світла та радіохвиль міліметрового і сантиметрового діапазонів, – фотобіологією і біофізикою. Специфіка радіобіології обумовлена надзвичайно високою енергією досліджуваних нею квантів і частинок випромінювань, що перевищують енергію іонізації атомів і здатних проникати всередину речовин клітин і тканин живих організмів, впливаючи на стан їх молекул та атомів.

ЛЕКЦІЯ 1

ТЕМА: ВВЕДЕННЯ В ДИСЦИПЛІНУ

1. Радіобіологія та основні етапи розвитку.
2. Предмет, задачі та методи дослідження радіобіології.
3. Історія науки та внесок зарубіжних та вітчизняних вчених у розвиток радіобіології.
4. Дослідження радіобіології на території України

1. Радіобіологія та основні етапи розвитку

Радіобіологія – це самостійна комплексна, фундаментальна наука, яка складається із багатьох наукових напрямів, що вивчають дію іонізуючого випромінювання на біологічні об'єкти; це наука про дію всіх видів іонізуючого випромінювання на живі організми, починаючи з біологічно важливих макромолекул, бактеріофагів, вірусів і кінчаючи високоорганізованими організмами, популяціями, їх угрупованнями (біоценозами) і біосферою в цілому, що сформувалася в першій половині ХХ століття.

З метою вивчення видоспецифічності дії іонізуючої радіації на організми різних рівнів організації виділяють радіаційну вірусологію, радіаційну мікробіологію, радіобіологію найпростіших, радіобіологію безхребетних, радіобіологію комах, радіобіологію рослин, радіобіологію тварин тощо.

Сьогодні можна виділити такі етапи розвитку радіобіології:

I-й етап - з 1881 до 1920 років - виявлення катодного випромінювання І.П. Пулюєм і демонстрація на Міжнародній електротехнічній виставці в Парижі “лампа Пулюя”, за яку він одержав срібну медаль, вивчення уражаючої дії радіації на різні системи організму; пізнання природи і суттї радіації; вивчення радіоактивного гальмування поділу клітин; встановлення уражаючої дії радіації на субклітинні елементи, клітини, тканини.

Найбільш яскраві представники вчених першого періоду: І. Пулюй, П. Кюрі, М. Складовська-Кюрі, А. Бекерель, К. Рентген, Н. Бор, Н. Тесла, Е. Лондон, І. Тархановта інші.

II-й етап - починаючи з 1920 до 1945 років - розвиток дозиметрії, вивчення зв'язку між дозою і ефектом, розробка атомної бомби; вивчення впливу радіації на живі системи у залежності від її дози та

якості; розробка заходів захисту і лікування від радіації. Найбільш яскраві представники вчених другого періоду Ф. Дессауєр, Л.Грей, М.В. Тимофєєв-Рясовський, Д.Ли та інші.

III-й етап починається з 1945 до 1986 років – вивчення впливу радіації на навколишнє середовище, розробка методів використання радіації в науці, промисловості, сільському господарстві, медицині, досліджуються ураження радіацією соматичних та генеративних клітин, розвиток атомної енергетики до Чорнобильської аварії тощо. Найбільш яскраві представники вчених третього періоду Ярмоленко, Дубинін.

IV-й етап – починається з аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 році і триває до нині.

Окрім того, у розвитку радіології, радіобіології, радіоекології можна виділити три періоди, що поперемінно чередуються і повторюються, - це радіоейфорії (необґрунтованого захоплення радіації), радіофобії (патологічної боязні всього, що пов'язане з радіацією) та радіоамнезії (забуття про переоцінку і тяжкі наслідки впливу радіації на людину і довкілля).

Радіобіологія межує з науками, які досліджують дію електромагнітних хвиль, інфрачервоних, видимих і ультрафіолетових променів і радіохвиль міліметрового і сантиметрового діапазонів.

Специфіка радіобіології обумовлена великою енергією квантів і частинок (альфа-частинок, електронів, протонів, позитронів, нейтронів тощо), які значно перевищують енергію молекул органічних речовин, а також здатністю частинок проникати в глибину (всередину) об'єкту, діючи на всі його структури.

Радіобіологія досліджує механізми впливу іонізуючого випромінювання на біополімери (нуклеїнові кислоти й білки), надмолекулярні структури (хроматин, біологічні мембрани), віруси, бактеріофаги, клітинні органели, клітини, тканини, органи та цілі організми, а також на угруповання організмів (біоценози) і на всю біосферу.

Радіобіологія пов'язана з фізикою (радіаційна фізика) і біофізикою (радіаційна біофізика), з хімією і біохімією. Радіобіологія межує з молекулярною радіобіологією, радіаційною цитологією, радіаційною екологією. Залежно від об'єктів дослідження розрізняють радіаційну мікробіологію, радіаційну гістологію,

радіаційну ембріологію, радіаційну генетику, радіобіологію тварин і рослин, радіобіологію нервової системи, медичну радіобіологію тощо.

Отже, це комплексна, мультидисциплінарна галузь знань, що складається з окремих напрямів. У залежності від рівня дослідження живих систем здійснювалась і структуризація загальної радіобіології: молекулярна радіобіологія, циторадіобіологія, гісторадіобіологія, радіобіологія генетики, радіобіологія рослин і тварин тощо. Автономність окремих напрямів і розділів радіобіології є умовною. Всі вони тісно пов'язані між собою і об'єднуються узагальненою теорією – загальною радіобіологією.

Відкриття в галузі радіобіології (наприклад, радіаційного мутагенезу, ферментів, що сприяють репарації радіаційного ураження ДНК та інші) сприяють розвитку знань про загальні закономірності життя. Вивчення радіації дозволяє глибше розуміти фотосинтез. З світловим випромінюванням пов'язані інформаційні і регуляторні реакції організмів (зір у тварин, фототаксис, фото призм, фотоперіодизм тощо).

В оптимальних дозах радіація Сонця, що проникає на Землю впливає на ріст і розвиток рослин і тварин, обмін речовин, утворення вітаміну Д, підвищує резистентність організмів. Іонізуюча космічна радіація відхиляється магнітним полем Землі, певною мірою поглинається верхніми шарами атмосфери і тільки незначна її кількість досягає поверхні Землі, створюючи біля 30% природної радіації. Решта 70% обумовлена альфа-, бета- і гама-випромінюванням радіоактивних елементів – теорія, урана, радія, і продуктів їх розпаду (радон та інші), знаходиться в розсіяному вигляді в земних породах, ґрунті, воді, атмосфері. Радіобіологія нині має важливе світоглядницьке, методологічне і методичне значення. Вона виконує теоретико-пізнавальну функцію, значною мірою визначає рівень і напрями науково-технічного прогресу.

Більшість радіобіологічних ефектів пояснюються теоріями точкового нагріву і попадання (мішені), з точки зору стохастичних і детерміністичних явищ, вільних і ліпідних радикалів, структурно-метаоблічної теорії, ефекту «свідка» тощо. Це і є сучасні теоретичні аспекти радіобіології.

Теоретичні аспекти радіобіології включають: точкового нагріву, мішені (попадання), стохастичні (вірогідносні), детерміністичні,

ліпідних радикалів та структурно-метаболична теорія.

2. Предмет, задачі й методи дослідження радіобіології

Радіобіологія, або радіаційна біологія, – це наука, яка вивчає дію іонізуючих випромінювань на живі організми та їх угруповання. Вона межує з науками, що досліджують біологічну дію низько енергетичних електромагнітних хвиль інфрачервоного, видимого й ультрафіолетового світла та радіохвиль міліметрового і сантиметрового діапазонів – фотобіологією і біофізикою. Специфіка радіобіології обумовлена надзвичайно високою енергією досліджуваних нею квантів і частинок випромінювань, що перевищують енергію іонізації атомів і здатних проникати всередину речовин клітин і тканин живих організмів, впливаючи на стан їх молекул та атомів.

Основним об'єктом досліджень радіобіології є живі організми (людина, тварини, рослини, мікроорганізми) і сукупності організмів різних систематичних груп, що являють собою екологічну єдність. У цілому в радіобіології немає визначеного об'єкта вивчення, хоча в залежності від нього, як конкретного предмета досліджень, виділяють її окремі напрями: радіобіологію людини, радіобіологію тварин, радіобіологію рослин, радіобіологію мікроорганізмів та інші.

Однак предметом вивчення радіобіології стали також макромолекули, окремі структури клітини, самі клітини і їхні популяції, культури тканин і органів, окремі процеси метаболізму, окремі метаболіти. В останні десятиліття виділилися такі напрями, як молекулярна радіобіологія, радіаційна біохімія, радіаційна цитологія. І з'явилося нове визначення: *радіобіологія – це наука про дію іонізуючих випромінювань на живі системи всіх рівнів організації.* Останнє формулювання не є альтернативним першому, не суперечить йому, але його доповнює. Обидва вони правильні.

Радіобіологію не слід змішувати з *радіологією* – комплексною наукою, яка вивчає властивості іонізуючих випромінювань, засоби їх виявлення та методи реєстрації, дію на речовину, деякі принципи захисту від них та прикладного використання. Радіобіологію можна вважати однією зі складових частин радіології разом з радіофізикою і радіохімією.

На стику радіобіології й екології виник її окремий розділ, який іноді відносять до екології або розглядають і як самостійну науку, –

радіаційна екологія або радіоекологія. У радіобіологічній номенклатурі *радіоекологія* – це напрям радіобіології, який вивчає концентрації та поведінку (розподіл, міграцію, кругообіг) радіоактивних речовин у навколишньому природному середовищі та дію їх іонізуючого випромінювання на живі організми. Перогативою радіоекології є, як правило, порівняно невисокі дози випромінювань.

Сучасна радіобіологія являє собою комплексну міждисциплінарну область біологічної науки, що має чітко виділені окремі напрями. Основними з них є такі: медична радіобіологія, що включає протирадіаційний захист і терапію, радіаційну гігієну, радіаційну імунологію і радіобіологію пухлин; радіаційна екологія, радіаційна генетика, сільськогосподарська радіобіологія, радіаційна цитологія, радіаційна біохімія, радіаційна біофізика, космічна радіобіологія і деякі інші.

Одні з цих напрямів мають конкретний об'єкт вивчення, інші – не мають. Але в кожного напрямку є свої визначені задачі.

Головною задачею радіобіології, що складає предмет її досліджень, є вивчення закономірностей біологічної дії іонізуючої радіації на живий організм з метою оволодіння керуванням його реакціями на опромінення.

Виходячи з цієї загальної задачі формулюються конкретні завдання кожного напрямку радіобіології з урахуванням специфіки об'єктів досліджень.

Так, *медична радіобіологія* вивчає дію іонізуючих випромінювань на організм людини, принципи профілактики і лікування радіаційних уражень, можливих наслідків опромінення населення.

Задачами *сільськогосподарської радіобіології* є вивчення радіочутливості видів сільськогосподарських рослин і тварин, пошук можливостей її модифікації, розробка прийомів мінімізації нагромадження радіоактивних речовин у продукції рослинництва й тваринництва.

Самостійним напрямком сільськогосподарської радіобіології можна вважати *ветеринарну радіобіологію*, яка вивчає особливості патологічних процесів, що протікають під впливом іонізуючих випромінювань в організмі домашніх тварин. Її задачею є також розробка радіозахисних заходів при веденні тваринництва на забруднених радіоактивними речовинами територіях, профілактика і лікування тварин у цих умовах, проведення радіометричного

санітарного контролю продукції тваринництва.

Більшість задач, які вирішують ці напрями, є похідними головної задачі радіобіології і тісно зв'язані з проблемами інших її напрямів. Самостійне значення має задача окремого великого напрямку так називаної *прикладної радіобіології*, що слугує практичному втіленню завдань усіх напрямів радіобіології.

3. Історія науки та внесок зарубіжних і вітчизняних вчених у розвиток радіобіології

Зародження радіобіології зобов'язано трьом визначним відкриттям кінця ХІХ століття:

- відкриття радіації (І. Пулюй (1881), К. Рентген (1895));
- відкриття природної радіоактивності – «уранові промені» (А. Беккерель);
- відкриття радіоактивних властивостей полонія і радія (М. Склодовська-Кюрі, П. Кюрі, Е. Резерфорд, Н. Бор, Ф. Содді).

За ці відкриття ці вчені, окрім І. Пулюя, одержали Нобелівську премію – Рентген у 1901 році, а М. Склодовська-Кюрі, П.Кюрі та А.Беккерель – у 1903 році.

Радіобіологія – порівняно молода наука, її вік сягає до 130 років. Іван Павлович Пулюй (2.02.1845 – 31.01.1918) (рис.1.). У 1881 році на Міжнародній електротехнічній виставці демонструє лампу (трубку) Пулюя, за яку був нагороджений срібною медаллю цієї виставки. З допомогою цієї катодної трубки, яка випромінювала невідомі промені Пулюй зафотографував зломану руку 13-ти річного хлопця, руку своєї дочки, скелет мертвого хлопчика. Основним колом його наукових інтересів завжди була фізика.



Рис.1. І.В. Пулюй

В енциклопедіях з фізики подаються два його винаходи, які були відзначені медалями Міжнародних виставок у Парижі (1878, 1881) – прилад для вимірювання механічного еквівалента тепла та лампа Пулюя (вакуумна трубка, в якій під дією катодних променів на окисли або сульфід кальцію, магнію, стронцію, барію виникали, окрім видимого випромінювання, також промені невидимі, які запатентував у листопаді 1895 року Вільгельм Конрад Рентген.

Отже, Рентген невідомі х-промені виявив у листопаді 1895 року, а І. Пулюй їх досліджував і мав практичні розробки на 14 років раніше.

Антуан Анрі Беккерель (1852-1908) (рис. 2) народився в Парижі у відомій сім'ї французьких фізиків, працював професором фізики Паризького музею історії природи. Його батько Олександр Едмон Беккерель був членом Паризької академії наук, а з 1880 року – її президент, досліджував фотогоальванічні ефекти, фосфороресценції, фотограції, фотохімії. Антуан Анрі Беккерель працював у галузі електромагнітзму, оптики, фото- і електрохімії, метеорології, у 35 років захистив докторську дисертацію, у 40 років став професором.

Зібрав багату колекцію хімічних речовин і мінералів, які світяться. На засіданні Паризької академії наук 4 лютого 1896 року Анрі Беккерель зробив повідомлення про відкриття ним раніше невідомого випромінювання уранових солей, здатних проникати через непрозорі предмети і викликати почорніння фотоплівки.

Він відкрив і досліджував природну радіацію солей урану. За ці дослідження одержав у 1903 році Нобелівську премію.

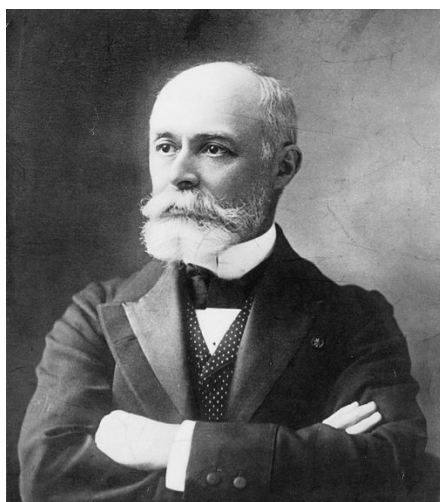


Рис.2. Антуан Анрі Беккерель

Вильгельм Конрад Рентген (1845-1923) (рис. 3) досліджував фізику, електромагнітизм, пружність та піроелектричні властивості кристалів, діелектричну проникливість рідин, магнітні поля зарядів, що рухаються. Його цікавила оптика (зокрема взаємозв'язок електричних і оптичних явищ у кристалах) і молекулярна фізика. У 1895 році вивчав випромінювання з довжиною хвилі більш короткою, ніж хвилі ультрафіолетових променів (х-промені). Ці промені проникають через папір, деревину, ебоніт, тонкі шари металів, але значною мірою затримуються свинцем. З використанням х-променів він сфотографував долоню руки. Ці промені не відхиляються в магнітному полі, отже вони не мають заряду.

Дослідження х-променів привели до відкриття електрона. Запропонував трубку для одержання х-променів. Провів експерименти по створенню магнітного поля зарядом, що рухається. У 1901 році йому була присуджена Нобелівська премія в галузі фізики.

П'єр Кюрі (1859-1906) – народився в Парижі (Франція) в сім'ї лікаря. У 1880 році, разом зі своїм старшим братом Жаком Кюрі відкрили і досліджували п'єзо-електрику, проводив дослідження магнетизму (основний закон Кюрі), симетрію кристалів, виготовив ультра чутливі ваги для наукових досліджень.

За період з 1883 по 1895 роки П. Кюрі виконав велику серію робіт з фізики кристалів. З 1890 по 1895 роки П. Кюрі вивчає магнітні властивості речовин при різних температурах. У 1898 році, разом з Марією Склодовською-Кюрі, відкрив полоній і радій; досліджував радіоактивне випромінювання; ввів термін “радіоактивність”. У своїй Нобелівській лекції в 1905 році П. Кюрі вказував на потенційну небезпеку, яку представляють радіоактивні речовини, якщо вони потраплять не в ті руки, що він належить до числа тих, хто разом з Нобелем вважає, що нові відкриття принесуть людству більше бід, ніж добра.

Відноситься до когорти вчених-мучеників, які померли від променевої хвороби (П'єр Кюрі тяжко хворів, але трагічно загинув у наслідок наїзду кінної фури).

Марія Складовська-Кюрі (1867-1934) – народилась у Варшаві в сім'ї вчителя фізики і математики. Ще в юному віці працювала лаборантом у хімічній лабораторії свого двоюрідного брата. Д.І. Менделєєв (товариш батька Марії), спостерігаючи за її роботою в

лабораторії передбачив їй велике майбутнє, якщо вона буде продовжувати займатися хімією. Марія Складовська - видатний фізик і хімік, яскравий приклад того, що жінка може займатися серйозною наукою. Їй належить відкриття хімічних елементів Радію, Полонію (так назвали на честь батьківщини Марії – Польщі). Полоній мав у 400 разів вищу радіоактивність, ніж уран. А радіоактивність радію у 900 разів вища, ніж урану.

У 1903 році Марія Кюрі, П'єр Кюрі та Антуан Анрі Беккерель були удостоєні Нобелівської премії у галузі радіаційної фізики за відкриття явища радіоактивності. У 1911 році Марія Кюрі одержала ще одну Нобелівську премію, на цей раз у галузі хімії. Марія Кюрі – перший в історії лауреат Нобелівської премії, до того – дворазовий. Марії Складовській-Кюрі було присуджено 10 премій та 16 медалей. Вона була обрана членом 106 різних наукових установ, академій та товариств. Такого визнання, слави і популярності немала жодна жінка ХХ століття.

У роки війни 1914-1918 Марія Кюрі розробила технологію радіологічної лабораторії на автомобілі для проведення рентгенологічної діагностики в польових умовах. Під її керівництвом і безпосередньою участю було облаштовано 20 автомобільних і 100 стаціонарних радіологічних лабораторій для обслуговування військових госпіталів.

Марія Кюрі першою в історії вищої школи Франції була обрана у 1906 році професором Сорбони, завідувачем кафедри фізики і читала курс «Радіоактивність». У наслідок тривалого опромінення Марія Кюрі хворіла нирками, катарактою очей, сомнабулізмом (людина може вночі вставати з постелі і неосвідомлено ходити по квартирі), злюкисною гострою анемією, від якої померла у 1934 році.

Ернест Розенфорд (1871-1937) – англійський фізик, засновник ядерної фізики, у 1906 році одержав Нобелівську премію в галузі хімії.

Лондон Ю. С. (1869-1939) – російський патфізіолог, біохімік, радіобіолог. В Росії вплив іонізуючого випромінювання на живі організми вивчав Е. С. Лондон. У 1903 році він виявив летальну дію на мишей опромінення радієм. Е. С. Лондон і лікар С. В. Гольдберг проводили експериментальні дослідження дії радіації на собі. Вони встановили, що радіація уражає не тільки шкіру, але і внутрішні органи та тварини.

У наступні роки було виявлено, що радіація призводить до зміни біохімічних процесів: порушення активності ферментів, поява токсичних речовин тощо. Поступово накопичуються спостереження про радіочутливість різних тканин і органів. У ці ж роки починаються дослідження впливу радіації на ембріогенез.

Тарханов (Тархановшили) І.Р. (1846-1908) – російський фізіолог, учень І. М. Сеченова. І.Р. Тарханов перший в історії науки в 1896 році виявив і обґрунтував шкідливий вплив гама-радіації на організм тварин і людини. Дослідження І. Р. Тарханова продовжили і розширили німецькі біологи Г. Петерс, П. Лінзер і Є. Альберт, які в 1904 і 1905 роках опублікували результати своїх досліджень щодо ураження радіацією процесів ділення клітин, появу токсичних речовин в організмі (зокрема в крові) в наслідок іонізуючого опромінення. У 1905 році П. Лінзер із співавторами (Німеччина) виявили появу токсичних речовин у крові опромінених тварин. У цьому ж 1905 році Л. Хальберштадтер виявив атрофію яєчників у опромінених тварин. П. Браун і Дж. Осгоуд виявили азооспермію у людей, які піддавалися опроміненню, працюючи на заводі по виготовленню рентгенівських трубок.

Нільс Бор (1885-1962) – датський фізик, один із фундаторів сучасної фізики, творець теорії атома в основі якої лежить планетарна модель його внутрішньої структури, квантова уява і сформульовані постулати. Н. Бор в усі роки своєї наукової діяльності проявляв особливий інтерес до філософських проблем біології і радіобіології. У 1922 році одержав Нобелівську премію. З ім'ям Н. Бора пов'язана «копенгагенська» або вірогідна інтерпретація квантової теорії та її «парадоксів». Н. Бор планетарну модель структури атома побачив у вісні, так, як Д.І. Менделєєв у вісні побачив схему своєї таблиці системи елементів.

У 1934 році дочка Марії і П'єра Кюрі Ірен Жоліо-Кюрі (1897-1956), теж працюючи в галузі радіаційної фізики, відкрили штучну радіацію і, зі своїм чоловіком Фредеріком Жоліо (1900-1958) (рис.8) одержали в 1935 році Нобелівську премію в галузі хімії. В їхніх дослідках, після бомбардування альфа-частинками (препарату полонію) магнію, бору, алюмінію, вони випромінювали позитрони. Виявлення штучної радіоактивності одержало оцінку найкрупнішого відкриття століття. До цього радіоактивність, яка була присуща деяким елементам, не могла бути ні викликана, ні знищена, ні як-небудь змінена людиною. Подружжя Жоліо-Кюрі вперше штучно

викликали радіоактивність, одержавши нові радіоактивні ізотопи. Вчені передбачали велике теоретичне значення цього відкриття і можливість його практичного застосування в галузі біології і медицини. Ірен і Фредерік Жоліо-Кюрі померли від променевої хвороби. У 1935 році подружжя одержало Нобелівську премію в галузі хімії за синтез нових радіоактивних елементів.

Перша офіційна інформація про уражаючу дію радіації на шкіру була опублікована у 1901 році П. Кюрі й А. Беккерелем, де вони повідомляли, що необережне поводження з радієм викликало у них опіки шкіри. А у 1902 році описаний перший випадок променевого раку шкіри.

У 1902 році Г. Фребен описав перший випадок променевого раку шкіри. Хоча слід відмітити, що перші повідомлення про променевий рак зустрічаються в XVI столітті, коли відомі медики середньовіччя Т. Парацельс і Г. Агрікола писали про загадкову хворобу легень у людей, які працювали у копальнях, де згодом почали добувати уран і радій. Ще у 1879 році в цій хворобі розпізнали рак легень. Про дію радію на шкіру вперше повідомляють німецькі вчені Г. Вальхов і Г. Гізель. П'єр Кюрі одразу ж перевіряв це на власній руці, і ділянка шкіри, до якої він приклав радій, виявилася ураженою. 3 червня 1901 року А. Беккерель протягом 6 годин тримав у кишені ампулу з радієм і теж отримав опік шкіри. П'єр Кюрі, К. Бутар, В. Бальтазар прийшли до висновку, що радій можна застосовувати для лікування вовчанки та деяких форм рака. Це стало початком кюрітерапії. Першою в історії спробою рентгенотерапії рака була робота лікаря Д.Ж. Джилмана, який направив до фізика Е. Груббе жінку з враженою раком молочною залозою. Сеанс її лікування проведений 29 січня 1896 року був ефективним. Е. Груббе продовжував і далі здійснювати рентгенотерапію. Згодом і він став жертвою променевої хвороби.

Довгий час об'єктом спостережень залишалася шкіра, оскільки, вчені не припускали, що радіація може впливати на тканини, які знаходяться в глибині організму. Тільки в 1903 році Г. Альберс-Шонберг виявив дегенеративні зміни сім'я утворюючого епітелію та азооспемію (відсутність сперміїв у спермі) у морських свинок та кролів після їх опромінення, а у 1905 році Хальберштадтер спостерігав атрофію сім'яників у опромінених тварин. Броун і Осгоуд виявили азооспемію у молодих робітників, які працювали протягом

трьох і більше років на заводі по виготовленню рентгенівських трубок

У 1905 році Корніке спостерігав гальмування клітинного ділення під впливом іонізуючого опромінення, а Бергоньє і Трибонто виявили призму чутливості клітин до радіації.

Ці роки вважаються першим етапом розвитку радіобіології, який забезпечив науку уявленням про два кардинальні наступні фактори:

- іонізуюче опромінення викликає гальмування клітинного ділення;

- спостерігається різниця в ступені вираженості реакції різних клітин на опромінення.

У 1918 році, за ініціативою відомого рентгенолога М. І. Семенова, у Петербурзі було відкрито перший в країні радіобіологічний державний інститут рентгенології і радіології.

У 20-ті роки ХХ-го століття були закладені теоретичні основи радіобіології (М. В. Тимофєєв-Ресовський, Ф. Дессауер). Це другий етап розвитку радіобіології, який пов'язаний з вивченням біологічного ефекту від дози опромінення. 20-30 роки ХХ століття відмічені рядом значних відкриттів і нових ідей, що прискорили розвиток радіобіології як науки. У 1920 році Г. А. Надсон, а у 1925 році П. Анцель та

П. Винтенберг у Франції прийшли до висновку про те, що радіаційне ушкодження клітини – це є результат двох протилежних процесів: розвиток ушкодження одночасно відновлення (репарація) після ушкодження.

У 1925 році радянські вчені Г. А. Надсон, Г. С. Філіпов у досліджах на дріжджах відкрили мутагенезну дію рентгенівського випромінювання на нижчих грибах. Дослідження з радіаційного мутагенезу проводили у США на дрозофілах (Н. Меллер) з 1927 року та з 1928 року - на вищих рослинах (Л. Стендлер).

Відкриття цих вчених лягли в основу радіаційної генетики. Ці вчені виявили надзвичайно важливий факт впливу іонізуючого опромінення на генетичний апарат клітини, що супроводжуються спадковою передачею набутих ознак.

Роботами Ф. Дессауера (Германія, 1922), Ж. Краутера (Великобританія, 1924, 1927 рр.), Ф. Хольвека (Франція, 1928 р.) та іншими були розроблені уявлення і обґрунтування дискретності іонізуючого опромінювання, про процес поглинання енергії як суми одиночних актів взаємодії корпускулярних частинок та фотонів з окремими молекулами та структурами клітини. Теорія «мішені», як

формальне узагальнення багаточисельних спостережень, була підтверджена англійським вченим Д. Лі (1946), радянським вченим М. В. Тимофієвим-Ресовським (1947) та німецьким вченим К. Цимером (1947).

У період 40-х та на початку 50-х років, завдяки швидкому розвитку ядерної фізики і техніки, а також у результаті радіоактивного забруднення довкілля, внаслідок випробування ядерної зброї, різко зріс інтерес до наслідків біологічної дії іонізуючого випромінювання. Цей період характеризується створенням великих дослідницьких центрів у США, бувшому СРСР, ряді країн Європи. У ці ж роки починає розроблятися система заходів захисту від радіації, радіаційна безпека, радіаційна гігієна. Нині інтенсивно розвивається цілий комплекс природничих радіаційних наук, зокрема, радіоекологія, радіогенетика, радіомедицина та радіобіологія ветеринарної медицини, радіологія сільського господарства (рослин і тварин), радіобіологія, космічна радіобіологія, радіологія біосфери тощо.

У розвиток космічної радіобіології значний внесок зробили М. В. Тимофєєв-Ресовський, В. І. Корогозін, Н. В. Лучкін та інші. У галузі молекулярної радіобіології слід відмітити важливий внесок І.Б. Бичковського, Е. Б. Бурлакова, Р. В. Петрова, Г. С. Стрепіна, І. Л. Черткова.

У галузь розробки заходів радіаційної безпеки здійснили значний внесок вчені В. Г. Володимиров, П. Г. Жеребченко, Ю. П. Кудряшова, С. П. Романцева, Т. К. Джаракян.

Засновниками сільськогосподарської радіоекології можна вважати В. М. Ключковського, І.В. Гулякіна, Е.В. Юдінцеву. Вивчення впливу радіації на організм рослин і тварин проводили П. Д. Горизонтова, Ю. Д. Григор'єва. Є. А. Жардін, Л. А. Ільїн, П. Н. Кисельов та інші. У розробку медичної клінічної радіобіології значний внесок зробили С. Н. Олександров, С. П. Ярмоленко, А. К. Гуськова, В. Г. Володимиров, Є. Ф. Романцев, С. Н. Ардашніков, В. С. Балабуха, Є. Я. Граєвський, Ю. Я. Керкис, А. В. Лебединський.

Значний внесок у розвиток радіобіології та сільськогосподарської радіології вніс І. М. Гудков. Його наукова діяльність тісно пов'язана з вивченням та мінімізацією наслідків аварії на Чорнобильській АЕС в аграрній сфері. Ігор Миколайович Гудков є талановитим педагогом і автором широко відомих підручників, посібників, наукових публікацій з радіобіології та радіоекології.

У 50-60 роки ХХ-го століття було накопичено багато даних про роль перекисів, гідроперекисів, семіхінів та інших радіотоксинів на формування променевих уражень, а також відкриті перші радіозахисні засоби і ферменти репарації вражених ДНК. Особливо значущими відкриттями в радіобіології було встановлення ролі ушкоджень унікальних структур ядра клітини в результаті радіаційного ураження, виявлення мутагенної дії випромінювань, вивчення можливостей хімічного захисту й модифікації радіаційного ураження та відкриття процесів пострадіаційного відновлення та репарації.

Пристер Борис Самуїлович (1938), доктор біологічних наук, академік, лауреат ряду Державних премій, вивчав міграцію радіонуклідів трофічними ланцюгами природних і аграрних екосистем, дію іонізуючих випромінювань на живі організми, розробляв радіозахисні заходи у сільському господарстві на забруднених територіях. Один із співавторів монографії «Основи сільськогосподарської радіології».

Нині накопичений багатий матеріал дії радіації на живі організми, але відсутня єдина теорія з цього питання. Однією із причин цього є те, що вирішення основних питань радіобіології здійснювалось певною мірою відірвано від тих загальнобіологічних наук, в галузі яких застосовували радіацію. Другою причиною стало те, що моментом поглинання радіації і ефектом її дії майже завжди триває значний час, іноді роки.

Об'єктами дослідження радіобіології на сучасному етапі є екологічні системи, популяції, організми, системи органів, органи, клітини, органоїди клітин і клітинні мембрани, макро- і малі молекули. Глибоко вивчається кількісний вплив іонізуючої радіації залежно від дози, площі опромінення, тривалості часу опромінення та радіаційні ефекти, їх етапи (фізичний, хімічний, біологічний) тощо.

4. Дослідження радіобіології на Україні

Радіобіологія молода наука, але за сторіччя свого існування вона зробила яскравий шлях в історії людства. Багато яскравих сторінок в розвитку радіобіології в світі додали саме українські вчені, імена яких несправедливо були забуті серед імен світових та російських радіобіологів. Дослідження історичних витоків виникнення, становлення та розвитку основних її напрямів, аналіз сучасної їх

спрямованості як в Україні, так і за кордоном та вивчення наукової спадщини вітчизняних учених-радіобіологів має поліпшити дослідницьку справу вивчення історичного внесок наукових колективів, окремих учених у розвиток радіобіології.

В Україні перші дослідження рентгенівських променів були проведені відразу після їх відкриття. З 1896 р. в науковій літературі з'являлися повідомлення про досліди з іонізуючим випромінюванням, проведені в університетських центрах Києва, Одеси, Харкова.

Серед перших дослідників X-променів в Росії, до складу якої входила Україна, був професор Новоросійського (Одеського) університету Микола Дмитрович Пильчиков (1857-1908 рр.). У своїх попередніх наукових працях він близько підійшов до радіологічних досліджень, коли з'явилися повідомлення про рентгенівські промені. Микола Дмитрович з співробітниками І. Тоділовскім і В. Гернет переключився на вивчення цих променів. Результати досліджень були опубліковані в «Доповідях Паризької Академії Наук» в 1896 р. та у «Віснику дослідної фізики та елементарної математики» в 1896 р. Микола Дмитрович вивчав природу X-променів та вплив на них фізичних чинників, досліджував природну радіоактивності солей радю і торію, показавши їх іонізаційні, флуоресцентні та фотографічні властивості. Він був основоположником рентгенографії та рентгенології в Україні, під його керівництвом в 1896 р. почалось практичне застосування рентгенодіагностики в Одеських лікарнях.

В 1910 р. була створена перша в Росії радіологічна лабораторія в м. Одеса. Ініціатором її створення і керівником був талановитий геохімік і радіолог Є. С. Бурксер. З 1911 р. в лабораторії почали проводити дослідження радіоактивності води, мулу, гірських порід та природних об'єктів Одеських лиманів, колодязної води і води з водогону Одеси. В грудні 1911 р. результати дослідів були представлені на Другому Менделєєвському з'їзді і надруковані в статтях «Исследования радиоактивности Одесских лиманов», «Радиоактивность одесской водопроводной воды».

У 1912 р. під керівництвом Є.С.Бурксера була організована перша експедиція на Кавказ для дослідження радіоактивності мінеральних джерел та природних об'єктів Грузії й Абхазії. За результатами експедиції Є.С.Бурксер зробив доповідь на «13-ом съезде русских естествоиспытателей и врачей» в 1913 р., після чого на з'їзді ухвалили рішення визнати важливість наукової діяльності

одеської радіологічної лабораторії і сприяти проведенню нею подальших радіобіологічних досліджень. У 1913 р. Євген Самойлович відправив другу експедицію для багаторічних досліджень природних об'єктів південних губерній Росії.

В 1912 р. у лабораторії був побудований перший в Одесі еманатор для приготування радіоактивної води, яку використовували для проведення дослідів і в лікувальних цілях для профілактики ракових захворювань. А з 1915 р. вже самостійно виділяли радій з відходів ферганської уранової руди і в 1917 р. мали 20 мг солей радію.

З 1915 р. Євген Самойлович розпочав серію багатолітніх і широкомасштабних досліджень радіоактивності атмосферного повітря в різних куточках Росії

З 1917 р. лабораторія займалась визначенням радону в різних водоносних горизонтах і встановила залежність концентрації радону від глибини водоносного горизонту. За розробку методу дослідження радіоактивних властивостей лікувальної грязі Російська академія наук в 1917 р. нагородила Є.С.Бурксера премією.

В 1921 р. на базі одеської радіологічної лабораторії було організовано Інститут прикладної хімії і радіології, який у 1925 р. трансформувався в Хіміко-радіологічний інститут під керівництвом Є.С.Бруксера. Це була друга в країні і перша в Україні велика науково-дослідна установа, що вивчала радіоактивні елементи та пов'язані з ними дослідження, після Державного радієвого інституту, створеного В.І.Вернадським в Петербурзі у тому ж 1921 р.

В 1927 р. Одеський хіміко-радіологічний інститут першим визначив кількісний склад радію в рослинах та різних живих організмах. В 1927 р. Є.С.Бурксер з співробітниками інституту І.Бруном та К.Бронштейном провели серію експериментів по виявленню радіоактивності рослин. В 1929 р. вчені Одеського радіологічного центру визначили вміст радію в продуктах харчування: пшениці, картоплі, яблуках, м'ясі, коров'ячому молоці, морських бичках та раках, після чого зробили висновок, що перелічені продукти харчування містять малі сліди радіоактивності, а концентрація радія в них така низька, що не перевищує його концентрацію в морській воді.

Після першого повідомлення про відкриття В.К.Рентгеном Х-променів професор Київського політехнічного інституту Г.Г.Де-Метц

повторив його експерименти в фізичній лабораторії університету і провів серію досліджень з їх дії на живі та неживі об'єкти. З цього часу провідною науковою темою Г. Г. Де-Метца стало вивчення природної радіоактивності та впливу іонізуючого випромінювання на живі істоти. Спочатку науковця цікавив технічний бік питання, тому він досліджував вплив різних фізичних факторів на отримання чіткої фотографії від іонізуючого випромінювання.

Георгію Георгійовичу вдалось отримати чіткі знімки жаби з зображенням внутрішніх органів. Він був переконаний, що X-промені можна застосовувати для діагностики внутрішніх органів і лікування людини.

Після отримання чітких фотографій натурних об'єктів з використанням X-променів і довівши перспективи їх застосування в медицині, український дослідник продовжував вивчати природу та властивості X-променів, їх проникну здатність щодо різних матеріалів. На цьому вчений не зупинився і дослідив вплив магнітного поля на проникну здатність X-променів. Результати досліджень у 1897 р. Георгій Георгійович опублікував у статті «Действие магнита на X-лучи». Георгій Георгійович дійшов висновку, що живі організми мають сталу низьку радіоактивність і не нагромаджують в своїх органах великої кількості радіоактивних елементів.

Де-Метц проводив дослідження вмісту радію у воді і флорі із ставка Київського ботанічного саду. В першу чергу його цікавило накопичення радію ряскою (*Lemna minor* L.). За результатами досліджень він зробив висновок, що деякі види живої тканини здатні вбирати й навіть концентрувати радій з води та навколишнього середовища. Тому коливання радіоактивності того чи іншого організму залежить від умов його існування. Після цього Георгій Георгійович вивчав вплив радію на рослини.

Г. Г. Де-Метц описує відомі на той час радіоактивні мінерали, приходить до висновку, що радіоактивність тісно пов'язана з ураном і торієм і тому пошук джерел, багатих на радіоактивні речовини треба спрямувати на уранові та торієві руди і мінерали. Він аналізував близько 68 різних уранових мінералів. Така велика їх кількість, на його думку, свідчить про значну роль урану в утворенні та існуванні Землі. Де-Метц описує картину географічного розподілу радіоактивних мінералів, найбагатших родовищ уранових руд.

Системні дослідження з радіобіології в Україні розпочалися у 1920 р. після створення Української рентгенівської академії у м. Харків, Київського рентгенівського інституту, Одеської радіологічної лабораторії під керівництвом Є. С. Бурксера та рентгеноонкологічного інституту ім. проф. Я. В. Зільберберта, які стали центрами розвитку в Україні досліджень з практичного застосування X-променів у медицині, геології.

Останні роки XIX – перші два десятиліття XX ст. можна вважати першим етапом розвитку радіобіології в Україні. У цей час нагромадилося безліч фактів про дію рентгенівських випромінювань і випромінювань радіоактивних елементів на різні біологічні об'єкти. Ці дослідження проводилися фізіологами, зоологами, ботаніками, лікарями, мікробіологами в межах своїх наук і хоча, безперечно, мали фундаментальне значення для розвитку радіобіології, носили в основному описовий характер.

Але радіобіологія як самостійна наука ще не існувала. Для її становлення не було головного - задовільної теорії, що пояснювала б механізм дії іонізуючої радіації на організм.

ЛЕКЦІЯ 2

ТЕМА: ПЕРВИННЕ ЗАБРУДНЕННЯ І ПЕРЕРОЗПОДІЛ РАДІОНУКЛІДІВ У ПРИРОДІ

1. Розвиток радіоекології. Поняття «радіонукліди»
2. Характеристика радіонуклідів
3. Вміст природних радіонуклідів у навколишньому середовищі
4. Штучні радіонукліди

1. Розвиток радіоекології. Поняття «радіонукліди»

Екологія – це наука, яка вивчає взаємозв'язки живих організмів та їх угруповань поміж собою та з навколишнім природним середовищем. Іншими словами, екологія вивчає комплекс взаємозалежних зв'язків між групами організмів у різних фізико-хімічних умовах, вплив навколишнього природного середовища на організми, реакції організмів на вплив факторів середовища, пристосовану здатність організмів.

Радіоекологія, або радіаційна екологія, – це розділ радіобіології, який виник на стику з екологією. Іноді її вважають розділом екології. Останнім часом виділяють навіть як окрему науку. Радіоекологія вивчає концентрації та поведінку (розподіл, міграцію, кругообіг) радіоактивних речовин в навколишньому природному середовищі і вплив їхнього іонізуючого випромінювання на живі організми та їх угруповання.

Особливо важливими є вирішення в галузі радіоекології таких завдань:

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

сільськогосподарської радіоекології більш конкретизовані і вони будуть викладені у кінці цього розділу.

Радіоактивний ізотоп, або радіоізотоп, – це нестійкий ізотоп, що розпадається. Так, елемент калій складається з трьох ізотопів – ^{39}K , ^{40}K і ^{41}K . Перший і третій з них – стійкі, стабільні, а ^{40}K – нестійкий, радіоактивний. Терміни «ізотоп», «радіоактивний ізотоп» використовується звичайно тоді, коли говориться про атоми одного і того ж елементу.

Радіоактивний елемент – це хімічний елемент, всі ізотопи якого радіоактивні. Наприклад, природний уран, який складається з трьох радіоактивних ізотопів – ^{234}U , ^{235}U і ^{238}U , а також торій, полоній, плутоній, америцій та інші, у склад яких входять виключно радіоактивні ізотопи.

Радіоактивна речовина – це речовина, до складу якої входить радіоактивний ізотоп. При цьому слід розуміти тільки хімічні сполучення атомів елементів, до складу котрих входять радіоактивні ізотопи. Наприклад, $3\text{H}_2\text{O}$, ^{40}KCl , $\text{K}_2^{35}\text{SO}_4$, $^{235}\text{UO}_2$, $^{90}\text{SrSO}_4$, $^{137}\text{CsNO}_3$.

Нукліди – це загальна назва атомів, що відрізняються кількістю нуклонів у ядрі або при однаковій кількості нуклонів містять різну кількість протонів чи нейтронів.

Радіонуклід, або радіоактивний нуклід, – це нестійкий, такий, що розпадається, нуклід. Термін «радіонуклід» звичайно застосовують для визначення атомів радіоактивних речовин, так як радіоактивні ізотопи, як правило, бувають у складі сполук і дуже рідко у вільному стані.

Так, говорять про радіонукліди ^{89}Sr і ^{90}Sr , ^{134}Cs і ^{137}Cs , ^{131}I і ^{132}I і т.д. В принципі поняття «радіонуклід» близьке поняттю «радіоізотоп». Всі існуючі радіонукліди ділять на два класи – природні радіонукліди і штучні радіонукліди. На теперішній час з відомих 1950 радіонуклідів (радіоактивних ізотопів) 70 природних, що належать до 25 радіоактивних елементів і деяких нерадіоактивних елементів, до складу яких входять радіоактивні ізотопи.

Основним джерелом надходження природних радіонуклідів в біосферу є земна кора. Значна частина може надходити з водою і

певна частка – з атмосфери.

Відомі також 1880 штучних радіонуклідів, які утворюються в умовах штучних ядерних реакціях розпаду деяких елементів, а також одержують при бомбардуванні нерадіоактивних елементів потоком високо енергетичних частинок. Для переважної більшості відомих елементів одержані радіоактивні ізотопи, кількість яких для деяких, як, наприклад для цезію, вимірюється десятками. Джерелами надходження штучних радіонуклідів в біосферу є атомні вибухи і ядерні реактори. Безперечно, у цих ситуаціях виникають далеко не всі відомі штучні радіонукліди, а лише декілька сотень. При цьому переважна більшість їх є короткоживучими і внесок у дозу опромінення об'єктів біосфери формують практично декілька десятків радіонуклідів.

2. Характеристика радіонуклідів

В земних породах, рудах, ґрунтах, водах і, відповідно, живих організмах – рослинах, тваринах та інших об'єктах навколишнього середовища виділяють первинні та космогенні радіонукліди. В первинних у свою чергу виділяють дві категорії радіонуклідів: радіонукліди, що утворюють родини та радіонукліди-продукти їх розпаду, і радіонукліди позародинні – що не утворюють родин.

Радіонукліди-родоначальники та основні дозоутворюючі радіонукліди їх похідні. Уран – сріблясто-білий метал зі щільністю $19,0 \text{ г/см}^3$ (для порівняння: свинець – $11,3$) і температурами плавлення та кипіння, відповідно, 1133 і $3860 \text{ }^\circ\text{C}$. Природний уран являє собою суміш трьох радіоактивних ізотопів: ^{234}U ($0,006\%$), ^{235}U ($0,7\%$) і ^{238}U ($99,3\%$). Основне α -випромінювання з енергіями, відповідно, $4,84$, $4,47$ і $4,27 \text{ MeV}$ і періодами піврозпаду ($T_{0,5}$) – $2,4 \times 10^5$, $7,1 \times 10^8$, $4,5 \times 10^9$ років. Вихід супроводжуючого β - і γ -випромінювання відносно невеликий. Тому зовнішнє опромінення ураном особливої небезпеки не являє. Він стає небезпечним при внутрішньому попаданні в організм. Перехід урану з ґрунту в рослини незначний – коефіцієнти накопичення (КН) для різних видів варіюють в межах 10^{-4} - 10^{-3} . Надходження урану в організм людини можливе при його видобутку на рудниках і

збагаченні на відповідних підприємствах.

При надходженні урану в організмі з продуктами харчування його транспорт і засвоєння залежать від розчинності його сполук. Розчинні сполуки швидко всмоктуються у кров і розносяться по організму. Швидко він і виводиться з калом і сечею. У дорослої людини затримується лише близько 1% елемента, що надійшов, у дітей – дещо більше. Основні місця його накопичення – нирки, печінка, кістки. Періоди піввиведення (Тб) з цих органів для людини складають, відповідно, 16^{-32} , 100^{-200} і 450 діб. Нирки найбільш піддані його як радіаційній, так і хімічній дії. При надходженні через органи дихання (наприклад, з пилом уранової руди) затримується в легенях, що призводить до їх радіаційного ураження. За такого інгаляційного надходження Тб з легень складає 118–150 діб. Сполуки урану самі по собі токсичні. Тому у ранні періоди дії переважає хімічна токсичність елемента, а радіаційний фактор проявляється, як правило, пізніше. При тривалому надходженні сполук урану може розвинути хронічна форма променевої хвороби. Основний ізотоп ^{238}U , а також ^{235}U є родоначальниками радіоактивних родин.

Ізотоп ^{235}U є основною енергетичною сировиною для одержання ядерного пального і ядерної зброї.

Торій – сріблясто-білий метал зі щільністю $11,7 \text{ г/см}^3$, температурами плавлення і кипіння, відповідно, 1750 і 4200°C . Практично на 100% представлений ізотопом ^{232}Th , хоча і виявлені сліди природних ізотопів з масовими числами 227, 228, 230, 231, 234.

Торій може надходити в організм тільки при роботі з ним і в основному через органи дихання у вигляді аерозольних частинок чи газоподібних продуктів. Накопичується переважно в легенях, менше у печінці, нирках, селезінці, кістках. ^{232}Th також є родоначальником радіоактивної родини, в тому числі виникнення ізотопів радю, радону, полонію та інших. Зі сплаву ^{232}Th і збагаченого ^{235}U виготовляють твели (тепловиділяючі елементи) – ядерне паливо для атомних електростанцій.

Радій – ковкий, блискучий, сріблясто-білий метал з групи лужноземельних зі щільністю $5,0 \text{ г/см}^3$ і температурами плавлення та кипіння, відповідно 690 і 1536°C . Відомі природні ізотопи радю з

масовими числами 222, 224, 226 і 228. Всі вони радіоактивні. Найбільш довгоживучим є ізотоп ^{226}Ra з $T_{0,5}$ 1620 років. Прожарена сіль радію є чистим α -випромінювачем з енергією 4,86 МеВ. При накопиченні у ній продуктів розпаду вона стає джерелом β - і γ -випромінювання. Рівноважна сіль радію є потужним джерелом γ -випромінювання і до створення штучних γ -випромінюючих ізотопів була практично єдиним джерелом, яке використовувалося у радіаційній терапії.

До організму людини 90% радію надходить з їжею. Це остеотропний елемент і він переважно відкладається у кістках, з яких виводиться поволі через шлунково-кишковий тракт з T_b близько 17 років.

Радіонукліди позародинні, або такі, що не утворюють родин. Ця група включає ізотопи хімічних елементів, котрі звичайно вважаються не радіоактивними, так як відносна кількість радіоактивних ізотопів у них складає, як правило, дуже незначну частку. До них у першу чергу відносяться ізотопи калію – ^{40}K , кальцію – ^{48}Ca , рубідію – ^{87}Rb , цирконію – ^{96}Zr , лантану – ^{138}La , самарію – ^{147}Sm , лютецію – ^{176}Lu . В усіх викопних органічних та органо-мінеральних породах що містять вуглець, присутній радіоактивний ізотоп ^{14}C . Але звичайно його відносять до радіонуклідів космогенного походження. Основний внесок у природну радіоактивність з ізотопів цієї групи вносить ^{40}K , кількість котрого у суміші ізотопів калію складає лише 0,012% (^{39}K і ^{41}K – 93,22 і 6,77%, відповідно). Періоди піврозпадів ізотопів цієї групи також дуже великі. Саме їх разом з радіоактивними елементами родоначальниками родин відносять до первинних природних радіонуклідів, котрі виникли разом з Землею, вважаючи вторинними радіонуклідами продукти їх розпаду – вже згадані радіоактивні ізотопи радону, полонію, радію та інші, а також космогенні радіонукліди.

Основні дозоутворюючі радіонукліди Калій-40.

Калій – сріблясто-білий блискучий метал з групи лужних зі щільністю $0,86 \text{ г/см}^3$ і температурами плавлення і кипіння, відповідно, 63 і $776 \text{ }^\circ\text{C}$. Природний калій складається з трьох ізотопів: двох стабільних – ^{39}K (93,08%) і ^{41}K (6,91%) і

радіоактивного ^{40}K (0,01%) з $T_{0,5}$ $1,32 \times 10^9$ років, який є β - і γ -випромінювачем з енергіями, відповідно, 1,325 і 1,459 МеВ. ^{40}K надходить до організму з їжею і водою. Він практично повністю всмоктується в ШКТ і рівномірно розподіляється в органах і тканинах. Половина його відкладається у м'язах. ТП/В з м'язів, селезінки, печінки, мозку людини у середньому складає 58 діб, коливаючись від 40 діб для м'язів до 80 діб для печінці. Для скелета ця величина складає 140 діб. За деякими даними на частку ^{40}K відноситься до половини дози внутрішнього опромінення живих організмів, в тому числі людини.

Рубідій-87. Рубідій – сріблясто-білий блискучий метал з групи лужних зі щільністю $1,53 \text{ г/см}^3$ і температурами плавлення і кипіння, відповідно, 39 і 686°C . Природний рубідій складається з двох ізотопів: стабільного ^{85}Rb

^{85}Rb (72,15%) і радіоактивного ^{87}Rb (27,85%) з $T_{0,5}$ $6,15 \times 10^{10}$ років, який, як і калій, є β - і γ -випромінювачем з енергіями, відповідно, 0,275 і 0,394 МеВ, тобто значно м'якшим за ^{40}K . Біологічна роль рубідію як елемента не відома. Будучи хімічним аналогом калію, він надходить до організму разом з ним, рівномірно розподіляючись по органам і тканинам, вносячи певну частку до додаткового їх опромінення.

3. Вміст природних радіонуклідів у навколишньому середовищі

Вміст радіонуклідів у земній корі і, відповідно, воді варіює у дуже широких межах, що визначається, головним чином, їх вмістом у земних породах. Осадкові породи – глини, вапняки, вугілля, як правило, слаборадіоактивні. Виверженні гірські породи – граніти, базальти містять значно більші кількості радіоактивних елементів. Дуже багаті на торій і радій так звані монацитові піски, основу яких складає мінерал монацит – фосфати рідко земельних елементів переважно церієвої групи. Відомі і радіоактивні водні джерела.

Природні радіонукліди ділять також на легкі та важкі. У групу важких природних радіонуклідів виділяють у зв'язку з високою радіотоксичністю нукліди радіоактивних родин – радіоактивні

елементи і ізотопи атомною масою більше 200. Решта віднесена до легких природних радіонуклідів.

Масова кількість природних радіоактивних елементів, як і радіоактивних ізотопів звичайних елементів, у земній корі, а, відповідно, у воді, рослинах, тваринах, дуже мала. Так, вміст у ґрунтах радію складає $1-13 \times 10^{-11}\%$, урану – $2,6-4 \times 10^{-4}\%$, торію – $5-12 \times 10^{-4}\%$. Невелика і кількість радіоактивних ізотопів стабільних елементів. Так, вміст у ґрунті ^{14}C варіює в межах $1-30 \times 10^{-9}\%$, ^{40}K – $1-5 \times 10^{-4}\%$. Вміст ^3H у воді складає приблизно 10^{-18} частку по відношенню до водню ^1H .

У різних регіонах Землі потужність природного радіаційного фону (ПРФ) в основному варіює в межах від 0,05 до 0,15 мкЗв/год, складаючи у середньому 0,1 мкЗв/год, тобто приблизно 10 мкР/год. Внесок у нього космічного випромінювання, який дещо залежить від широти місцевості, на рівні моря більш-менш постійний – 0,01-0,03 мкЗв/год. Решта, яка визначається випромінюванням природних радіонуклідів, варіює у більш широких межах, так як залежить від їх вмісту у поверхневих шарах земної кори.

4. Штучні радіонукліди

Стронцій-90. Стронцій – ковкий сріблясто-білий метал з групи лужноземельних зі щільністю $2,6 \text{ г/см}^3$ і температурами плавлення та кипіння, відповідно 770 і 1357 °С. Природний стронцій складається з чотирьох стабільних ізотопів: ^{84}Sr (0,56%), ^{86}Sr (9,86%), ^{87}Sr (7,02%) і ^{88}Sr (82,56%). При реакції поділу урану в ядерних реакторах виникає 19 штучних ізотопів з масовими числами 77-83, 85, 89-99. Переважна більшість їх короткоживучі. Практичне значення мають ізотопи ^{89}Sr і ^{90}Sr з $T_{0,5}$, відповідно, 50,5 діб і 29 років і енергіями β -випромінювання 1,463 і 0,544 МеВ. У навколишнє середовище ізотопи стронцію надходять з продуктами ядерного поділу при випробуваннях атомної зброї, викидами підприємств ядерної енергетики, в результаті аварій на останніх.

Біологічна роль стронцію як елемента не відома. Будучи хімічним аналогом кальцію, він надходить до організму разом з ним з їжею і водою. При радіоактивних випаданнях може надходити через

легені та шкіру. Основний орган депонування – скелет, у якому накопичується 40-70% радіоактивного стронцію. Решта відкладається у м'язах, печінці, нирках. З віком засвоюваність стронцію, як і кальцію, знижується.

Йод-131. Йод – тверда чорно-сіра речовина з металічним блиском зі щільністю $4,94 \text{ г/см}^3$, хоча належить до неметалів, зі специфічним запахом, відноситься до галогенів.

Природний йод представлений стабільним ізотопом ^{127}I . Температури плавлення і кипіння складають, відповідно, $113,5$ і $184,4$ °C. Важливою властивістю йоду є здатність до сублімації – переходу з твердого стану до газоподібного при кімнатній температурі. Відомі 26 штучних радіоактивних ізотопів. Найбільший практичний інтерес мають ізотопи ^{129}I , ^{131}I , ^{132}I та ^{133}I , які виникають за реакцій поділу урану і плутонію. З них найбільший T $0,5$ – $8,04$ доби має ^{131}I . При ядерних вибухах радіоактивні ізотопи йоду складають значну частину активності «молодих» продуктів поділу і являються одними з основних компонентів радіоактивного забруднення навколишнього середовища.

До організму людини йод в основному надходить інгаляційним шляхом та з їжею, переважно з молоком, свіжими молочними продуктами, листовими овочами. У хребетних тварин він входить до складу ферментів щитоподібної залози тироксину і трийодотиронину, які мають багатосторонню дію на процеси росту, розвитку і обміну речовин в організмі. Накопичення радіоактивних ізотопів йоду в залозі, в якій відкладається до 70% усього йоду, що надійшов до організму, може утворювати осередки потужного її опромінення, призводячи до різних захворювань, аж до раку. У дітей дози опромінення можуть в 2-10 разів перевищувати дози дорослих. З організму йод переважно виводиться через нирки. Тб з щитоподібної залози складає 120 діб.

Цезій-134 і -137. Цезій – сріблясто-жовтуватий блискучий метал з групи лужних зі щільністю $1,87 \text{ г/см}^3$ і температурами плавлення і кипіння, відповідно, 29 і 670 °C. Природний цезій представлений стабільним ізотопом ^{133}Cs . При поділу урану в ядерних реакторах

виникає 23 штучних ізотопів з масовими числами 123-133 і 134-144. Переважна більшість їх короткоживучі. Практичне значення мають ізотопи ^{134}Cs і ^{137}Cs з $T_{0,5}$, відповідно, 2,06 і 30,17 років і енергіями β -випромінювання 0,512 і 0,520 та γ -випромінювання – 1,367 і 0,662 MeV. У навколишнє середовище ізотопи цезію надходять з продуктами ядерного поділу при випробуваннях атомної зброї, викидами підприємств ядерної енергетики, в результаті аварій на останніх. Біологічна роль цезію як елемента не відома. Будучи, як і рубідій, хімічним аналогом калію, він надходить до організму разом з ним, рівномірно розподіляючись по органам і тканинам. Проте внесок ^{134}Cs і ^{137}Cs до додаткового опромінення організму може бути дуже значною.

Плутоній – сріблясто-білий метал зі щільністю $19,8 \text{ г/см}^3$, температурами плавлення і кипіння, відповідно, 639 і $3235 \text{ }^\circ\text{C}$. Вперше був одержаний у штучних умовах. Відомі радіоактивні ізотопи плутонію з масовими числами 232–246. Практичне значення мають ^{238}Pu і ^{239}Pu з середніми енергіями α -випромінювання, відповідно, 5,58 і 5,23 MeV та періодами піврозпаду років. Вихід м'якого (низько енергетичного) β - і γ -випромінювання відносно незначний. Велике значення належить також ізотопу ^{241}Pu , котрий, будучи м'яким β -випромінювачем ($T_{0,5}$ 15 років), переходить в α -випромінюючий ізотоп ^{241}Am . Джерелами надходження плутонію у навколишнє середовище є випробування ядерної зброї, атомні електростанції, аварії на підприємствах ядерної енергетики.

ЛЕКЦІЯ 3

ТЕМА: РАДІОМЕТРІЯ

1. Радіометрія
2. Прилади для дозиметрії та радіометрії

3. Фізичні та хімічні методи реєстрації радіоактивного випромінювання

4. Радіонукліди у хімічному аналізі

1. Радіометрія

Радіометрія – розділ прикладної ядерної фізики, радіоекології та радіобіології, що розробляє теорію і практику вимірювання радіації та ідентифікації радіоактивних ізотопів. З цією метою розробляються і використовуються радіометри таких груп:

1. Прилади для визначення радіаційного забруднення води, ґрунту, рослинних і харчових продуктів методом «прямого» вимірювання. Здійснюється визначення радіаційного забруднення безпосередньо на певній місцевості.

2. Прилади для визначення радіаційного забруднення засобів транспорту, одягу.

3. Прилади для проведення спеціальних досліджень у біології, медицині.

4. Прилади для проведення аналізу радіоактивного складу проб спектрометричними (оптичних спектрів) методами.

Всі ці прилади ділять на стаціонарні (лабораторні) і переносні; за видом реєстрації – універсальні і призначені для реєстрації одного виду радіації за типом детекторів (виявлювачів), що використовуються – сцинтиляційні (принцип роботи оснований на збудженні зарядженими частинками) і газорозрядні.

Основні методи виявлення і вимірювання радіації є наступні: фотографічний, хімічний, сцинтиляційний, люмінесцентний, іонізаційний, калориметричний.

Фотографічний метод базується на впливі іонізуючих випромінювань на світлочутливий шар фотоплівки, щільність потемніння якої пропорційна дозі опромінення.

Хімічний метод ґрунтується на здатності іонізуючих випромінювань спричиняти хімічні зміни деяких речовин, що супроводжуються появою нового забарвлення розчину цих речовин.

Сцинтиляційний метод використовує явище світіння деяких речовин під впливом іонізуючого випромінювання. Кількість спалахів пропорційна інтенсивності випромінювання.

Іонізаційний метод використовує явище іонізації атомів речовин під впливом іонізуючого випромінювання, внаслідок чого електричної нейтральні речовини розпадаються і утворюють іони. Цей метод найчастіше використовують у дозиметричних приладах. Основними елементами цих приладів є приймальний пристрій, підсилювач іонізуючого струму, вимірювальний прилад, перетворювач струму, джерело живлення. Цей метод базується на використанні властивості радіації іонізувати середовище, в якому вона розповсюджується (тобто розщеплювати нейтральні молекули або атомні пари на позитивні та негативні іони). Якщо газів у замкненому об'ємі (іонізаційна камера) надати електричний струм, іони, що утворюються при опроміненні набудуть упорядкованого руху: позитивно заряджені до анода, а негативно – до катода. У результаті між електродами (анодом і катодом) виникає так званий іонізаційний струм, величина якого прямо пропорційна потужності дози іонізуючого випромінювання. Калориметричний метод базується на вимірюванні тепла, що виділяється в речовині при поглинанні опромінення.

Прилади дозиметричного контролю іонізуючих випромінювань призначені для вимірювання потужності іонізуючого випромінювання (рівня радіації) і ступеня радіоактивного забруднення різних предметів. На основі радіометричних досліджень визначаються заходи і дії за умов визначеного рівня забруднення.

У залежності від завдання прилади радіаційного і хімічного контролю поділяють на такі:

- Визначення потужності доз гама-випромінювання здійснюється дозиметрами типу ДРГ-01Т або ДП-5Б (ДП-5В);
- Вимірювачі потужності дози, з допомогою яких вимірюються рівні радіації (ДП-3б, ВДП-21с, ВДП-21Б);
- Вимірювачі потужності дози мікродіапазонні комбіновані прилади (ДП-5А, Б, В; ВДП-12);
- Вимірювачі поглинання дози (ІД-1, ІД-11) – це прилади індивідуального дозиметричного контролю, за допомогою яких виявляють яку дозу одержала людина чи тварина (персонально) за відповідний період;
- Дозиметри для певного одного виду випромінювання (ДК-02, ДКП-50, ДП-22В, ДП-24);

- Газосигналізатори автоматичні, за допомогою яких проводять автоматичний контроль навколишнього середовища з метою виявлення отруйних парів радіаційних речовин, аерозолів (ГСА-12, АСП, ГСП-11, ГС-СОМ);

- Декадно-розрахунковий пристрій, призначений для вимірювання кількості електричних імпульсів при виявленні ступеня зараженості радіаційними ізотопами води, продуктів харчування, повітря, проб ґрунту тощо (ДП-100, ДП-100 АДМ).

Всі ці прилади повинні проходити перевірку в спеціальних контрольних державних лабораторіях чи установах.

2. Прилади для дозиметрії та радіометрії

Залежно від призначення виділяють два класи приладів, що використовуються для вимірювання радіоактивності в навколишньому середовищі. Це дозиметри - прилади, призначені для вимірювання експозиційної дози або потужності дози рентгенівського, γ -випромінювання, поглиненої дози або потужності поглиненої дози іонізуючих випромінювань.

Радіометри – прилади, призначені для визначення питомої активності об'єктів радіометричного контролю. У будові цих приладів особливої різниці немає. Усі вони повинні мати детектор випромінювань тієї чи іншої системи. Як правило, іонізація атомів викликає невелике збудження системи. Тому акт іонізації потрібно підсилити і зареєструвати. І, безперечно, усі ці блоки приладу повинні бути забезпечені енергією (блок живлення).

Дозиметри визначають поглинену дозу в одиницях Грей (рад), потужність поглиненої дози - у Гр/с (рад/с), експозиційну дозу – у Кл/кг (Р) і потужність експозиційної дози – у Кл/кг⁻³ (Р/с). Дозиметри використовують також для визначення інтенсивності випромінювання в одиницях Вт/м² (МеВ/см²). Радіометри визначають питому об'ємну, поверхневу або масову активність відповідно в Бк/м³ (Кі/л), Бк/м² (Кі/см²), Бк/кг (Кі/кг). Переносні радіометри в основному використовують для визначення питомої активності поверхні ґрунту, будов, матеріалів і т.п. Стационарні радіометри використовують для визначення питомої масової або об'ємної активності ґрунту, рослинності, кормів, продуктів харчування, води й т.д.

Дозиметри. Вимірювання експозиційної дози, поглиненої дози й потужності дози випромінювання. Залежно від призначення дозиметри ділять на три групи:

- кишенькові прилади для індивідуального дозиметричного контролю;
- переносні прилади групового дозиметричного і радіаційно-технологічного контролю;
- стаціонарні прилади для дозиметричного і радіаційно-технологічного контролю.

Дозиметр кишеньковий прямопоказуючий ДК-0,2 призначений для контролю за експозиційною дозою жорсткого рентгенівського та -випромінювання з енергією 0,2-2,0 МеВ в діапазоні 0,01-0,20 Р. Потужність експозиційної дози не повинна перевищувати 6 Р/год. В комплект приладу входять десять вимірювальних камер ДК-0,2 і зарядний пристрій ЗД-6, призначений для зарядки дозиметрів. Саморозрядка дозиметра не перевищує 10% значення шкали за добу. Похибка виміру $7 \pm 10\%$. Вимірювальна камера складається з трьох частин: інтегруючої іонізаційної камери з повітряно-еквівалентними стінками, електроскопу та мікроскопу. Конденсатор, утворений внутрішніми стінками камери і центральним електродом, заряджується до визначеного потенціалу. При дії випромінювання повітря в робочому об'ємі дозиметра іонізується, і потенціал камери зменшується пропорційно дозі опромінення.

Його вимірюють за допомогою вмонтованого в дозиметр мініатюрного електроскопу. Відхилення рухомої системи електроскопу (платинована кварцова нитка діаметром 5 мкм) визначається по шкалі мікроскопа, що від градуйована в мілірентгенах. Конструктивно дозиметр виконано у вигляді авторучки з утримувачем для закріплення на одязі. Циліндричний корпус із дюралюмінію виконує функцію зовнішнього електрода іонізаційної камери.

Об'єм камери – $1,8 \text{ см}^3$. Зарядний пристрій має корпус та зарядне гніздо для дозиметра, потенціометр для встановлення необхідної напруги на конденсаторі у діапазоні 180-250 В. Принцип роботи зарядного пристрою ЗД-6 базується на п'єзоелектричному ефекті. Під впливом тиску дозиметра на п'єзоелементи перетворювача механічної енергії в електричну відбувається деформація та утворення на їх протилежних сторонах різниці потенціалів.

Позитивний заряд подається на стержень зарядного пристрою, негативний - на корпус.

Для зменшення вихідної напруги зарядного пристрою використовується розрядник. Зарядний пристрій ЗД-6 призначений також для зарядки інших прямо-показуючих дозиметрів: ДКП-50, ІД-1, ІД-0,2. Індивідуальний дозиметр ДКП-50, що входять до комплекту ДП-22-В і ДП-24, - це кишенькова конденсаторна камера, призначена для вимірювання індивідуальних доз фотонного випромінення в аварійних умовах в діапазоні 2-50 Р при потужності дози 0,5-200 Р/год (енергія фотонів становить 0,2-2,0 МеВ. Саморозряд дозиметра не вище Р за добу. Похибка виміру $7\pm 15\%$. Комплектація, конструкція і принцип дії цих приладів аналогічні дозиметру ДК-0,2.

Комплект індивідуального дозиметричного контролю КІД-2 призначений для індивідуального дозиметричного контролю при роботі з рентгенівським і -випроміненням з енергією 0,02-2,0 МеВ в діапазоні 0,005-1,0 Р. Цей діапазон вимірювань розбито на два піддіапазони: 0,005-0,05 Р при потужності експозиційної дози, яка не перевищує 6 Р за годину і 0,05-1,0 Р при потужності експозиційної дози до 120 Р за годину. Саморозряд конденсаторних камер дозиметра не перевищує 0,002 Р за добу. Похибка вимірювання в діапазоні енергії 150 кеВ - 2,0 МеВ становить $7\pm 10\%$, в діапазоні енергій 10-150 кеВ - $7\pm 60\%$.

В комплект даного приладу входять зарядно-вимірювальний пристрій і дозиметри. Дозиметр складається з двох іонізаційних камер, розрахованих на максимальні експозиційні дози 0,05-1 Р. Кожна камера - це електрична ємність, утворена центральним електродом і корпусом. Зарядно-вимірювальний пристрій служить для зарядки конденсаторних камер та визначення дози. Живлення зарядно-вимірювального пристрою здійснюється від мережі змінного струму.

Комплект індивідуального дозиметричного контролю КІД-1, призначений для вимірювання експозиційних доз жорсткого рентгенівського та -випромінення в діапазонах 0,02-0,2 Р і 0,2-2,0 Р. Він являє собою модифікацію комплекту КІД-2. Конструктивно зарядно-вимірювальний пульт приладу КІД-1 виконаний у вигляді настільного приладу з похилою передньою панеллю та з'ємною кришкою. На панелі знаходяться: вимірювальний прилад з регулятором установки нуля шкали, гнізда «Заряд» і «Вимір», регулятор установки зарядної напруги, тумблер вмикання та дві

сигнальні лампи, що вказують робочі під діапазони 0,2 і 2,0 Р.

Принцип дії дозиметра КІД-1 та порядок роботи з ним аналогічний дозиметру КІД-2. Загальним недоліком іонізаційних конденсаторних камер дозиметрів ДК-0,2, ДКП-5А, КІД-1, КІД-2 та їх аналогів є саморозряд. Тому дозиметри використовують протягом одного робочого дня. Саморозряд дозиметра контролюють по контрольному дозиметру, який знаходиться протягом робочого дня у свинцевому контейнері.

Індивідуальний дозиметр типу ДКС-04 «Стриж» використовується для виявлення, оцінки та вимірювання за допомогою звукової та світлової сигналізації щільності потоку теплових нейтронів, рентгенівського та жорсткого -випромінень. Дозиметр подає звуковий та світловий сигнали при наявності потоку теплових нейтронів, жорсткого -випромінення з енергією більше 0,5 МеВ, а також рентгенівського та -випромінення. Цей прилад вимірює потужність експозиційної дози і експозиційну дозу рентгенівського та -випромінень в діапазоні енергій фотонів 0,05-3,0 МеВ.

Діапазон потужності експозиційної дози – 0,1-999,9 мР/год ($7,16 \cdot 10^{-12}$ - $7,16 \cdot 10^{-8}$ А/кг); діапазон вимірювань експозиційної дози 1-4096 мР ($2,58 \cdot 10^{-7}$ - $1,03 \cdot 10^{-3}$ Кл/кг). Детектором - випромінення є малогабаритний газорозрядний лічильник типу СБМ-21 з додатковим циліндричним кадмієвим фільтром. Використання кадмію збільшує чутливість детектора на теплові нейтрони у чотири рази внаслідок реєстрації захоплюючого нейтронного випромінювання. В результаті впливу іонізуючого випромінення на виході детектору виникають імпульси, котрі за допомогою електричної схеми перетворюються у звукову та світлову сигналізації, а також цифрову інформацію про значення експозиційної дози та її потужності. Сигналізація працює в режимах «Межа» експозиційної дози та «Пошук». В другому режимі сигналізація спрацьовує від кожного імпульсу, зареєстрованого лічильником. В першому режимі сигналізація включається при перевищенні значень дози 1 мР ($2,6 \cdot 10^{-7}$ Кл/кг). Живлення дозиметра здійснюється від мережі змінного струму та акумуляторів типу Д-01. Конструктивно дозиметр виконано у вигляді портативного кишенькового приладу. Корпус зроблено із міцного протиударного полістеролу у вигляді прямокутної коробки, що складається з двох з'єднаних між собою половинок.

Дозиметр-радіометр МКС-05 «ТЕРРА» дає можливість вимірювання еквівалентної дози (ЕД) і потужності еквівалентної

(ПЕД) дози, часу накопичення еквівалентної дози, а також поверхневої щільності потоку β -частинок. Діапазони вимірювання потужності еквівалентної дози γ -і рентгенівського випромінювань (^{137}Cs) 0,1-9999 мк³в/год., відносна погрішність вимірювання $\pm 15\%$.

Переносні прилади. Загальний контроль потужності дози зовнішнього - та рентгенівського випромінювань здійснюється за допомогою рентгенометрів. Вони призначені для оцінки радіаційного стану, перевірки надійності засобів захисту від фотонного випромінювання і зберігання високоактивних -випромінюючих ізотопів, які при взаємодії з матеріалами захисних контейнерів, утворюють гальмівне випромінювання, наприклад ^{90}Sr . Рентгенометри різних типів складаються з лічильника ядерних випромінювань, для чого використовують іонізаційну камеру, газорозрядний або сцинтиляційний лічильник посилювача і нормалізатора імпульсів струму. Вихідними пристроями є стрілочні прилади (мікроамперметри), декатрони, рідкі кристали, що видають цифрову індикацію та ін. Нерідко рентгенометри можуть бути обладнані звуковою сигналізацією, що спрацьовує при заданому порозі. Шкала цих приладів відградуєвана в одиницях потужності експозиційної дози - Р/год, мР/год, мкР/год, або в одиницях еквівалентної дози фотонного випромінювання - м³в/год, мк³в/год.

Деякі рентгенометри, наприклад СРП-68-01, СРП-88, можуть працювати і в імпульсному режимі, тобто реєструвати окремі імпульси струму, що виникають при взаємодії -кванту з детектором. Такі прилади називають рентгенометрами-радіометрами. Вони оснащені перемикачем виду робіт і мають подвійне позначення шкали (мкР/год та с-1). Якщо прилади даного типу оснащені змінними блоками детектування, то вони стають універсальними, тобто призначеними для рішення багатоцільових задач, включаючи вимірювання потужності дози фотонного випромінювання, визначення ступеню забруднення поверхні - та (або) -активними ізотопами, вимірювання густини потоку швидких і теплових нейтронів (прилади МКС-04, УІМ-2-1еМ). Геологорозвідувальний рентгенометр СРП 68-01 є одним з найбільш чутливих з переносних дозиметрів. Він призначений для вимірювання потужності експозиційної дози γ -випромінювання в діапазоні 0-3000 мкР/год. У ньому використаний сцинтиляційний детектор з кристалом NaI (Т1) і ФЕМ.

Прилад дозволяє проводити вимірювання потоку -квантів в межах від 0 до 10000 с-1 і потужності експозиційної дози -

випромінювання в межах від 0 до 3000 мкР/год. Діапазон вимірювань поділено на під діапазони: для вимірювання потоку -квантів (с-1) на 100, 300, 1000, 3000, 10000; для вимірювання потужності експозиційної дози (мкР/год) на 30, 100, 300, 1000, 3000. Для контролю роботи приладу в нього вмонтовано джерело ^{60}Co з періодом піврозпаду 5,25 років. Нижній поріг дискримінації - випромінювання для енергії знаходиться в межах від 15 до 35 кеВ. Межі допустимої основної похибки вимірювань $7\pm 15\%$. Час для встановлення робочого режиму не більше 1 хв. з моменту вмикання приладу. Стала часу інтегрування 2,5-5 с. При сталій часу 5 с підвищується точність підрахунку, але при цьому зростає інертність приладу. Комплект живлення приладу складається з 9 елементів типу «343», що з'єднані послідовно і забезпечують безперервну роботу протягом 8 годин.

У радіометрах типу ДРГЗ-01, ДРГЗ-02, ДРГЗ-03, МКС-04 використовують сцинтиляційні детектори з комбінованим повітряноеквівалентним пластмасовим сцинтилятором і ФЕМ. Діапазон вимірювання потужності експозиційної дози цими приладами – 0,1-1000 мкР/с. Переносний радіометр КРБ-1 призначений для вимірювання сумарної β -активності (бета-забруднення) поверхонь у діапазоні від 10 до 107 розп/(хв. \cdot см²) при рівні гамма-фону від 10^{-4} до 1 рад/год. Як детектори в ньому використані газорозрядні лічильники СИ-8Б и СИ-19БГ.

3. Фізичні та хімічні методи реєстрації радіоактивного випромінювання, їх загальна характеристика

Напівпровідникові лічильники. Принцип дії напівпровідникових лічильників схожий на принцип дії йонізаційних камер. Ядерна частинка, що попадає в електричне поле, створене в низькопровідному середовищі, йонізує його, в результаті чого виникає електричний імпульс. У випадку газової камери частинками-провідниками є електронно-йонні пари, у випадку твердого тіла - електронно-діркові пари.

Напівпровідникові детектори мають ряд переваг порівняно з іншими:

- на створення електронно-діркової пари потрібно приблизно в десять разів менше енергії, ніж електронно-йонної, що дає можливість отримати краще електричне розділення;

- напівпровідникові детектори можуть працювати в широкій області енергій йонізуючих часток (від сотень KeV до сотень MeV);
- ці лічильники не потребують високої напруги, мають невеликі розміри, працюють у широкому інтервалі температур, не чутливі до сильного магнітного поля.

Калориметричний метод вимірювання інтенсивності випромінювань. Калориметричний метод заснований на вимірюванні кількості тепла, що виділяється у результаті взаємодії випромінювання з речовиною. Для цього необхідно, щоб все випромінювання поглиналось в калориметрі, що просто здійснити для α -і β -частинок і важко досягти для γ -випромінювання. Калориметричні методи дають можливість безпосередньо визначати поглинуту дозу, не вимагають від експериментатора великих зусиль. У разі правильного вибору методики можна отримувати такі ж точні результати, як і під час йонізаційних вимірювань. Разом з тим, калориметрична техніка, має і специфічні недоліки, які обмежують її широке використання.

Калориметричні методи володіють низькою чутливістю (зазвичай необхідна потужність дози, що перевищує 1 Крад/г), потребують великих витрат часу, а необхідна для роботи апаратура виявляється складною і громіздкою. Витрати поглинутої енергії на побічні процеси, крім нагрівання (наприклад, на хімічні перетворення, вторинне випромінювання), призводять до помилок. У більшості випадків, однак, побічні процеси можна врахувати за допомогою відповідних поправок.

Калориметричний метод має переваги перед іншими методами у вимірюванні абсолютної активності α - і β -препаратів, тому що зникає потреба у використанні специфічних правил приготування препаратів, які враховують самопоглинання в препараті. Хімічний метод реєстрації випромінювань.

Хімічний метод використовується переважно для вимірювання великих доз (10^3 - 10^5 Р, іноді до 10^9 Р), хоча останнім часом з'явилися дозиметри, чутливі до десятків Рентген.

Дія хімічних дозиметрів ґрунтується на вимірюванні кількості продуктів хімічної реакції, що відбулась під дією випромінювання. Найчастіше використовується феросульфатний дозиметр, у якому ферум(II) під дією випромінювання окиснюється до тривалентного стану, і концентрація останнього вимірюється звичайними хімічними методами. Феросульфатний дозиметр уявляє собою насичений

киснем розчин солі Мора ($10^{-2} - 10^{-3}$) в 0,8 М розчині сульфатної кислоти. На кожні 100 еВ поглинутої енергії в середньому $15,5 \pm 0,1$ атомів Fe_2^+ переходить у Fe_3^+ . Під час вимірювання доз у інтервалі $4 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$ точність вимірювання не нижча 1%.

Іноді використовується реакція, заснована на відновленні церій(IV) сульфату до тривалентного стану в сульфатнокислому середовищі під дією випромінювання. Для вимірювання порівняно низьких доз (20-1000 Р) використовуються дозиметри з хлорованими вуглеводнями, після опромінення яких виникають ланцюгові реакції, що зумовлює багатократне посилення початково слабкої хімічної реакції.

У тих випадках, коли висока точність вимірювання не обов'язкова, найбільш зручними хімічними дозиметрами є пластикові плівки. Перевага пластиків – їх низька вартість, прозорість для випромінювань, гнучкість, універсальність та доступність. Для дозиметрії використовують такі полімери, як целофан, поліетилен, полівінілхлорид та поліестери. Завдяки цим перевагам дозиметрія за допомогою пластикових плівок першою отримала промислове застосування в процесах стерилізації харчових та медичних продуктів, де необхідно контролювати дозу, отриману окремими зразками. Інша важлива галузь використання пластикових дозиметрів – вимірювання розподілу доз у глибині виробу і оцінка доз на різних ділянках поверхні скануванням електронним пучком.

4. Радіонукліди у хімічному аналізі

Радіоактивні ізотопи досить часто використовуються у хімічному аналізі. Кожний радіометричний метод має свої специфічні особливості і апаратуру. Загальним для всіх методів є використання радіоактивних ізотопів, що вимагає знання їх основних властивостей і техніки безпеки, а також необхідність вимірювання радіоактивності і вміння використовувати відповідну апаратуру.

Пряме визначення хімічних елементів за допомогою радіоактивних реагентів. Метод був розроблений у 1926 р. В. Еренбергом, який використовував для аналізу природні радіоактивні ізотопи Плюмбуму. Метод прямого радіометричного визначення оснований на осадженні досліджуваного елементу у вигляді малорозчинної сполуки надлишком реагенту заданої концентрації, міченого радіоактивним ізотопом з відомою питомою активністю. Цей метод може використовуватись у всіх випадках селективного

утворення досліджуваними йонами нерозчинного осаду з міченим реагентом.

Радіометричне титрування базується на тому, що визначуваний у розчині йон утворює з реагентом малорозчинну сполуку (або сполуку, яка легко екстрагується). Індикатором у цьому процесі служить зміна радіоактивності розчину. Точку еквівалентності визначають за зламом кривої титрування

Точність методу нижча за точність звичайних методів титрування, тому що поряд із звичайними помилками накладаються помилки вимірювання радіоактивності. Однак помилки, пов'язані з недосконалістю фіксації точки еквівалентності за індикатором, за умови використання радіоактивних індикаторів відсутні. Радіокулометричне титрування є варіантом осаджувального радіометричного титрування. В цьому випадку йони титранту регенеруються шляхом електролізу.

Метод ізотопного розведення заснований на розведенні розчину сполуки, міченої радіоактивним ізотопом, неактивним компонентом суміші. У цьому випадку питома активність сполуки, міченої радіоактивним ізотопом, зменшується. Після виділення визначуваної речовини вимірюють її радіоактивність. Знаючи початкову та кінцеву питоми активності, легко визначити вміст досліджуваної речовини. Цей метод дає можливість проводити кількісні визначення компонентів складної суміші, які важко повністю відділити один від одного. Він дає можливість визначити загальний вміст елементу в суміші чи вміст його у визначеному окисненому стані. Методом ізотопного розведення можна визначити вміст рідкісноземельних елементів у суміші, лужних елементів у випадку їх одночасної присутності, амінокислот у суміші, цирконію в присутності титану та гафнію. Метод дозволяє легко визначити вміст рухливого гідрогену в органічних сполуках.

Активаційний аналіз – заснований на утворенні радіоактивних ізотопів із стабільних ізотопів визначуваного елементу, який піддається опроміненню ядерними частинками. У результаті активність радіоактивного ізотопу, що утворився, пропорційна числу атомів визначуваного елементу. Активаційний аналіз доцільно використовувати для визначення малих домішок у речовинах великої чистоти, наприклад, домішок у напівпровідниках, конструкційних матеріалах ядерних реакторів і т.д. Зазвичай аналітичні методи в цьому випадку не використовуються внаслідок малої чутливості.

Визначення вмісту хімічних елементів за їх радіоактивністю. Кількісне визначення радіоактивних елементів, а також нерадіоактивних елементів, що містять в природній суміші ізотопів радіоактивний ізотоп, може бути виконано за їх випромінюванням. Визначають абсолютну радіоактивність (кількість розпадів за 1 с) аналізованого зразка і проводять розрахунок числа атомів радіоактивного ізотопу за законом радіоактивного розпаду.

У зв'язку з труднощами визначення абсолютної радіоактивності цей спосіб є малоприйнятним. Більш розповсюдженим є спосіб вимірювань, у якому радіоактивність аналізованого зразка порівнюється із вимірною в точних умовах радіоактивністю еталона, що містить відому кількість визначуваного елемента.

Фотонейтронний метод оснований на утворенні нейтронів під дією фотонів високої енергії на ядра хімічних елементів. Нейтрони, що виділяються, реєструють за допомогою нейтронних лічильників. Реакція здійснюється в тому випадку, коли фотони мають енергію, вищу за енергію зв'язку нейтронів у ядрі визначуваного елемента. Для більшості хімічних елементів енергія зв'язку нуклонів в ядрі складає 6-8 МеВ. Енергія зв'язку нуклонів у ядрі дейтерію складає 2,226 МеВ і берилію – 1,666 МеВ. Це дає можливість визначати, наприклад, берилій фотонейтронним методом у присутності інших елементів. Для цього необхідний потік фотонів з енергією 1,666 МеВ і у випадку присутності дейтерію – нижче 2,226 МеВ.

ЛЕКЦІЯ 4

ТЕМА: БІОЛОГІЧНА ДІЯ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

1. Характеристика іонізуючих випромінювань та взаємодія їх з речовиною
2. Реєстрація іонізуючих випромінювань
3. Захист від іонізуючого випромінювання

1. Характеристика іонізуючих випромінювань

Іонізуюче випромінювання, проходячи крізь речовину, витрачає свою енергію на іонізацію та збудження зустрічних атомів і поглинається цією речовиною. Енергію, витрачену зарядженою частинкою або фотоном електромагнітного випромінювання на одиницю довжини їх пробігу в речовині, називають лінійною передачею енергії (ЛПЕ).

В системі СІ її виражають в джоулях на метр. В радіобіології частіше використовують спеціальні одиниці, що використовуються для вимірювання енергії іонізуючих випромінювань – електрон-вольти (еВ). Один електрон-вольт (1 еВ) відповідає енергії, яку отримує електрон в полі напруженістю 1 вольт. $1 \text{ еВ} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. Тому ЛПЕ виражають в кілоелектронвольтах (кеВ, 103 еВ) на мікромметр шляху у воді (1 кеВ/мкм дорівнює 0,16 нДж/м). Довжина пробігу залежить від енергії фотонного випромінювання, заряду, маси і швидкості частинок; ця залежність різко збільшується із зниженням швидкості і збільшенням маси частинки.

Гамма-(γ -)випромінювання – це потік фотонів (квантів) електромагнітного випромінювання з енергією вище 100 кеВ. Енергія γ -квантів, що випускаються ядрами після α -розпаду, звичайно не перевищує 5 МеВ, після електронного розпаду – 2,0-2,5 МеВ. При анігіляції античастинок вона складає 0,511 МеВ. В середньому енергія γ -випромінювання різних радіоактивних елементів коливається в діапазоні 0,1-3 МеВ і рідко досягає 10 МеВ. γ -кванти з енергією до 1 МеВ утворюють випромінювання, яке назвали м'яким, а з енергією більше 1 МеВ – жорстким випромінюванням. γ -кванти, за рідким винятком, утворюють лінійчатий спектр випромінювання, постійний для кожного елемента. Моноенергетичний спектр випромінювання мають тільки деякі γ -випромінюючі ізотопи (^{137}Cs , ^{52}Mn , ^{141}La та інші), тому звичайно вказують їх середню енергію (\bar{E}).

У зв'язку з тим, що ймовірність зустрічі γ -квантів з електронами атома мала, вони мають велику проникну здатність. В повітрі γ -

кванти проходять шлях у декілька сотень метрів, в деревині – до 25 см, у свинці – до 5 см, в бетоні – до 10 см, у воді - десятки метрів, а живі організми вони пронизують наскрізь, являючи для них значну загрозу як джерело зовнішнього опромінення. ЛПЕ у воді γ -квантів з енергією 1,3 МеВ дорівнює 0,3 кеВ/мкм, а при енергії 0,25 МеВ вона становить 2 кеВ/мкм. Як джерела γ -квантів в біологічних дослідженнях використовують ^{60}Co , ^{125}I , ^{129}I , ^{131}Cs та інші.

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

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

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

Характеристичне випромінювання – це фотонне випромінювання з дискретним спектром, яке виникає при зміні енергетичного стану електронів атомів під впливом швидких електронів та β -частинок. Поглинання енергії швидкого електрона електронними оболонками, наприклад атома вольфраму чи молібдену, з яких виготовлений анод рентгенівської трубки, призводить до вибивання одного з електронів його внутрішніх шарів за межі атома. При цьому відбувається іонізація атома. На місце електрона, вибитого з внутрішнього шару, негайно переходить електрон з більш віддалених від ядра шарів. Цей

перехід супроводжується випромінюванням цілого ряду фотонів з різними значеннями енергії, характерними для кожного конкретного атому. Енергія цих фотонів може знаходитись у видимому спектрі, ультрафіолетовому та інфрачервоному спектрах в залежності від енергії частинок та порядкового номеру елемента. Тому даний вид випромінювання називається характеристичним.

Взаємодія γ -випромінювання з речовиною. γ -кванти при проходженні через речовину втрачають енергію за рахунок трьох ефектів: фотоелектричного поглинання (фотоэффект), комптонівського розсіювання (комптон-ефект) і утворення електрон-позитронних пар. Відносна величина кожного з цих ефектів залежить від атомного номера поглинаючого матеріалу та енергії фотона. Ефект фотоелектричного поглинання відбувається при низьких енергіях γ -квантів, як правило до 10000 eV.

При фотоэффекті γ -квант, вибиваючи електрон (частіше з K-шару), передає йому всю свою енергію і зникає, а електрон отримує енергію його енергію за мінусом енергії зв'язку електрона у атомі. При більш високих енергіях γ -квантів (100-200 keV) спостерігається комптон-ефект, який ще має назву «комптонівське розсіювання». При цьому γ -кванти, вибиваючи електрони, передають їм лише якусь частину своєї енергії, після чого міняють напрямок руху, тобто розсіюються. Цей процес триває до того часу, доки γ -квант повністю не передасть свою енергію вибитому електрону і закінчується фотоэффектом. γ -кванти з енергією від 1,022 MeV до 20 MeV в речовині під дією сильного електричного поля біля ядра перетворюються в пару «електрон-позитрон». В даному випадку електромагнітне випромінювання перетворюється в корпускулярні частинки. Після чого пара «електрон-позитрон» зникає (анігілює), перетворюючись в два вторинних γ -кванти з енергією, рівною енергетичному еквіваленту маси спокою часток 0,511 MeV. γ -випромінювання з енергією більше 20 MeV можуть взаємодіяти з ядрами атомів (ядерний ефект), але вірогідність цього дуже мала. Взаємодія корпускулярних частинок з речовиною. Заряджені частинки, проходячи через речовину, поступово витрачають свою енергію на іонізацію, тобто відрив електрона від атома (іонізаційні витрати) та на збудження атомів і молекул (радіаційні втрати), які потім проявляються у вигляді гальмівного випромінювання. Заряджені частинки різних видів але з однаковою енергією утворюють практично однакову кількість пар іонів (однакова повна іонізація).

Альфа-(α)-випромінювання – це потік позитивно заряджених α -частинок або ядер атомів гелію. α -частинки складаються з двох протонів і двох нейтронів, мають подвійний позитивний заряд, атомну масу 4,003 а.о.м. ($6,664 \cdot 10^{-27}$ г), швидкість їх руху у вакуумі становить $9-25 \cdot 10^3$ км/с. Їх енергія коливається в діапазоні від 2 до 11 МеВ. Енергетичний спектр α -частинок монохроматичний або близький до нього і є характерним для кожного α -випромінюючого елемента. α -частинки випускають нестійкі ядра важких трансуранових елементів, які мають в періодичній системі Д.І. Менделєєва порядкові номери вище 82. Ядро при цьому втрачає два протони та два нейтрони і перетворюється в ядро іншого елемента, розміщеного на дві клітини ліворуч від материнського (α -розпад). Надлишкова енергія дочірнього ядра виділяється з γ -випромінюванням. Пробіг α -частинки в речовині прямопропорційний її енергії та оберненопропорційний густині речовини.

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

Бета-(β)-випромінювання – це потік негативно заряджених електронів ядерного походження, які отримали назву β -частинки. β -частинки випускаються ядрами радіоактивних елементів при надлишку у їх ядрах нейтронів (електронний розпад). При цьому нейтрон перетворюється у протон з виділенням β -частинки і антинейтрино. При електронному розпаді утворюються дочірні продукти, що знаходяться в метастабільному стані і мають надлишок енергії, яка виділяється у вигляді γ -квантів. Розрізняють чисті β -випромінюючі радіоактивні елементи та змішані, при розпаді яких виділяються β -частинки та в 20-80% γ -кванти. Маса β -частинки дорівнює масі електрона (0,00548 а.о.м. або $9,11 \cdot 10^{-28}$ г). Енергія β -частинок різних природних та штучних радіоактивних ізотопів має величезний діапазон: від 0,0015-0,05 МеВ (м'яке β -випромінювання) до 3, рідше 12 МеВ (жорстке β -випромінювання).

При електронному розпаді з ядра разом з β -частинкою виділяється антинейтрино і енергія зв'язку ядра розподіляється між ними довільно. Тому величина енергії β -частинок одного й того ж елемента неоднакова, їх енергетичний спектр суцільний, або безперервний. Середня енергія β -частинок в спектрі дорівнює приблизно $1/3$ їх максимальної енергії і позначається (\bar{E}_β). При взаємодії з середовищем β -частинка витрачає свою енергію на іонізацію та збудження зустрічних атомів (іонізаційні витрати енергії) та утворення гальмівного випромінювання (радіаційні витрати енергії), котрі збільшуються із збільшенням атомної маси опромінюваної речовини. Їх шлях в речовині звивистий, так як вони легко змінюють напрямок руху під впливом електричних полів зустрічних атомів.

Пробіг β -частинок досягає в повітрі 25 м, в біологічній тканині – 0,85 см. Вони утворюють 50-100 пар іонів на 1 см шляху в повітрі. ЛПЕ β -частинок у воді з середньою енергією 0,4 МеВ дорівнює 0,25 кеВ/мкм, наприкінці пробігу вона збільшується до 0,70 кеВ/мкм. Довжина пробігу β -частинок (R_β) збільшується із збільшенням енергії. β -частинки середніх енергій майже повністю поглинаються шаром алюмінію та оргсклом товщиною 5 мм. В зв'язку з розсіяним типом іонізації повного захисту при роботі з джерелами β -випромінювання не існує. При зовнішньому впливі великої кількості β -частинок можуть виникати β -опіки шкіри та листя рослин, пошкодження кришталика ока. Особливо небезпечними стають вони при надходженні всередину організму.

Нейтрон (n) – електрично нейтральна частинка ядра атома всіх елементів, за винятком водню, з масою спокою 1,00898 а.о.м. Нейтрони стійкі тільки у складі стабільних атомних ядер. Вільний нейтрон – нестабільна частинка, яка розпадається на протон, β -частинку та антинейтрино; середній час життя нейтрона становить 12,5 хв. В речовині вільні нейтрони існують дуже короткий час (в щільних речовинах – одиниці-сотні мікросекунд) внаслідок їх сильного поглинання ядрами. Вільні нейтрони виникають в природі або утворюються в лабораторних умовах тільки в результаті ядерних реакцій.

Взаємодіючи з ядрами, нейтрони можуть:

а) розсіюватись на ядрах інших елементів (пружне та непружне розсіювання);

б) викликати реакції поділу важких ядер;
в) поглинатися ядрами (радіаційне захоплення або реакція активації), що призводить до утворення радіоактивних ізотопів.

Розрізняють такі енергетичні групи нейтронів:

- а) надшвидкі нейтрони з енергією понад 20 МеВ;
- б) швидкі – з енергією від 200 кеВ до 20 МеВ; в) проміжні – з енергією, що не перевищує 200 кеВ;
- г) надтеплові – 0,1-0,03 еВ; д) теплові – з енергією близько 0,025 еВ.

Передача енергії нейтронів опромінюваній речовині відбувається безпосередньо через утворені ними вторинні частинки, в основному це ядра віддачі, протони, β -частинки. Таким чином, кінцевий біологічний ефект взаємодії нейтронів з речовиною, пов'язаний з іонізацією, котру викликають ці частинки.

Тип взаємодії нейтронів з атомними ядрами залежить від хімічного складу опромінюваної речовини (від співвідношення у ній атомів різних елементів), а також від енергії нейтронів.

Протон (р) – елементарна частинка будь-якого атомного ядра, яка визначає фізичні та хімічні властивості елементів. Маса спокою протона становить 1,00758 а.о.м. ($1,6725 \cdot 10^{-24}$ г), тобто він у 1836 разів важче електрона. Протон має позитивний заряд, який дорівнює заряду електрона. Разом з нейтронами протони утворюють ядра атомів всіх хімічних елементів. Вільні протони складають основну частину первинної компоненти космічних променів. В ядрах атомів за певних умов протон може перетворюватись у нейтрон і навпаки (позитронний розпад ядер і К-захоплення). При взаємодії нейтронів з речовиною малої питомої маси виникають протони віддачі, які виходять з ядра і викликають іонізацію та збудження атомів. ЛПЕ протонів віддачі у воді близька до ЛПЕ α -частинок і становить 143 кеВ/мкм. Вони взаємодіють з речовиною подібно α -частинкам.

2. Реєстрація іонізуючих випромінювань

Детектори іонізуючих випромінювань. Високоенергетичні частинки і кванти взаємодіють з електронами атомів і молекул, збуджують та іонізують їх, а також викликають певні додаткові ефекти. Іони та електрони, що виникають при цьому, можуть рекомбінувати, тобто перетворюватися знову у нейтральні атоми і

молекули за рахунок захвату іонами електронів. Рекомбінація іонів, як і перехід атому або молекули зі збудженого стану до основного, супроводжується випусканням кванту електромагнітного випромінювання – фотону.

У зв'язку з тим, що енергії збудження, іонізації атомів і молекул мають величини порядку одиниць або десятків електронвольт, при рекомбінації або переході до основного стану (дезбудження) фотони мають таку саму енергію і відносяться до діапазону видимого світла.

Під час взаємодії γ -квантів з атомами виникають один електрон або електрон і позитрон, заряд яких такий малий, що його практично неможливо зареєструвати. Разом з тим вони будуть іонізувати атоми середовища, що призводить до утворення заряду і спалаху, які вже можна зареєструвати. Вимоги, що висуваються до реєструючих приладів, залежать від того, які частинки і у якому діапазоні енергій вони повинні реєструвати.

Приладом можна визначити кількість окремих частинок, а також зареєструвати інтенсивність потоків не виділяючи окремих частинок. Можна лише реєструвати частинки не визначаючи їх типи, вимірювати їх енергії, просторовий розподіл тощо. Іншими словами, прилади, що реєструють іонізуючі випромінювання, істотно відрізняються не лише конструкцією, але і принципом дії в залежності від призначення. Разом з тим існують певні загальні характеристики усіх приладів, які не залежать від принципу їх дії і за якими можна визначити можливість використання приладу для вирішення конкретного завдання.

До таких характеристик відносяться:

- функція відповіді, що визначає зв'язок між властивостями частинки та характеристиками сигналу;

- чутливість детектору;

- ефективність приладу – відношення кількості зареєстрованих частинок до кількості частинок у чутливому об'ємі приладу;

- енергетична роздільність приладу – мінімальні значення енергії різних частинок, за яких можливо розпізнати відмінності їх енергій;

- часова роздільність приладу – мінімальний інтервал часу за який можна відрізнити попадання двох частинок;

- вибіркова здатність – здатність приладу визначати частинки лише одного типу.

Універсальним є детектор, який ідентифікує частинки, тобто визначає їх частинки, і визначає їх енергію. Такий детектор може одночасно реєструвати частинки різних типів. Загалом детектор вибирають залежно від завдання дослідження тому, що високі параметри за однією його характеристикою часто пов'язані зі зміною інших.

Газонаповнені іонізаційні детектори. Іонізаційна камера. В газонаповнених іонізаційних детекторах робочим тілом є газ. Заряджена частинка, потрапляючи до нього іонізує і збуджує атоми і молекули, внаслідок чого вздовж треку частинки з'являються іони і електрони. Якщо в газі немає електричного поля, то електрони і іони будуть частково рекомбінувати. Якщо в газі утворити електричне поле, то під його впливом заряди почнуть впорядковано рухатися. Це можна використати для реєстрації частинок. Іонізаційна камера по суті є конденсатором в якому внаслідок утворення впорядкованого руху зарядів виникає індукований струм, пропорційний напруженості електричного поля. Заряди електронів і іонів в електричному полі рухаються в різні боки і вносять різний внесок у загальний індукований заряд, який дорівнює сумі зарядів, індукованих електронами і іонами, і може бути зареєстрований.

Іонізаційні камери бувають плоскими, циліндричними і сферичними. Відмінність між ними лише в розміщенні аноду і катода, які в циліндричній, наприклад, іонізаційній камері розташовані коаксильно – анодом є центральний електрод, а катодом – зовнішній циліндр, який одночасно є і корпусом камери. За допомогою іонізаційних камер можна ідентифікувати всі види іонізуючих випромінювань – від γ -квантів до нейтронів. Для цього в залежності від завдання внутрішній простір камери заповнюють відповідними газами, які дають можливість точно ідентифікувати вид випромінювання та його потужність. Пропорційні лічильники. Характеризуються тим, що в їх об'ємі за рахунок вторинної іонізації газу первинними електронами утворюються додаткові заряди. Електрони і іони, що виникли, під впливом електричного поля починають рухатись до електродів камери. Під час руху вони зіштовхуються з атомами газу внаслідок чого виникає вторинна іонізація і за умови високої напруженості електричного поля виникає явище, що має назву коефіцієнт газового посилення.

Основною характеристикою таких лічильників є те, що внаслідок кожного пробігу первинних електронів в об'ємі газу кількість

вторинних електронів пропорційно збільшується на кожен пробіг вдвічі, тобто має лавиноподібний характер, характерний для газового розряду, який виникає лише за умови наявності первинної іонізації.

Газорозрядні лічильники. При збільшенні прикладеної до циліндричного лічильника напруги коефіцієнт газового посилення буде постійно зростати і в решті решт стане настільки високим, що в ньому виникне газовий розряд. Напругу за якої виникає газовий розряд називають напругою підпалу, а газовий розряд – коронним. В його умовах коефіцієнт електричному полі рухаються в різні боки і вносять різний внесок у загальний індукований заряд, який дорівнює сумі зарядів, індукованих електронами і іонами, і може бути зареєстрований. Іонізаційні камери бувають плоскими, циліндричними і сферичними. Відмінність між ними лише в розміщенні аноду і катоду, які в циліндричній, наприклад, іонізаційній камері розташовані коаксильно – анодом є центральний електрод, а катодом – зовнішній циліндр, який одночасно є і корпусом камери.

За допомогою іонізаційних камер можна ідентифікувати всі види іонізуючих випромінювань – від γ -квантів до нейтронів. Для цього в залежності від завдання внутрішній простір камери заповнюють відповідними газами, які дають можливість точно ідентифікувати вид випромінювання та його потужність.

Пропорційні лічильники. Характеризуються тим, що в їх об'ємі за рахунок вторинної іонізації газу первинними електронами утворюються додаткові заряди. Електрони і іони, що виникли, під впливом електричного поля починають рухатись до електродів камери. Під час руху вони зіштовхуються з атомами газу внаслідок чого виникає вторинна іонізація і за умови високої напруженості електричного поля виникає явище, що має назву коефіцієнт газового посилення. Основною характеристикою таких лічильників є те, що внаслідок кожного пробігу первинних електронів в об'ємі газу кількість вторинних електронів пропорційно збільшується на кожен пробіг вдвічі, тобто має лавиноподібний характер, характерний для газового розряду, який виникає лише за умови наявності первинної іонізації.

Газорозрядні лічильники. При збільшенні прикладеної до циліндричного лічильника напруги коефіцієнт газового посилення буде постійно зростати і в решті решт стане настільки високим, що в ньому виникне газовий розряд. Напругу за якої виникає газовий

розряд називають напругою підпалу, а газовий розряд – коронним. В його умовах коефіцієнт газового посилення настільки високий, що не залежить від щільності первинної іонізації – одиничний електрон може викликати коронний розряд такий самий, як і α -частинка.

Режим коронного розряду використовується для підрахунку частинок (але не для визначення їх енергії), для чого після кожного імпульсу розряд необхідно переривати (гасити). Найчастіше в якості газу в лічильниках такого типу використовують пари органічних молекул спирту (90% аргону, 10% спирту) або галогенів (0,1% Cl_2 , Br_2 , I_2). Такі лічильники мають здатність до самогасіння коронного розряду внаслідок пригнічення ролі вторинних електронів на катоді. Такі лічильники можна використовувати для реєстрації заряджених частинок, γ -квантів і нейтронів. Недоліком їх (як і інших газонаповнених детекторів) є низька ефективність реєстрації γ -квантів і нейтронів, а також неможливість їх використання для вимірювання величини енергії частинок, що мають значну довжину пробігу.

Сцинтиляційні детектори Спостереження сцинтиляцій є одним з перших методів реєстрації іонізуючих випромінювань. Ще у 1911 р. його використовував Е. Резерфорд для реєстрації розсіяних α -частинок. Метод полягає в тому, що при попаданні швидкої частинки в деяких речовинах виникає світловий мікроспалах – сцинтиляція. Е. Резерфорд у своїх дослідженнях використовував сірчистий цинк ZnS , а сцинтиляції реєстрував візуально. Метод був дуже трудомістким і його припинили використовувати лише з'явилися інші детектори.

До використання сцинтиляторів повернулися після появи фотоелектронних помножувачів (ФЕП), однак в цьому випадку реєстрували не сцинтиляцію, а викликаний нею струм у ФЕП. Сучасний сцинтиляційний детектор складається з сцинтилятора, який може бути твердим, рідким або газоподібним, ФЕП та джерела високої напруги. Працює він наступним чином. Попадання до сцинтилятора частинки викликає світловий мікроспалах – сцинтиляцію. Фотони світлового спалаху потрапляють на фотокатод, що знаходиться з внутрішнього боку верхньої частини ФЕП, і за рахунок фотоефекту викликають виникнення всередині ФЕП фотоелектронів.

Між фотокатодом і електродами ФЕП, які називають діодами, прикладене електричне поле, що прискорює фотоелектрони і спрямовує їх на перший діод. Діоди вкриті спеціальною

речовиною з великим коефіцієнтом вторинної електронної емісії (фізичне явище, що полягає у випромінюванні вторинних частинок під впливом потрапляння на поверхню тіла пучка прискорених частинок). Якщо коефіцієнт вторинної електронної емісії більше одиниці, то кількість вторинних частинок буде більшою за кількість первинних. Коефіцієнт вторинної електронної емісії діодів за певних умов збільшують внаслідок чого кількість вторинних електронів випущених першим диодом буде перевищувати кількість фотоелектронів. Кількість вторинних електронів, випущених другим диодом, буде перевищувати кількість вторинних електронів, випущених першим диодом і т.д.

Як підсумок кількість електронів, що досягають анода буде багатократно збільшена в порівнянні з кількістю фотоелектронів. Основними вимогами, що висуваються до сцинтиляторів, є забезпечення генерування якомога більшої кількості фотонів, що потрапляють на фотокатод, мінімальна тривалість спалаху і максимальна ефективність реєстрації частинок. Кількість генерованих сцинтилятором фотонів залежить від того, яка доля кінетичної енергії поглиненої частинки трансформується у світлову енергію. Чим більша ця доля, тим вище якість сцинтилятора. Відношення енергії світлового спалаху до поглиненої енергії частинки має назву світловихід, який зазвичай дорівнює декільком відсоткам, але в деяких випадках може сягати 35%.

Для багатьох сцинтиляторів світловихід не залежить від енергії частинок. В той самий час, величина світловиходу залежить від щільності іонізації – тобто може бути різною для різних частинок. Важливою характеристикою сцинтиляторів є час висвічування спалаху. Він визначається як середній час протягом якого інтенсивність спалаху зменшиться у n разів. Механізм генерування частинкою фотонів в сцинтиляторі ще детально не вивчений і є підстави вважати, що він різний у неорганічних і органічних кристалах. Неорганічні кристали мають кращу енергетичну роздільність і більше ефективність реєстрації γ -квантів завдяки вищій щільності і більшому ефективному заряду. Перевагою органічних сцинтиляторів є менший час висвічування.

Напівпровідникові детектори. Сцинтиляційні детектори з високою ефективністю дозволяють реєструвати нейтрони і γ -кванти, проте характеризуються низькою енергетичною роздільністю, що змусило до пошуку більш досконалих детекторів. Такими

детекторами виявилися напівпровідникові. Основними напівпровідниковими матеріалами, що використовуються для виготовлення напівпровідникових детекторів є германій і кремній. Це чотиривалентні елементи, які характеризуються наявністю відомої n - p - n провідності – п'ятивалентні елементи є для них донорами (n -провідність), а тривалентні – акцепторами (p -провідність).

Внаслідок таких особливостей напівпровідників частинка, що потрапляє до детектора, генерує приблизно у 10 разів більшу кількість носіїв заряду ніж у газах. Це забезпечує значно більшу енергетичну роздільність ніж газонаповнені іонізаційні камери або пропорційні лічильники. Для важких частинок досягнуто роздільність 1,5 кеВ при енергії частинки $E = 1,0$ МеВ та 0,45 кеВ при $E = 100$ кеВ; для рентгенівського випромінювання з енергією 6^{-10} кеВ роздільна здатність складає 0,1 кеВ. Недоліком напівпровідникових детекторів є їх невелика радіаційна стійкість. Частинка, що потрапляє до детектора, генерує не лише носії зарядів, а й створює порушення кристалічної структури (радіаційні дефекти). Працюють детектори за низької температури – 77°K , що також створює певні незручності у використанні.

Методи виявлення іонізуючих випромінювань. Основними методами виявлення іонізуючих випромінювань є:

- 1) іонізаційний;
- 2) сцинтиляційний;
- 3) люмінесцентний;
- 4) фотографічний;
- 5) хімічний;
- 6) калориметричний;
- 7) біологічний.

Суть іонізаційного методу полягає в тому, що під дією іонізуючих випромінювання відбувається іонізація опромінюваних об'єктів – повітря, води, твердих речовин, біологічних тканин тощо з утворенням позитивно і негативно заряджених іонів. Іони в лічильнику, що знаходиться під напругою, отримують направлений рух, утворюючи іонізаційний струм. Вимірюючи силу струму, можна отримати уяву про кількість (дозу) випромінень, а вимірюючи імпульси струму, можна визначити інтенсивність випромінювання. Детекторами для виявлення і вимірювання іонізації зазвичай служать іонізаційні камери, пропорційні лічильники, лічильники Гейгера-

Мюллера і напівпровідникові лічильники. Можливості використання цього типу детекторів визначаються їх робочими характеристиками та метою досліджень.

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

Сцинтиляційний метод оснований на реєстрації фотонів видимого світла, що виникають при збудженні атомів деяких речовин – сцинтиляторів під дією випромінювання. Для виготовлення даного типу детекторів найчастіше використовуються кристали хімічно чистого NaI, активованого талієм (Тl). Процес виявлення іонізуючого випромінювання відбувається в такій послідовності: γ -квант вибиває з кристала фотон, який потрапляє на фотокатод фотоелектричного помножувач (ФЕП) і, в свою чергу, вибиває з нього фотоелектрон. Фотоелектрон потрапляє на пластину - діод ФЕП і вибиває з неї до 10 електронів. Цей процес повторюється стільки разів, скільки пластин (діодів) має ФЕП. Так, при шести діодах ФЕП на виході отримують близько 1 млн. електронів (наприклад, ФЕП приладу СРП-68-01 має 14 діодів).

Люмінесцентні методи виявлення іонізуючого випромінювання оснований на ефектах радіофотолюмінесценції і термолюмінесценції. При радіофотолюмінесценції під дією іонізуючих випромінень в юмінофорах – фосфатних скельцях (NaI, ZnS, активованих сріблом) утворюються центри фотолюмінісценції. Під час дії на них ультрафіолетових променів виникає видима люмінесценція, інтенсивність якої спочатку пропорційна дозі 10^{-2} Гр, при дозі $3,5 \cdot 10^2$ Гр досягає максимуму і при подальшому збільшенні дози – падає. Під дією ультрафіолетових променів центри люмінесценції руйнуються, що дає можливість проводити вимірювання дози багаторазово. При радіотермолюмінесценції поглинута енергія випромінювання перетворюється в люмінесценцію лише під дією температури, а її інтенсивність пропорційна дозі випромінювання. Тому дозиметри даного типу можуть слугувати накопичувачами дози. Для запобігання втрати дози необхідно підібрати фосфатні скельця, які висвітлять її при температурі близько 400°C .

Фотографічний метод оснований на вимірюванні ступеня потемніння фотоемульсії під впливом іонізуючих випромінень. Якщо опромінити фотоплівку в світлонепроникній касеті, то після її проявлення можна виявити помітне почорніння. Його ступінь в деякому діапазоні доз пропорційна експозиційній дозі. Опромінені плівки типу РМ-5-1, РМ-5-3 і РМ-5-4 дозволяють реєструвати γ -випромінювання в діапазоні експозиційних доз 0,02-2,0 Р, 0,3-12 Р, 0,01-50,0 Р відповідно. Перевагами фотографічного методу є можливість його масового використання для індивідуального контролю, документальна реєстрація триманої дози та неприйнятність до ударів і різких змін температури. Недоліки даного методу – низька чутливість до малих доз, неможливість спостереження за ходом накопичення дози безпосередньо в процесі опромінення, залежність результатів вимірювань від умов проявлення плівки. Складність використання даного методу полягає в тому, що для визначення отриманої дози необхідно мати еталон, виготовлений з такого ж матеріалу як в дозиметрі, опроміненого відомою дозою і проявленого в аналогічних умовах. Це значить, що потрібне джерело іонізуючого випромінювання, яке може створювати контрольовану дозу. За цим принципом працюють дозиметри ИФК-2,4, ИФКУ тощо.

Хімічний метод оснований на тому, що під дією іонізуючих випромінень деякі речовини можуть перетворюватись на інші. Наприклад, при опроміненні хлороформу утворюється соляна кислота. Якщо взяти хлороформ, додати до нього індикатор соляної кислоти, то при наявності іонізуючих випромінень його забарвлення починає змінюватись. Тому на корпус такого дозиметра можна наклеїти візуальну шкалу зміни забарвлення в залежності від дози опромінення. Це дає нам можливість спостерігати за ходом її накопичення в процесі опромінення.

Визначення точного значення дози проводиться на приладах типу фотоелектрокалориметрів (ФЕК), відградуєваних в одиницях дози іонізуючого випромінювання, що її спричинили.

В теперішній час зазвичай користуються так званими “сухими” феросульфатними дозиметрами, для яких використовують насичений повітрям розчин FeSO_4 в розбавленій H_2SO_4 в діапазоні вимірювання дози 20-400 Гр. Для більш високих доз (10^3 - 10^5 Гр) використовують церієвий дозиметр (0,1 М розчин $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$ в 0,4 М H_2SO_4). Але продовжують використовувати й хімічні дозиметри на основі хлороформу і чотирьоххлористого вуглецю, не зважаючи на те, що

при оцінці відносно малих доз вони дають більшу похибку.

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

Калориметричний метод оснований на тому, що під дією іонізуючих випромінень в опромінюваних об'єктах підвищується температура. Цей метод використовується для вимірювання надзвичайно високих потужностей дози. Без нього було б неможливо слідкувати за ситуацією, що відбувається в ядерному реакторі. Таким чином, кожний з перерахованих методів займає певне незамінне місце у виявленні іонізуючих випромінень.

Біологічний метод дещо відрізняється від вищезгаданих, так як в його основі лежать біологічні зміни в клітинах, тканинах, органах живих організмів, що зумовлені дією іонізуючих випромінювань. Найбільш розповсюдженим є метод визначення кількості клітин з абераціями хромосом у лімфоцитах периферичної крові людини. Аберації хромосом – це їх поломки, які можуть у невеликих кількостях (до 1-1,5%) виникати при звичайних поділах клітин, і які можуть виникати при дії деяких фізичних і хімічних чинників у кількостях, що у багато разів перевищують норму. Одним з таких чинників є іонізуюча радіація. І кількість аберацій, що виникають при її дії, чітко прямо пропорційна дозі опромінення.

Для визначення кількості клітин з абераціями хромосом у людини, яка була піддана дії іонізуючої радіації, звичайним методом відбирають кров з пальця чи іншого органу. На препараті під мікроскопом чітко видні лімфоцити – великі клітини, що діляться, а в мітозі і окремі хромосоми. У певній фазі мітозу (звичайно метафазі чи анафазі), коли всі хромосоми відокремлені одна від одної, підраховують, кількість ушкоджених хромосом, визначаючи відсоток клітин з абераціями.

Зрештою, на заздалегідь приготовлених в лабораторних умовах калібровочних кривих визначають, якій кількості абераційних клітин відповідає певна доза опромінення. У зв'язку з тим, що калібровочна крива будується на основі усереднених даних, а кожна людина має індивідуальну радіочутливість, метод може давати певну похибку в оцінці дози. Проте у більшості випадків ця похибка не перевищує 20-30%. І вона буде тим менше, чим меншим буде час між опроміненням і аналізом крові. Визначення кількості аберацій

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

За допомогою цього методу можна визначати і дозу опромінення тварин і навіть рослин. В останніх хромосомному аналізу піддаються клітини меристем – твірних тканин, клітини котрих діляться. До біологічного методу дозиметрії належить і метод визначення кількості вільних радикалів в зубній емалі ссавців, в тому числі і людини, та інших хребетних, хітинових покривах комах, черепашках моллюсків.

Цей метод отримав назву «ретроспективного», так як він дозволяє визначити дозу, яка була отримала індивідумом протягом періоду індивідуального розвитку - життя. І якщо в житті був інцидент, пов'язаний з одержанням великої дози, як, наприклад, при випробуваннях атомної зброї, аваріях на підприємствах ядерної енергетики, метод дозволяє виявити цей випадок. Саме за допомогою його у теперішній час оцінюють чи «переоцінюють», уточнюють дози, одержані військовими під час випробувань атомних бомб, ліквідаторами ядерних аварій і просто жителів забруднених радіонуклідами територій.

3. Захист від іонізуючого випромінювання

Розміщення підприємств і лабораторій, призначених для роботи з діоактивними джерелами, у житлових будинках і дитячих закладах забороняється. Для будівництва закладів для роботи з радіоактивними джерелами необхідно вибирати території з підвітряної сторони по відношенню до населених пунктів і житлових масивів. Навкруги таких закладів повинна бути санітарно-захистна зона і зона моніторингу. Для підприємств атомної промисловості та ядерної енергетики санітарно-захистні зони встановлюються спеціальними нормативними актами. У цих зонах забороняється розміщення дитячих закладів, лікарень, санаторій та інших оздоровчих закладів.

Використання земель санітарно-захистних зон для сільськогосподарської діяльності можливе тільки з дозволу Головного санітарно-епідеміологічного управління Міністерства охорони здоров'я України. У залежності від виду радіаційного опромінення використовують різні способи захисту. Першочерговий

засіб індивідуального захисту від радіації – це скорочення часу перебування в умовах опромінення, а потім необхідно перебувати якомога на більшій відстані від джерела радіації. У комплексі захисних заходів треба враховувати і вид випромінювання (α -, β -частинки, γ -кванти).

Захист від зовнішнього випромінювання α -частинками не потрібен, оскільки пробіг їх у повітрі становить $2,4 \cdot 10^{-11}$ см, а у воді і тканинах живого організму лише 100 мк. Спецодяг повністю захищає від них. При зовнішньому опроміненні β -частинки впливають на шкіряний покрив та роговицю очей і у великих дозах викликають сухість й опіки шкіри, ламкість нігтів, катаракту.

Для захисту від потоків β -частинок використовують гумові рукавиці, окуляри і екрани, що виготовлені з матеріалів з малою атомною питомою масою (органічне скло, пластмаси, алюміній). У разі особливо потужних потоків β -частинок слід використовувати додаткові екрани, призначені для захисту від гальмівного рентгенівського випромінювання: фартухи і рукавиці із просвинцьованої гуми, просвинцьоване скло, ширми, бокси тощо.

Захист від зовнішнього γ -випромінювання може забезпечуватись скороченням часу безпосередньої роботи з джерелами випромінювання, застосуванням захисних екранів, що поглинають випромінювання, збільшенням відстані від джерела та використанням для роботи джерел з мінімально можливим виходом іонізуючого випромінювання. Захист шляхом скорочення часу безпосередньої роботи з джерелами фотонного випромінювання досягається швидкістю маніпуляцій з препаратом, скороченням тривалості робочого дня і робочого тижня.

При захисті від γ -опромінення використовують екрани з металів з великою атомною масою, наприклад, свинець, чугун тощо. За своїм призначенням захисні екрани можуть бути умовно поділені на 5 груп:

1) захисні екрани - контейнери, в яких розміщуються радіоактивні препарати. Головне призначення таких екранів – зберігання радіоактивних препаратів у неробочому стані;

2) захисні екрани для обладнання. В цьому разі екрани повністю оточують усе робоче обладнання при положенні радіоактивного препарату в робочому стані або при включенні високої (або прискорюючої) напруги на джерела ІВ;

3) захисні екрани, що монтуються як частини будівельних

конструкцій (стіни, перекриття підлоги та стелі, спеціальні двері). Такий вид захисних екранів призначений для захисту приміщень, в яких постійно знаходиться персонал, та прилягаючі території;

4) пересувні захисні екрани. Цей тип захисних екранів використовується для захисту робочого місця на різних ділянках робочої зони тощо;

5) екрани індивідуальних засобів захисту (щиток із оргскла, скло пневмокостюмів, просвинцьовані рукавиці та ін.).

Товщину екранів визначають за шарами половинного послаблення. Шар половинного послаблення – це товщина будь-якої речовини, яка вдвічі знижує дозу проникаючої радіації. Товщину захисного екрану розраховують за кратністю послаблення дози. Підрахувавши дозу без захисту і визначивши кратність перевищення дози, проводять розрахунок послаблення дози до гранично допустимого рівня, використовуючи для цього показник шару половинного послаблення. При розрахунках товщини шару половинного послаблення слід урахувати, що він залежить від енергії випромінювання. Так, при енергії γ -квантів, яка дорівнює 0,2 МеВ; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5 і 20 МеВ шар половинного послаблення для свинцю буде - відповідно 0,2 см; 0,4; 0,7; 1,0; 1,7; 2,0 см. Захист відстанню проводять за допомогою пристрою для дистанційної роботи з радіоактивною речовиною (дистанційні інструменти, подовжувачі, маніпулятори і т.п.). Даний спосіб є досить ефективним, оскільки при збільшенні відстані від джерел іонізуючого випромінювання у 2 рази доза зменшується в 4 рази і т.д. Використовуючи закон зворотних квадратів, можна визначити відстань, що безпечна для роботи з радіоактивною речовиною за наступною формулою:

$$R = DR / D,$$

де D – відома доза, виміряна на відстані R , D - ГДД за добу ($7 \cdot 10^{-3}$ Р), R – шукана безпечна відстань, см.

Основні принципи попередження внутрішнього опромінення організму, що виникає при роботі з відкритими джерелами, базуються на використанні засобів захисту, які використовуються при роботі зі закритими джерелами випромінювання, а також здійснюється герметизація виробничого обладнання для запобігання забруднення приміщень лабораторії та навколишнього середовища.

Застосовуються санітарно-технічні пристрої і спеціальне обладнання, використовуються спеціальні захисні матеріали, засоби індивідуального захисту. Виконуються правила особистої гігієни, проводиться дезактивація приміщень, апаратури та засобів індивідуального захисту. Всі способи захисту можна застосовувати окремо або в різних комбінаціях, але так, щоб дози зовнішнього фотонного опромінення осіб категорії А не перевищували 7 мР/день і 0,04 Р/тиждень. За певних умов радіаційної небезпеки здійснюють наступне:

- перебувають у житлових приміщеннях або спеціальних сховищах;

- захищають приміщення від проникнення радіації (закривають вікна, відключають приточне вентиляцію, перекривають крани водопостачання;

- роблять запаси питної води в спеціальних закритих ємностях;

- здійснюють щоденне вологе вбирання приміщень з використанням мильних розчинів;

- проводять йодну профілактику (йодистий калій застосовують після їжі з чаєм три рази протягом дня дорослим по 3-5 крапель на склянку, дітям віком до двох років по 1-2 краплі 5% настою на склянку молока).

При радіаційному ураженні потрібно використовувати консервовані або заздалегідь заготовлені продукти, не споживати воду з відкритих джерел, уникати тривалих пересувань по забрудненій території.

ЛЕКЦІЯ 5

ТЕМА: РАДІОБІОЛОГІЧНІ ЕФЕКТИ І ПІСЛЯРАДІАЦІЙНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ОРГАНІЗМУ

1. Класифікація радіобіологічних ефектів
2. Близькі та віддалені, детерміновані та стохастичні радіобіологічні ефекти
3. Післярадіаційне відновлення

1. Класифікація радіобіологічних ефектів

Радіобіологічний ефект – це реакція живого організму на дію іонізуючого випромінювання, що характеризується зміною деяких його ознак та властивостей.

Звичайно виділяють два основних класи радіобіологічних ефектів – соматичні та генетичні ефекти. До соматичних радіобіологічних ефектів належать зміни, які відбуваються в організмі протягом онтогенезу – періоду його індивідуального розвитку; до генетичних – пошкодження, що реалізуються в наступних поколіннях, тобто передаються нащадкам.

Серед соматичних ефектів розрізняють п'ять основних типів: радіаційна стимуляція, морфологічні зміни, променева хвороба, прискорення старіння і скорочення тривалості життя та загибель. Генетичні, або мутагенні, ефекти утворюють самостійний клас.

Радіаційна стимуляція – це прискорення росту і розвитку організму при дії на нього іонізуючого випромінювання в дозах, в десятки, а іноді й сотні разів нижчих за ті, що викликають гальмування цих процесів.

Описаний вперше французькими дослідниками М. Мальдінеєм і К. Тувіненом в 1898 р., тобто лише через три роки після відкриття рентгенівських променів, ефект прискорення проростання опроміненого рентгенівськими променями насіння привернув увагу багатьох дослідників, які працювали з іонізуючими випромінюваннями. І в наступні роки з'явилась велика кількість робіт, присвячених радіаційній стимуляції рослин. Більшість їх проводилась на чисто емпіричній основі без знання і розуміння чисельних факторів, суттєвих для проявлення стимулюючої дії випромінювання, що, звичайно, часто приводило до суперечливих результатів.

Експериментальний матеріал, одержаний в останні десятиліття з використанням нових методичних підходів, детальним обліком величини дози, типу випромінювання, індивідуальної радіочутливості об'єкту та ряду інших супутніх факторів беззаперечно довів існування ефекту радіаційної стимуляції. І в умовах звичайної радіобіологічної лабораторії можна підібрати для будь-якого виду насіння, проростків, пилку дозу рентгенівського або γ -випромінювання, при якій вдається спостерігати ефект радіаційної стимуляції в тій чи іншій формі, наприклад, прискорення росту рослин.

Ці дози варіюють в досить широких межах як для насіння, так і для проростків, що залежить не тільки від виду культури, а і від сорту і навіть партії насіння. При цьому для проростків і вегетуючих рослин вони, як правило, в декілька разів, а іноді і на порядок нижче, ніж для насіння.

Ефект радіаційної стимуляції спостерігається не тільки при одноразовому опроміненні насінин або рослин, а й при хронічному, коли рослина опромінюється протягом всього вегетаційного періоду. Так, видатний американський радіобіолог А.Х. Сперроу із Брукгейвенської національної лабораторії у США, ім'я якого ще не раз буде згадуватися на сторінках підручника, спостерігав в умовах гамма-поля стимуляцію росту рослин ротиків (лева паща) при потужності дози 2,3-2,85 Гр/доб.

Потужність досить висока. Не дивно, що при трохи більшій – 3,3-4 Гр/доб – відмічалось пригнічення росту.

Група російських дослідників під керівництвом Л.П. Бреславець при опроміненні рослин кукурудзи і гречки протягом всього вегетаційного періоду спостерігали стимулюючий ефект при значно меншій потужності випромінювання – лише 0,00019-0,025 Гр/доб. Якщо вважати, що, як згадувалось у розділі 3, потужність природного радіаційного фону в середньому складає величину порядку 10 мкР/год, тобто 0,000024 Гр/доб, то збільшення його в 100 разів може привести до стимуляції росту рослин.

Є підстави вважати, що незвичайно високий урожай озимих зернових культур в Україні, особливо у північній частині, в 1986 р. був наслідком радіаційної стимуляції за рахунок підвищеного радіаційного фону, викликаного аварією на Чорнобильській АЕС. Такої думки дотримуються і деякі радіобіологи інших країн, зокрема Білорусі, Угорщини, Болгарії, де також того року був відмічений різкий стрибок врожайності деяких сільськогосподарських культур, який важко пояснити іншими причинами.

Радіаційна стимуляція тварин. Про стимулюючу дію іонізуючих випромінювань на тваринний організм можна судити за тими ж критеріями, що і при опроміненні рослин, тобто прискоренню чи посиленню під впливом опромінення таких функцій як ріст, розвиток, продуктивність.

Найбільш цікавими слід вважати досить чисельні дослідження з опромінення у стимулюючих дозах курячих яєць, курчат і курей. Показано, що опромінення яєць до інкубації в дозах від 0,01 до 0,05

Гр веде до помітного збільшення виводжування курчат, зменшення відходу курчат в подальшому, прискорення на 10-12 днів початку періоду яйцenessності, збільшення яйцenessності в цілому. Опромінення курчат в дозах до 0,25 Гр приводить до збільшення їх виживання, прискорення процесів росту, статевого дозрівання, початку яйцекладки. Опромінення дорослих курей в дозі 0,05 Гр за даними деяких дослідників веде до збільшення яйцenessності на 18%.

Достовірних даних про радіаційну стимуляцію ссавців небагато. Показано, що хронічне опромінення щурів при потужності дози 0,002 Гр/год веде до підвищення їх плодючості: кількість народжених щуренят більш ніж в два рази перевищувала таку в контрольній групі. Спостерігали також прискорення росту, збільшення абсолютної маси тіла і стимуляцію функції відтворення у мишей, які протягом всього життя одержували їжу, що містила деяку кількість радіонуклідів.

Більш визначені результати по стимуляції плодючості під впливом опромінення у малих дозах були отримані в експериментах зі спермою риби, ікрою та личинками. На великому матеріалі показана стимуляція розвитку ембріонів прісноводних риб, культивованих в умовах γ -опромінення: личинки накльовувались на 9-11 днів раніше, ніж в контролі.

Даних про радіаційну стимуляцію людини як цілісного організму немає. Але є дані про прискорення швидкості поділу і росту клітин людини, зокрема широко відомого штаму HeLa в умовах культури при опроміненні в дозах 0,05–1 Гр. Це дає певні підстави вважати, що малі дози іонізуючої радіації і у людини можуть викликати стимуляцію роботи деяких систем.

Радіаційна стимуляція мікроорганізмів. Є дані про те, що хронічне γ -опромінення кишкової палички, аспергілюса, азотобактера при потужності дози 0,03-0,6 Гр/год стимулює їх ріст і діяльність. При гострому опроміненні стимуляція проявляється при дозах порядку декількох десятків і сотень грей.

Завершуючи розділ про радіаційну стимуляцію, варто відзначити, що не дивлячись на досить великий експериментальний матеріал, який однозначно доводить існування цього явища, далеко не всі радіобіологи вважають його достатньо очевидним. Деякі, враховуючи незадовільну відтворюваність результатів стимулюючого ефекту, відсутність достатньо аргументованих пояснень його механізмів, ставлять під сумнів його існування, розцінюючи це явище як артефакт. Інші вважають, що при опроміненні в малих дозах не

відбувається прямого стимулювання, а ефекти, які спостерігаються, є результатом певних пошкоджень і подальшої ініціації процесів, які мають компенсаторний характер.

Буквально з дня відкриття протягом вже більш як століття інтерес до радіаційної стимуляції систематично переживає підйоми і спади. В останні роки знову відмічається черговий спалах інтересу до проблеми. Разом із введенням нового терміну "радіаційний гормезис" знову з'явилась велика кількість робіт про вплив малих доз іонізуючої радіації на прискорення росту, розвитку, збільшення маси різних органів у рослин, на активацію окремих сторін метаболізму, активність різних систем у тварин та інші. На жаль, глибоких робіт, щоб пояснювали причини гормезису, так і немає.

2. Близькі та віддалені, детерміновані та стохастичні радіобіологічні ефекти

В залежності від часу прояву після опромінення радіобіологічні ефекти поділяють на близькі та віддалені. До близьких відносять ті, які виявляються у перші часи (години, доби, тижні, місяці) після опромінення; віддалені наслідки реєструють в більш пізні періоди.

Виразити більш точно ці часи можливо тільки по відношенню до конкретного організму, так як час повинен розглядатися по відношенню до тривалості онтогенезу, котрий у одних організмів вимірюється днями, а у других – багатьма десятками років. Якщо ж їх оцінювати по відношенню до однорічних рослин, то близькі – це такі, що проявляються у перші години, дні, 1-2 тижні після одноразового опромінення, а віддалені – як правило, у другій половині, наприкінці онтогенезу, в наступних поколіннях, тобто через місяці, роки. Для тварин, тривалість онтогенезу у більшості видів яких вимірюється декількома роками, десятиліттями ці строки дещо більші.

До близьких радіобіологічних ефектів відносять радіаційну стимуляцію, яка виявляється одразу ж після опромінення; більшість морфологічних змін в тканинах і окремих органах, що виникають протягом перших днів-тижнів післярадіаційного періоду; гостру променеву хворобу, що розвивається у рослин протягом перших тижнів, а у ссавців – 1-1,5 місяців; загибель після опромінення у дуже високих дозах.

Віддаленим радіобіологічним ефектом вважається прискорення старіння і скорочення тривалості життя, що реалізуються у явній формі в останні періоди онтогенезу. До віддалених наслідків

ураження ссавців відносяться такі види морфологічних змін, як злоякісні новоутворення – поява лейкозів, ракових пухлин. Типовим віддаленим ефектом морфологічної природи є променеві катаракти. До них відносять нефросклероз – хворобу, що виникає в результаті переродження тканин та судин нирок внаслідок їх радіаційного ураження радіоактивними речовинами при їх виведенні з організму. Ці ефекти проявляються, як правило, через роки після опромінення.

Генетична дія іонізуючої радіації відноситься до найвіддаленіших ефектів опромінення. Більш того, батьки можуть не нести ніяких ознак соматичних радіаційних уражень, але у їх нащадків в наступних поколіннях можуть з'являтися найрізноманітніші відхилення від норми. Досліди на рослинах, комах, лабораторних тваринах та інших організмах показали, що якщо в першому поколінні реалізується до половини всіх мутацій, то решта може проявитися протягом наступних 15-20 поколінь.

У зв'язку з цим для оцінки генетичної небезпеки опромінення дуже важливо знати, чи є виникаючі мутації домінантними, тобто зумовленими участю тільки одного алеля у визначенні нової ознаки, чи рецесивними – двома різними алелями одного гену. Той чи інший характер успадкування визначає специфіку розподілу пошкоджень в ряду наступних після опромінення поколінь. Якщо мутація домінантна, вона виявиться в найближчих поколіннях. У випадку рецесивності генетичне пошкодження віддаляється на багато поколінь і буде проявлятися поступово або не проявиться ніколи.

Крім того, більша частина генетичних ефектів проявляється тільки в тому випадку, коли змінений ген з'єднується з геном, який несе аналогічне порушення. В залежності від частоти певної мутації, котра, як і загальна їх кількість, залежить від дози опромінення, ця випадкова комбінація двох однаково мutowаних генів може статися тільки через декілька поколінь або взагалі не відбутися.

Віддалені радіобіологічні ефекти носять випадковий характер. Це означає, що їх неможливо визначити для певного опроміненого організму наперед, на відміну від більшості близьких ефектів. В усією впевненістю можна, наприклад, стверджувати, що коли 1000 рослин гороху опромінити в 0,5 Гр, то в усіх, або майже в усіх, виявиться радіаційна стимуляція; при дозі 8 Гр у всіх рослин виникнуть різні морфологічні зміни, а при дозах більше 15 Гр всі рослини загинуть. Можна бути впевненим, що коли овець, або навіть одну вівцю, опромінити в дозі 2 Гр, у всіх них обов'язково виникне

променева хвороба першого або другого, а може і третього (в залежності від індивідуальної чутливості до іонізуючого випромінювання) ступеню. Але завбачити появу віддалених наслідків опромінення у якогось конкретного індивідууму неможливо.

Тому, що такі ефекти опромінення, як генетичні, деякі соматичні – скорочення тривалості життя, виникнення ракових пухлин та інші мають стохастичний – імовірнісний, випадковий характер і називаються стохастичними ефектами на відміну від детермінованих, або нестохастичних, ефектів. Вони виявляються на основі статистичного аналізу змін в опроміненій популяції і оцінюються як відсоток уражених осіб в опроміненій популяції організмів, або кількість уражених осіб на тисячу, на мільйон. Цілком зрозуміло, що імовірність прояву віддалених стохастичних ефектів радіаційного ураження зростає зі збільшенням дози опромінення.

3. Післярадіаційне відновлення

Післярадіаційне відновлення організму – це відновлення після радіаційного ураження функцій клітин його критичних органів, що забезпечує нормалізацію їх функціональної діяльності і одужання його як цілісної системи. Таке визначення поняття "відновлення" з усією повнотою відбиває суть процесів, що приводять до нормалізації функцій багатоклітинного організму, пошкодженого іонізуючими випромінюваннями.

Проте цілком очевидно, що явище післярадіаційного відновлення являє собою багаторівневий процес, і те, що сприймається як відновлення організму, як одужання від променевої хвороби, звичайно відображає функціонування чисельних складних систем відновлення, які діють на різних рівнях організації.

Загальне відновлення досягається за рахунок чотирьох способів післярадіаційного відновлення: репараційного, репопуляційного, регенераційного і компенсаторного.

Репараційне, або поклітинне, відновлення, досягається за рахунок відновлення макромолекул клітини, в першу чергу ДНК, та окремих структур клітини – хромосом, мембран та інших. Репопуляційне відновлення забезпечується розмноженням клітин, які в момент опромінення перебували в радіостійкому стані і зберегли здатність до поділу. Регенераційне відновлення є результатом проліферації тканин і органів, що знаходяться в стані спокою. На відміну від інших

організмів цей тип відновлення відіграє дуже важливу роль у вищих рослин. І, нарешті, компенсаторне відновлення, яке досягається за рахунок того, що функції пошкоджених клітин (тканин, органів), несучи підвищене навантаження, виконують неушкоджені клітини (тканини, органи), та за рахунок дедиференціації спеціалізованих клітин і тканин у проліферуючі.

В опроміненій клітині розрізняють два типи пошкодження – потенційно летальне та сублетальне. Потенційно летальними пошкодженнями називають такі, які можуть привести до загибелі клітини, але в певних умовах можуть бути відновлені. Під сублетальними розуміють такі типи пошкоджень, які самі по собі ще не приводять до загибелі клітини, але при наступному опроміненні здатні її викликати.

Відповідно розрізняють два типи репарації – від потенційно летальних і від сублетальних пошкоджень. Можливість репарації від сублетальних пошкоджень звичайно доводиться дослідами по фракціонованому опроміненню, в основі яких лежить гіпотеза про те, що якби радіаційне ураження носило повністю незворотний характер, то ефект, викликаний фракціонованим опроміненням при певній сумарній дозі, був би таким же, як і при одноразовому опроміненні у тій же дозі. Але це не так. Величезна кількість даних, одержаних в дослідженнях з найрізноманітнішими організмами свідчить про те, що при фракціонуванні дози ступінь радіаційного ураження зменшується. При цьому ураження тим слабше, чим більший проміжок часу розділяє фракції і чим більша кількість фракцій, на які розділена доза.

Молекулярне відновлення. Основним пошкодженням клітини при дії іонізуючих випромінювань, як уже не раз відзначалось, є пошкодження молекул ДНК. Головним структурним пошкодженням ДНК – одно- і двониткові розриви її полінуклеотидних ланцюгів. Репарація цих типів пошкоджень, яким приписується головна роль в загибелі клітини, вперше була показана в дослідах з бактеріями, які дають змогу одержувати штами, дефектні за окремими ферментами, що контролюють певні етапи репарації.

Згідно неї, на першому етапі після утворення розриву відбувається виявлення місця пошкодження за допомогою спеціальних контролюючих систем. Потім ділянка полінуклеотидної нитки з пошкодженими нуклеотидами з обох боків надрізається за допомогою ферментів ендонуклеаз, вищеплюється з молекули -

інцизія і видаляється – *ексцизія*. Останній етап здійснюється за допомогою ферментів екзонуклеаз. Розмір утвореного розриву буває різним – від декількох одиниць до декількох тисяч нуклеотидів. Вслід за цим на місці бреші відбувається комплементарний синтез ДНК з використанням залишку непошкодженої нитки ДНК в ролі матриці – так звана репаративна реплікація. Цей етап контролюється ферментами ДНК-полімеразами, які беруть участь і у звичайному реплікативному синтезі ДНК. І, нарешті, відбувається зшивання кінців синтезованої ділянки з полінуклеотидною ниткою.

Тип репарації, що йде за наведеною схемою, одержав назву *ексцизійної репарації*. Але описані й інші типи репараційного синтезу ДНК. Більшість з них хоч і має певні особливості, в цілому нагадують дану схему, суть якої визначається принципом «*вищепління-заміщення*».

Для репарації двониткових, або подвійних, розривів ДНК необхідно, щоб клітина мала активну систему рекомбінації і непошкоджені ділянки ДНК, гомологічні тим ділянкам, які мають подвійні розриви.

Існують дані і про молекулярне відновлення РНК, деяких білків, зокрема, ядерного білку хроматину, окремих основ ДНК. Але і в їх основі лежать механізми, аналогічні репарації ДНК. Тому репарація ДНК вважається основним механізмом молекулярного відновлення.

Джерелом **репопуляційного відновлення** є клітини, які зберегли репродуктивну здатність після опромінення. З одного боку, це клітини, що в момент дії радіації перебували в радіостійких періодах клітинного циклу, а з іншого боку – клітини, що знаходилися в стані спокою – «поза циклом».

Резервом репопуляції є клітини в стані спокою – такі, що перебувають поза циклом поділу. У таких клітин є дві принципові можливості по відношенню до своєї подальшої долі: з припиненням дії чинника, який примусив їх вийти в стан спокою або після відновлення пошкодження, якщо зупинка була його наслідком, знову повернутися на шлях поділу, або перейти до диференціації. Яким саме з цих шляхів піде клітина, багато в чому визначається міжклітинними взаємодіями, які складаються в популяції.

Клітини в стані спокою мають більш високу радіостійкість, ніж ті, що діляться. І при дії випромінювань в дозах, що ведуть до втрати репродуктивної здатності у всіх або в певній кількості клітин, що

діляться, до процесів репопуляції підключаються клітини, які перебувають поза циклом поділу, але які готові завжди приступити до поділу. Безперечно, критична ситуація, що виникає в тканині, її спустошення. Саме тому перехід клітин в стан спокою варто розглядати як спосіб створення резервів тканини, які є фондом її репопуляційного відновлення.

Можливість репопуляційного відновлення і його темпи залежать від розміру пулу клітин, що зберегли здатність до поділу. Із збільшенням дози опромінення його об'єм зменшується і імовірність відновлення цим шляхом знижується. Теоретично репопуляційне відновлення можливе при наявності в популяції навіть однієї клітини, яка зберегла здатність до поділу. І дійсно, в дослідах з ссавцями було показано, що ті крипти кишкового епітелію, в яких виживає хоча б одна клітина, можуть повністю відновлюватися.

Якщо перші два шляхи післярадіаційного відновлення - репарація і репопуляція властиві всім багатоклітинним організмам, як рослинам, так і тваринам, то регенераційне відновлення - переважно лише рослинам. Еволюція прирекла більшість видів вищих рослин на прикріпленій до постійного місця спосіб життя. І якщо тварини можуть укритися від несприятливих умов, які періодично виникають у навколишньому середовищі, то рослини такої можливості не мають. Саме тому поряд з такою надійною формою захисту виду, як існування надзвичайно стійкої фази їх онтогенезу – насіння, еволюція нагородила рослини потужною системою **регенерації** – здатності до відновлення втрачених органів і навіть всієї рослини за рахунок спеціальних тканин і органів, клітини яких, аналогічно клітинам насіння, знаходяться у стані спокою і мають високу стійкість до всіх уражуючих чинників.

Компенсаторне відновлення – цей тип післярадіаційного відновлення є найменш вивченим в радіобіології, хоча компенсаторне посилення окремих функцій у опромінених іонізуючими випромінюваннями організмів доводиться спостерігати нерідко. Серед них можна виділити два основних типи компенсаторних реакцій. Перший з них зв'язаний з виконанням непошкодженими внаслідок опромінення клітинами, тканинами, органами не властивих їм функцій. Другий – з посиленням функцій, коли непошкоджені клітини, тканини, органи посилюють власне навантаження з метою надолуження функції інших, які їх втратили.

ЛЕКЦІЯ 6

ТЕМА: РАДІАЦІЙНА БЕЗПЕКА І ЗАХИСТ

1. Основні принципи радіаційної безпеки
2. Чинні норми радіаційної безпеки України
3. Радіаційно небезпечні об'єкти
4. Поводження з радіоактивними відходами

1. Основні принципи радіаційної безпеки

Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку».

Радіаційна безпека – дотримання допустимих меж радіаційного впливу на персонал, населення та навколишнє природне середовище, встановлених нормами, правилами та стандартами з безпеки.

Радіаційна безпека персоналу, населення і оточуючого середовища вважається забезпеченою, якщо дотримуються основні принципи радіаційної безпеки (виправданості, оптимізації, неперевершення) і вимоги радіаційного захисту, встановлені діючими нормами радіаційної безпеки та санітарними правилами.

Принцип виправданості передбачає заборону всіх видів діяльності з використанням джерел радіактивного випромінювання, за яких отримана для людини та суспільства користь не перевищує ризику можливої шкоди, яка може бути заподіяною випромінюванням. Цей принцип повинен застосовуватись на стадії прийняття рішення уповноваженими органами при проектуванні нових джерел випромінювання та об'єктів підвищеної радіаційної безпеки, видачі ліцензій та затвердженні нормативно-технічної документації на використання джерел випромінювання, а також при зміні умов їх експлуатації. В умовах радіаційної аварії принцип виправданості стосується не джерел випромінювання та умов опромінення, а захисних заходів, при цьому в якості величини користі слід оцінювати попереджену даними заходами дозу. Заходи ж, що направлені на відновлення контролю над джерелами випромінювання, мають проводитись в обов'язковому порядку.

Принцип оптимізації передбачає підтримання на максимально низькому рівні як індивідуальних (нижче лімітів, встановлених діючими нормами), так і колективних доз опромінення, з врахуванням соціальних та економічних факторів. В умовах радіаційної аварії, коли замість лімітів доз діють більш високі рівні втручання, принцип оптимізації має застосовуватись до захисних заходів з врахуванням попередженої дози опромінення і збитків, пов'язаних з втручанням.

Принцип неперевершення вимагає запобігання перевищення встановлених діючими нормами радіаційної безпеки індивідуальних лімітів доз та інших нормативів радіаційної безпеки. Даного принципу повинні дотримуватись всіма організаціями та особами, від яких залежить рівень опромінення людей.

Шляхи забезпечення радіаційної безпеки Радіаційна безпека населення забезпечується:

- створенням умов життєдіяльності людей, які відповідають вимогам діючих норм і правил радіаційної безпеки;

- встановленням квот на опромінення від різних джерел випромінювання;
- організацією радіологічного контролю; ефективністю планування та проведення заходів з радіаційного захисту в нормальних умовах та у випадку радіаційної аварії;
- організацією системи інформації про радіаційний стан. Радіаційна безпека на об'єкті та навколо нього забезпечується за рахунок: якості проекту радіаційного об'єкта;
- обґрунтованого вибору району і майданчика для розміщення радіаційного об'єкта;
- фізичного захисту джерел випромінювання; зонування території навколо найбільш небезпечних об'єктів і всередині них;
- умов експлуатації технологічних систем;
- санітарно-епідеміологічної оцінки і ліцензування діяльності з джерелами випромінювання;
- санітарно-епідеміологічної оцінки виробів і технологій;
- наявності системи радіаційного контролю; планування і проведення заходів щодо забезпечення радіаційної безпеки персоналу і населення при нормальній роботі об'єкта, його реконструкції та виведенні з експлуатації;
- підвищення радіаційно-гігієнічної грамотності персоналу та населення.

Радіаційна безпека персоналу забезпечується:

- обмеженнями допуску до роботи з джерелами випромінювання по віком, підлозі, станом здоров'я, рівня попереднього опромінення та іншими показниками;
- знанням і дотриманням правил роботи з джерелами випромінювання;
- достатністю захисних бар'єрів, екранів і відстані від джерел випромінювання, а також обмеженням часу роботи з джерелами випромінювання;
- створенням умов праці, що відповідають вимогам чинних норм і правил РБ;
- застосуванням індивідуальних засобів захисту; дотриманням встановлених контрольних рівнів;
- організацією радіаційного контролю; організацією системи інформації про радіаційну обстановку;

- проведенням ефективних заходів щодо захисту персоналу при плануванні підвищеного опромінення у разі загрози та виникненні аварії.

Радіаційна безпека населення забезпечується:

- створенням умов життєдіяльності людей, що відповідають вимогам чинних норм і правил РБ;
- встановленням квот на опромінення від різних джерел випромінювання;
- організацією радіаційного контролю;
- ефективністю планування і проведення заходів з радіаційного захисту в нормальних умовах і у випадку радіаційної аварії;
- організацією системи інформації про радіаційну обстановку.

2. Чинні норми радіаційної безпеки України

Постанова Головного державного санітарного лікаря України від 1 грудня 1997 року N 62 «Про введення в дію Державних гігієнічних нормативів "Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)» Допустимі рівні вмісту радіонуклідів стронцію і цезію у продуктах харчування (ДР-97)».

Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) охоплюють систему принципів, критеріїв, нормативів та правил, виконання яких є обов'язковим в політиці держави щодо забезпечення протирадіаційного захисту людини та радіаційної безпеки.

НРБУ-97 є основним державним документом, що встановлює систему радіаційно-гігієнічних регламентів для забезпечення прийнятих рівнів опромінення як для окремої людини, так і для суспільства взагалі і є обов'язковими для виконання всіма юридичними та фізичними особами, які проводять практичну діяльність з джерелами іонізуючого випромінювання.

Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) включають систему принципів, критеріїв, нормативів та правил, виконання яких є обов'язковою нормою політиці держави щодо забезпечення протирадіаційного захисту людини та радіаційної безпеки. НРБУ-97 розроблені у відповідності до основних положень Конституції та Законів України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», "Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку", "Про поводження з радіоактивними відходами».

Міра дії іонізуючого випромінювання в будь-якому середовищі залежить від енергії випромінювання й оцінюється дозою іонізуючого випромінювання. Останнє визначається для повітря, речовини і біологічної тканини. Відповідно розрізняють: експозиційну, поглинену та еквівалентну дози іонізуючого випромінювання.

Експозиційна доза характеризує іонізуючу спроможність випромінювання в повітрі, вимірюється в кулонах на 1 кг (Кл/кг); позасистемна одиниця — рентген (Р); $1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \times 10^3 \text{ Р}$. За експозиційною дозою можна визначити потенційні можливості іонізуючого випромінювання.

Поглинута доза характеризує енергію іонізуючого випромінювання, що поглинається одиницею маси опроміненої речовини. Вона вимірюється в греях Гр ($1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$). Застосовується і позасистемна одиниця рад ($1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр} = 0,01 \text{ Дж/кг}$).

Доза, яку одержує людина, залежить від виду випромінювання, енергії, щільності потоку і тривалості впливу. Проте поглинута доза іонізуючого випромінювання не враховує того, що вплив на біологічний об'єкт однієї і тієї ж дози різних видів випромінювань неоднаковий. Щоб врахувати цей ефект, введено поняття еквівалентної дози.

Еквівалентна доза є мірою біологічного впливу випромінювання на конкретну людину, тобто індивідуальним критерієм небезпеки, зумовленим іонізуючим випромінюванням. За одиницю вимірювання еквівалентної дози прийнятий зіверт (Зв). Зіверт дорівнює поглинутій дозі в 1 Дж/кг (для рентгенівського та α , Р-випромінювань). Позасистемною одиницею служить бер (біологічний еквівалент рада). $1 \text{ бер} = 0,01 \text{ Зв}$.

Основні дозові межі опромінення. Для кожної категорії, що опромінюється встановлюються дозові межі і припустимі рівні, що відповідають основним дозовим межам. Додаткові обмеження існують для жінок репродуктивного віку.

Дозу зовнішнього опромінення і попадання радіонуклідів в організм під час атомних аварій передбачити неможливо. Опромінення персоналу під час аварій вище дозових меж може бути лише тоді, коли немає можливості вжити заходів її, що виключають їх перевищення, і може бути виправдане лише врятуванням людей,

необхідністю запобігти дальшому розвитку аварій та опроміненню більше кількості людей.

Обмеження опромінення населення (категорія В) зумовлюється регламентацією та контролем радіоактивності довкілля. Цей порядок регламентується основними санітарними правилами (ОСП-72/87). Опромінення категорії і В не повинно бути вищим, ніж опромінення категорії Б.

При підрахунку наслідків аварії надзвичайно важливо визначити величину колективної дози опромінення, яку збрала в себе популяція - всі ті, на кого безпосередньо чи посередньо вплинуло опромінення. У випадку Чорнобильської катастрофи така доза сягає мільйонів людинобер.

Поняття ризику. Щоб викликати гостре пошкодження організму, дози опромінення повинні перевищувати певний рівень. Якщо одноразово отримана доза опромінення людини досягає 400 бер, то в 50% випадків це призводить (без медичної допомоги) до летального результату.

3. Радіаційно небезпечні об'єкти

Об'єкти, на яких використовуються, виготовляються, переробляються, зберігаються або транспортуються небезпечні радіоактивні, хімічні й біологічні речовини, пожежовибухові, гідротехнічні й транспортні споруди, транспортні засоби, а також інші об'єкти, що створюють загрозу виникнення НС є потенційно небезпечними об'єктами.

Особливу небезпеку для людей і навколишнього середовища становлять радіаційно небезпечні об'єкти (РНО).

До РНО належать: атомні електростанції (АЕС), підприємства з виготовлення і переробки ядерного палива, підприємства поховання радіоактивних відходів, науково-дослідні організації, які працюють з ядерними реакторами; ядерні енергетичні установки на об'єктах транспорту та ін.

В Україні діють 5 атомних електростанцій з 16 енергетичними ядерними реакторами, 2 дослідних ядерних реактори та більше 8 тис. підприємств і організацій, які використовують у виробництві, науково-дослідній роботі та медичній практиці різноманітні радіоактивні речовини, а також зберігають і переробляють радіоактивні відходи.

З усіх можливих аварій на РНО найбільш небезпечними є радіаційні аварії на атомних електростанціях з викидом радіоактивних речовин у навколишнє середовище.

Радіаційні аварії – це аварії з викидом радіоактивних речовин або іонізуючих випромінювань за межі, непередбачені проектом для нормальної експлуатації радіаційно небезпечних об'єктів, у кількостях понад установлену межу їх безпечної експлуатації.

Ядерні аварії поділяються на дві групи:

- аварії, при яких відсутні радіоактивні забруднення виробничих приміщень, території та навколишнього середовища об'єкта;

- аварії, при яких відбуваються радіоактивні забруднення середовища виробничої діяльності і проживання людей.

За масштабами радіаційні аварії поділяються на промислові та комунальні.

До промислових належать такі аварії, наслідки яких не поширюються за межі приміщень і території об'єкта, а аварійне опромінення може отримати лише персонал.

Комунальними є радіаційні аварії, наслідки при яких не обмежуються приміщеннями і територіями об'єкта, а поширюються на навколишні території.

Такі аварії за масштабами поділяють на локальні, якщо в зоні аварії проживає до 10 тис. осіб, регіональні – із зоною від декількох населених пунктів, адміністративних районів до декількох областей з населенням більше 10 тис. осіб, глобальні – комунальні радіаційні аварії, які поширюються на значну або всю територію країни. До глобальних аварій належать транскордонні, з поширенням наслідків аварії за межі державних кордонів.

У розвитку комунальних радіаційних аварій виділяють три часових фази: ранню, середню – фазу стабілізації, і пізню – фазу відновлення.

Потенційною небезпекою для України є можливі аварії на АЕС інших держав з викидом радіоактивних речовин.

При аваріях на АЕС можуть бути пошкодження конструкцій, технологічних ліній, пожежі, викиди в навколишнє середовище радіоактивних речовин.

Прогноз і оцінювання радіаційної обстановки передбачають два види можливих аварій: гіпотетична аварія і аварія з руйнуванням реактора.

Гіпотетична аварія – це аварія, для якої проектом не передбачаються технічні заходи, що забезпечують безпеку АЕС. Може утворитись небезпечна радіаційна обстановка при викиданні в атмосферу радіоактивних речовин, що може призвести до опромінення населення.

Аварія з повним руйнуванням ядерного реактора може відбутися в результаті стихійного лиха, вибуху боєприпасів, падіння повітряного транспорту на споруди АЕС та ін. Така аварія може бути з розривом трубопроводів із теплоносієм, ушкодженням реактора і герметичних зон, виходом з ладу систем керування і захисту, що може призвести до миттєвої втрати герметичності конструкцій реактора, сплавлення тепловидільних елементів і викиду радіоактивних речовин з парою в навколишнє середовище, можливе розкидання радіоактивних осколків, уламків конструкцій паливних елементів.

З 26 квітня по 6 травня 1986 р. з ядерного палива вийшли всі благородні гази, приблизно 10-20 % летючих радіоізотопів йоду, цезію і телуру і 3-6 % більш стабільних радіонуклідів: барію, стронцію, цезію, плутонію тощо.

На 6 травня 1986 р. викинуто близько $1,9 \cdot 10^{18}$ Бк, або 63 кг радіонуклідів, що відповідає 3,5 % кількості радіонуклідів у реакторі на момент аварії. А при вибуху атомної бомби потужністю 20 кт, скинутої на Хіросіму у 1945 р., утворилося 740 г радіоактивних речовин. Під час аварії і незабаром після неї від радіаційного ураження загинуло 29 осіб, із 30-кілометрової зони евакуйовано 115 тис. осіб. Великі площі сільськогосподарських угідь і лісу забруднені радіоактивними речовинами, що зробило неможливим їх подальше використання для сільсько- і лісгосподарського виробництва.

Це зумовило те, що на переважній території України, країн ближнього і далекого зарубіжжя радіоактивне забруднення ґрунту, води, продуктів харчування, сільськогосподарської і лісгосподарської сировини та кормів у багато разів перевищувало нормативні показники.

Виходячи з цього, розробку заходів захисту населення в районах розміщення АЕС необхідно проводити на основі розрахунків на найважчий варіант розвитку аварії. При такому варіанті в атмосферу може бути викинуто до 100 % благородних газів, йоду, цезію і телуру, 10-30 % стронцію і до 3 % рутенію і лантану. На момент

аварійного зупинення або руйнування реактора загальна активність викиду радіонуклідів може становити до 10 % загальної активності реактора.

На території України розташовано понад 8000 різних установ і організацій, діяльність яких призводить до утворення радіоактивних відходів (РАВ).

Виробниками і місцями концентрації радіоактивних відходів є:

- 1) АЕС (накопичено 70 тис. м⁸ РАВ);
- 2) уранодобувна і переробна промисловість (накопичено 65,5 млн. м³ РАВ);
- 3) медичні, наукові, промислові та інші підприємства і організації. Збирання, транспортування, переробку і тимчасове зберігання радіоактивних відходів та джерел іонізуючого випромінювання (ДІВ) від цих підприємств і організацій незалежно від їх відомчої підпорядкованості здійснює Українське державне об'єднання "Радон" (накопичено 5 тис. м³ РАВ);

4) зона відчуження Чорнобильської АЕС (понад 1,1 млрд. м³ РАВ). Всі підприємства і організації (крім АЕС) незалежно від відомчої належності передають радіоактивні відходи на міжобласні спеціалізовані комбінати (МСК) державного об'єднання «Радон», яке має у своєму складі 6 спецкомбінатів: Київський, Львівський, Донецький, Дніпропетровський, Одеський і Харківський. Львівський, Харківський, Одеський і Дніпропетровський спецком-бінати приймають і ховають низько- і середньоактивні радіоактивні відходи. Донецький спецкомбінат не має вільних сховищ для зберігання та поховання РАВ. Київський комбінат може приймати для тимчасового зберігання відходи низької та середньої активності.

На Київському і Харківському державних міжобласних спеціалізованих комбінатах через недосконалі конструкції старих сховищ для радіоактивних відходів виникло забруднення підземних вод поза межами сховищ радіонуклідами тритію. Причиною поширення радіонуклідів поза межами сховищ РАВ, у тому числі законсервованих, є недосконалість конструкції сховищ. Міграція радіонуклідів зі сховищ відбувається внаслідок порушення гідроізоляції. У сховищах радіоактивних відходів і джерел іонізуючого випромінювання накопичується вода, яка проникає з атмосферними опадами та утворюється внаслідок конденсації.

На території України розташовані 2 дослідні реактори (у Києві та у Севастополі) та одна критична збірка (в Харкові), яку на цей час зупинено. Можливі аварії на цих реакторах з радіоактивним забрудненням є загрозою насамперед містам, у яких вони розташовані. Небезпекою є й те, що реактори знаходяться в зоні польотів повітряного транспорту. На Київському реакторі були аварії у 1968, 1969 і 1970 рр.

Протягом 2004 р. було 11 випадків НС на атомних електростанціях України. Причини - несправність обладнання АЕС, що призвело до відключення енергоблоків від електромереж.

Важливим завданням є поховання джерел іонізуючого (гамма- та нейтронного) випромінювання (ДІВ) тільки у спеціалізованих сховищах шляхом безконтейнерного розвантаження джерел (в Україні ДІВ ховають здебільшого у захисних контейнерах), а також необхідно переховати тверді радіоактивні відходи зі сховищ.

Потребують особливої уваги як потенційно небезпечні об'єкти і підприємства з видобутку і переробки уранових руд, розташованих у Кіровоградській, Миколаївській та Дніпропетровській областях. Видобування уранової руди головним чином проводиться на Жовтоводському, Смолінському та Кіровоградському рудниках. Новокосянтинівське, Давлатівське та Братське родовища (Дніпропетровська та Миколаївська області), передані для промислового виробництва, декілька років не експлуатуються.

Для отримання закису-окису урану проводиться переробка уранових руд на гідрометалургійному заводі ВО СГЗК, що розташований у промзоні міста Жовті Води Дніпропетровської області. Характерним для уранодобування є те, що майже всі його відходи є джерелами радіоактивного забруднення навколишнього середовища.

У сільському господарстві, в медицині, промисловості й наукових дослідках використовуються ДІВ. В Україні є близько 8000 підприємств та організацій (тільки в Києві близько 400), які використовують понад 100 тис. джерел іонізуючого випромінювання.

Експертами Міжнародного Агентства з атомної енергії та Агентства з ядерної енергетики Організації економічного співробітництва та розвитку створена міжнародна школа ядерних подій, яка використовується для оперативного та узгодженого

оповіщення про значення з погляду безпеки подій на ядерних установках.

4. Поводження з радіоактивними відходами

Основними джерелами утворення радіоактивних відходів (РАВ) є діючі АЕС. Радіоактивні речовини утворюються під час роботи АЕС на потужності при поділі ядер U_{235} , U_{233} , Pu_{239} в активній зоні реактора, а також в результаті активації нейтронами різних матеріалів, що знаходяться в активній зоні, тобто як продукти ядерних реакцій тощо. У середньому, залежно від потужності та типу реакторної установки, за рік утворюється від 0,15 до 0,35 м³ рідких радіоактивних і від 0,1 до 0,3 м³ – твердих РАВ на 1 МВт.

У процесі експлуатації енергоблоків АЕС утворюються три основних види РАВ: газоаерозольні, рідкі та тверді, і головною умовою безпеки є їх знешкодження. Враховуючи негативний вплив РАВ на людей і навколишнє природне середовище, необхідно здійснювати збирання і надійну ізоляцію відходів з урахуванням особливостей радіонуклідів, а також відмінностей їх фізико-хімічних і біологічних властивостей.

Поводження з газоподібними РАВ зводиться, фактично, до їх розсіювання в довкіллі (викиди) після процедури очищення. Досвід експлуатації АЕС показав, що вжиті при проектуванні АЕС заходи щодо обмеження потужності викидів, а також дотримання проектного режиму експлуатації обладнання для очищення викидів забезпечили виконання нормативних вимог. За весь час роботи АЕС України в нормальному режимі не було випадків перевищення потужності радіоактивних викидів понад обмеження, встановлені чинними нормативними документами. Існуючі на українських АЕС системи очищення в умовах нормальної експлуатації забезпечують рівні викидів нижчі за міжнародні й національні норми.

Контроль за рівнями викидів радіоактивних речовин в атмосферне повітря контролюється автоматизованими системами радіаційного контролю, встановленими на всіх джерелах викидів, та лабораторними дослідженнями після проведення пробовідбору.

Поводження з рідкими РАВ. Утворення рідких РАВ (РРВ) на АЕС пов'язане з особливостями технологічного процесу та не передбаченими цим процесом протіканнями рідких радіоактивних

середовищ, система поводження з РРВ складається, загалом, з джерел їх утворення та установок зберігання й переробки.

На АЕС утворюються такі види РРВ:

- кубовий залишок як наслідок переробки трапних вод і вод спецпралень на випарних установках спецводоочищення;
- відпрацьовані сорбенти, що надходять з фільтрів установок спецводоочищення у разі вичерпання ресурсу іонообмінного матеріалу, а також інші відпрацьовані фільтрувальні матеріали;
- шлами та пульпи;
- відпрацьовані мастила та змішані рідини.

Перед переробкою РРВ збирають у баки для тимчасового зберігання та витримування. Система зберігання РРВ на АЕС складається з вузлів збору та тимчасового їх зберігання.

Кубовий залишок, фільтрувальні матеріали разом із шламами та мастильні матеріали зберігаються окремо. Відпрацьовані фільтрувальні матеріали, сорбенти системою гідротранспорту подаються в резервуари, де зберігаються під шаром води.

Схема переробки первинних РРВ на АЕС з реакторами типу ВВЕР містить випарні апарати спецводоочищення та вузол реагентів. Після упарювання первинних рідких радіоактивних середовищ на установках спецводоочищення одержують кубовий залишок, до складу якого входять нерозчинні й розчинні солі натрію, а також заліза, магнію, кальцію тощо.

У процесі переробки радіоактивні та інші хімічні речовини виділяють з відходів, а очищену воду повертають у технологічний процес.

Для переробки РРВ на АЕС використовують термічний, сорбційний і мембранні методи.

Термічний метод – дистиляція або упарювання – найбільш розповсюджений і зручний спосіб переробки РРВ. Здійснюється цей спосіб у спеціальних випарних апаратах з підведенням тепла від водяної пари. Розчин РРВ з випарного апарата насосами подається в доупарювач, де відбувається його глибоке упарювання. Пара доупарювача конденсується й повертається в резервуар коагульованої води, а кубовий залишок перекачується в баки зберігання відходів. Очищена вода через фільтр-пастку направляється в баки чистого конденсату, з яких після контролю на радіоактивність і солевміст пускається в оборотне водокористування.

Сорбційний метод передбачає видалення радіонуклідів з рідких відходів у вигляді твердої фази в результаті адсорбції, іонного обміну, адгезії тощо. Проте через селективність до окремих радіонуклідів метод сорбції не можна розглядати як основний метод очищення від радіонуклідів.

Сорбцію проводять у спеціальних апаратах при динамічних або статичних умовах на насипаних або намивних фільтрах зі спеціальними іонообмінними смолами.

Мембранні методи – це методи, за допомогою яких видалення радіоактивних речовин з відходів здійснюється на молекулярному рівні. Серед них найбільш ефективними є зворотний осмос, електродіаліз і ультрафільтрація.

Через різноманітність радіоактивних і нерадіоактивних забруднювачів, у тому числі через присутність аміаку, масел, жоден зі згаданих методів очищення окремо не забезпечує очищення РРВ до необхідного ступеня. Тому на АЕС система очищення РРВ – складний ланцюг операцій, виконуваних спеціальними апаратами, що реалізують різні методи очищення. Таким чином, технологія очищення включає в себе декілька послідовних операцій. На виході такого ланцюга операцій отримують два продукти: високоактивний концентрат, що надходить на ствердіння й захоронення, і конденсат, що відповідає усім вимогам до якості води для повторного використання на АЕС або для скидання у відкриті водоймища.

Концентрати, отримані внаслідок очищення РРВ, являють собою шлаки після фільтрації й хімічної обробки, відпрацьовані іонообмінні смоли, кубові залишки після упарювання. Ці концентрати звичайно піддають ствердінню методами бітумування, цементування, полімеризації та ін.

Ствердіння концентратів РРВ відбувається включенням їх у зв'язувальні матеріали, які можна поділити на три основні групи: термопластичні (бітум та ін.); термореактивні (смоли поліефірні, карбамідні тощо); неорганічні (цемент, гіпс, скло і т.д.).

Зв'язувальні компоненти повинні мати:

- низьке вимивання, що характеризує високі ізоляційні властивості;

- добру сумісність зі складовими концентрату відходів, що забезпечує мінімальний об'єм кінцевого продукту;

- міцність, що включає руйнування стверділого продукту в аварійних ситуаціях при транспортуванні;
- біостійкість – стверділі продукти не повинні піддаватися впливові бактерій і мікроорганізмів;
- радіаційну стійкість, що визначає, зокрема, газовиділення зі стверділих продуктів.

Сьогодні для ствердіння РАВ досить широко у багатьох країнах застосовується спосіб бітумування, при якому радіоактивні відходи змішують з бітумом. Бітум – продукт перегонки нафти або кам'яного вугілля. Гідростійкість бітуму забезпечує досить надійну гідроізоляцію включених компонентів. Бітуми привертають увагу такими позитивними якостями, як непроникність, пластичність, достатня хімічна інертність, невисока вартість, стійкість до впливу мікроорганізмів.

Останнім часом розробляються технології, в яких бітум заміняють штучними полімерами. Полімеризація проходить, як правило, без нагрівання. Метод полімеризації особливо зручний для фіксації відпрацьованих іонообмінників. Апаратура при цьому може бути використана та сама, що й для бітумування. Полімерні продукти мають за деякими параметрами кращі в порівнянні з бітумом властивості. Полімери мають добру хімічну стійкість. Термореактивні смоли як зв'язувальні матеріали відрізняються простотою здійснення процесу ствердіння й деякими позитивними властивостями стверділого продукту – стійкістю до впливу механічних, термічних і радіаційних навантажень.

Цементування – один із методів ствердіння як гомогенних (кубові залишки), так і гетерогенних (пульпи) відходів. Процес цементування полягає у включенні радіоактивних речовин у портландцемент марки 500 з наступним утворенням твердого моноліту і заснований на взаємодії в'язких речовин цементу (оксиди кальцію, силікати, алюмінати тощо) з водою, що міститься у відходах, без підвищення температури.

Сьогодні одним з найдоцільніших методів ствердіння рідких високоактивних РАВ визнане осклування. Спосіб осклування відходів забезпечує розкладання значної кількості хімічних сполук, що входять до складу відходів; тим самим усувається необхідність враховувати їхній шкідливий вплив при захороненні і значно скорочується об'єм у порівнянні з бітумуванням (у 2-4 рази) і цементуванням (у 10 разів).

Поряд з осклуванням, розробляють й інші методи ствердіння відходів з метою одержання термодинамічно більш стійких, ніж скло, продуктів, здатних зберегти протягом тривалого часу механічну міцність і хімічну стійкість. До таких продуктів належать склокераміка, а також різні види мінералоподібної кераміки.

Поводження з твердими РАВ. Основним джерелом утворення твердих РАВ (ТРВ) у процесі експлуатації АЕС є технічне обслуговування й ремонт енергоблоків.

При проведенні ремонтних робіт на устаткуванні АЕС радіоактивними стають частини або деталі заміненого устаткування й трубопроводів, інструмент, що застосовувався в роботах, електро- і теплоізоляційні матеріали, одяг, протиральне ганчір'я тощо.

Система поводження з твердими РАВ на АЕС містить: збирання відходів у первинну тару на місцях їх утворення; сортування за активністю; транспортування відходів до централізованих місць збору чи переробки; переробку РАВ; пакування первинної тари з твердими РАВ у транспортні контейнери; транспортування контейнерів із твердими РАВ до сховища ТРВ на спецавтомобілях; приймання відходів та їх вивантаження до секцій сховища; ведення обліку та звітності щодо РАВ.

Усі ТРВ на АЕС збирають у спеціальних приміщеннях, сортують і за необхідності переробляють з метою зменшення їх габаритів.

Тверді РАВ після переробки зберігають у сховищах ТРВ, спеціально споруджених на території АЕС. Сховища ТРВ – це заглиблені бетоновані вмістища, гідро ізольовані від підземних і атмосферних вод. Вони перебувають під суворим дозиметричним контролем, для чого навкруги сховищ споруджені спостережні свердловини, з яких періодично відбирають проби води для аналізу на вміст радіоактивних речовин. Зберігання передбачає можливість вилучення РАВ для їх переробки та транспортування.

Першим кроком у послідовності етапів поводження з ТРВ є їх збирання та сортування.

Сучасна політика поводження з РАВ передбачає сортувати їх на етапі збирання за максимально можливою кількістю ознак та критеріїв, з урахуванням вимог подальших етапів поводження з РАВ (тимчасове зберігання, переробка, кондиціонування і захоронення). Такими ознаками найчастіше є:

- радіаційні характеристики РАВ;

- можливість їх спалювання, пресування;
- доцільність проведення дезактивації;
- необхідність фрагментації тощо.

До операцій попередньої обробки належать дезактивація, збирання і сортування РАВ, підпресування, фрагментування, сушіння тощо.

Метою дезактивації є зменшення об'ємів РАВ, переведення їх з більш високої групи в нижчу, а також покращення умов радіаційного захисту персоналу, населення та навколишнього середовища. Під дезактивацією мається на увазі очищення поверхні устаткування від радіоактивного забруднення за допомогою промивання, нагрівання, хімічних та електрохімічних процесів, механічного й інших видів очищення.

Під переробкою ТРВ розуміють будь-яку операцію, що змінює їхні характеристики. Головними цілями переробки є: підвищення безпеки на подальших етапах поводження з ними, зменшення негативного впливу на довкілля, економія коштів на зберігання та захоронення ТРВ.

Критеріями вибору конкретного методу переробки є відповідність продукту переробки умовам подальших етапів поводження з РАВ – кондиціонування, транспортування, тимчасового зберігання, захоронення. На вибір методу переробки РАВ впливають вимоги діючих норм, правил і стандартів у сфері безпечного поводження з РАВ, вимоги до форми, фізико-хімічних і радіаційних характеристик тощо.

Механічна переробка ТРВ. Мета механічної переробки ТРВ – зменшення їх об'єму.

Зменшення розмірів ТРВ покращує пакування РАВ для транспортування, зберігання, захоронення або підготовки РАВ до наступної переробки. Основні методи механічного зменшення розмірів включають демонтаж, розпилювання, розрізування і дроблення.

Демонтаж застосовують при знятті ядерних установок з експлуатації відомими в будівництві методами.

Розпилювання і розрізування зменшують розміри габаритного обладнання, використовуючи циркулярні, поперечні, ланцюгові пилки, абразивні круги, плазмове різання, пневматичні й гідравлічні дробильні механізми тощо.

Дробленням зменшують розміри ТРВ (збільшують їх густину) або готують більш гомогенні суміші низькоактивних ТРВ. Дроблення може використовуватися разом або з пресуванням, або зі спалюванням.

Пресування РАВ є одним з найпродуктивніших методів зменшення об'єму відходів. Преси кваліфікують, як правило, за тиском, котрий вони розвивають. Преси низького тиску (силою 10 МН) призначені для пресування, головним чином, пластикату, паперу, гуми й текстилю.

Суперпресування – це пресування силою тиску, вищою за 10 МН. При суперпресуванні РАВ розміщують, як правило, в бочки, а потім пресують їх. Спресовані «брикети» пакують в інші контейнери – як циліндричні, так і прямокутні.

Термічна переробка РАВ. Процеси термічної обробки включають широкий набір окисних і піролітичних технологій ефективними методами зменшення об'єму спалюваних РАВ.

Спалювання – найбільш відомий процес термообробки. Існує багато різних типів установок спалювання для переробки різних РАВ – від низько активних РАВ АЕС до високоактивних від переробки ядерного палива. Однак переробка вже середньоактивних РАВ може бути складнішою, ніж переробка низькоактивних РАВ, через необхідність використання захисних екранів і дистанційної техніки. Якщо ж у РАВ присутні α -випромінювачі, потрібно розглядати ймовірність критичності.

Кондиціонування. Після переробки РАВ повинні мати стан, що підходить до транспортування, тривалого зберігання або захоронення. Для цього й потрібне кондиціонування. Методи кондиціонування можуть бути або суміщені з методами переробки (наприклад, осклуванням чи плавленням), або є самостійними (цементування і бітумування).

Широкого застосування набув метод цементування – омонолічування в цементні блоки подрібнених ТРВ. Як правило, це дрібні куски металу, фільтри і бочки з відходами після суперпресування.

Методом осклування скло спочатку плавлять у вогнетривкому реакторі допоміжним нагріванням, потім підтримують у розплавленому стані (1100-1260 °С) електронагріванням за допомогою занурених електродів. РАВ вводять з одного боку печі

вище розплавленого скла з повітрям для спалювання. Спалювання відбувається за рахунок випромінювання від розплавленого скла. Вихідний газ виводиться з протилежного боку печі. Твердий продукт після спалювання і негорючі матеріали оскловуються й можуть безперервно видалятися або компонуватись у матрицю що не вилуговується.

Досвід спалювання прийнятний для широкого спектра РАВ. Технологія зменшення їх об'ємів спалюванням широко визнана, ефективна і безпечна.

Мета плавлення РАВ – зменшити об'єм як органічних, так і неорганічних РАВ і надати їм компактної форми, щоб кінцевий продукт мав високі характеристики щодо опору вилуговуванню.

Методи хімічної переробки РАВ поділяють на дві категорії:

- сире окиснення;
- хімічне окиснення.

Сире окиснення здійснюється у вологому середовищі, тому воно не дає великої кількості газів, як у звичайних установках спалювання. Хімічне окиснення може бути реалізоване використанням сильно окисних реагентів, включаючи перманганати, діхромати, гіпохлориди, персульфати, пероксиди і система з азотною або сірчаною кислотами.

ЛЕКЦІЯ 7

ТЕМА: ЗАСОБИ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ, ҐРУНТУ, ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ ВІД РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ

1. Радіоекологічний моніторинг водойм
2. Радіоекологічний моніторинг ґрунту
3. Радіоекологічний моніторинг біоти
4. Радіоекологічний моніторинг сфери агропромислового виробництва

1. Радіоекологічний моніторинг водойм

Екологічний моніторинг, екомоніторинг, моніторинг навколишнього середовища, моніторинг довкілля (англ. environmental monitoring) – це комплексна науково-інформаційна система

регламентованих періодичних безперервних, довгострокових спостережень, оцінки і прогнозу змін стану природного середовища з метою виявлення негативних змін і вироблення рекомендацій з їх усунення або ослаблення.

Об'єктами екологічного моніторингу залежно від рівня, цілей, завдань, методів і масштабів досліджень можуть бути окремі сфери навколишнього середовища (атмосфера – повітря, гідросфера – підземні та поверхневі води, літосфера – ґрунти), їхні окремі компоненти або біосфера в цілому); території (регіони, райони, ландшафти, басейни річок тощо); галузі виробництва і об'єкти людської діяльності (об'єкти промисловості, енергетики, транспорту, сільського господарства, військової діяльності, у тому числі відходи різних сфер діяльності); процеси діяльності (екологічні управління, політика, освіта, нормування, підприємство тощо); несприятливі природні процеси (ерозія, зсуви, карст). Предметом екологічного моніторингу є організація та функціонування системи оцінювання та прогнозування стану екологічних систем, їх елементів, біосфери, характеру впливу на них природних та антропогенних факторів.

Основними завданнями екологічного моніторингу є:

- спостереження за станом біосфери, оцінка і прогноз її стану;
- визначення ступеня антропогенного впливу на навколишнє середовище;
- виявлення факторів і джерел впливу;
- прогнозування можливих змін у стані навколишнього середовища.

Система екологічного моніторингу будується на принципах:

- об'єктивності і достовірності;
- систематичності спостережень за станом навколишнього природного середовища;
- багаторівневості;
- узгодженості нормативного та методичного забезпечення;
- узгодженості технічного та програмного забезпечення; – комплексності в оцінці екологічної інформації;
- оперативності проходження інформації між окремими ланками системи;
- відкритості інформації для населення.

Екологічний моніторинг прийнято класифікувати на фоновий (базовий); глобальний і регіональний; імпактний, екосистемний і компонентний.

Радіоекологічний моніторинг, будучи складовою частиною загальної системи екологічного моніторингу, спрямований на забезпечення першочергової мети безпеки – захисту людей і охорони довкілля від шкідливого впливу іонізуючого випромінювання шляхом вирішення наступних завдань:

- вимірювання інтенсивності іонізуючого випромінювання або активності радіонуклідів в об'єктах довкілля, включаючи викиди та скидання радіонуклідів підприємствами ЯПЦ з метою оцінки, контролю та обмеження опромінення населення;

- виявлення тенденцій зміни стану природного середовища у зв'язку з функціонуванням екологічно небезпечних об'єктів та при реалізації заходів на забруднених територіях об'єктів природного середовища;

- інформаційного забезпечення прогнозу радіоекологічної ситуації в забрудненій зоні та в Україні в цілому.

Радіоекологічний моніторинг здійснюється за наступними основними напрямками:

- вимірювання інтенсивності іонізуючого випромінювання;
- оцінка вмісту радіонуклідів у тілі та опромінення організмів;
- оцінка радіоактивного забруднення приземного шару повітря і підстилаючих поверхонь (грунту і т.д.), поверхневих і ґрунтових вод.

Планування радіоекологічного моніторингу розглядається у вигляді спеціальної програми, яка має чітко передбачати: вид, частоту, і методи вимірювань, методи відбору проб і їх наступного лабораторного дослідження, методи статистичної обробки, методи інтерпретації та реєстрації даних. Об'єктна спрямованість програми, її масштабність і тривалість визначають як види вимірювань, так і перелік суб'єктів, яким доручається виконання окремих завдань.

Оптимізація радіаційного моніторингу охоплює: аналіз і уточнення мети і задач моніторингу, пунктів спостережень, вимірюваних параметрів і їх кількісних характеристик, методів моніторингу, методів вимірювань і обладнання – розробка, модифікація, адаптація, тощо, аналіз баз даних, огляд сфери впровадження й інформаційного поширення результатів моніторингу. Вимоги якості ведення моніторингу розглядаються у вигляді системи

гарантії якості, яка пронизує всю програму від постановки мети і завдань моніторингу до представлення і поширення результатів моніторингу.

Під радіоактивним забрудненням води слід розуміти вміст в ній природних чи штучних радіонуклідів у таких кількостях, у яких її споживання у якості питної чи поливної води може завдати шкоду для здоров'я людини.

Радіоекологічний моніторинг водойм – це система послідовних спостережень над рівнем радіоактивного забруднення води, а також збирання, оброблення даних про рівень радіоактивності окремих його компонентів (гідробіонтів, донних відкладень та інших), прогнозування їх змін та розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо розробки заходів захисту водойм від радіоактивного забруднення, для прийняття рішень, які можуть позначитися на стані вод.

Два основних первинних джерела надходження радіонуклідів у водойми:

- аеральне – випадіння радіоактивних ізотопів, як природних, так і штучних, з атмосфери на дзеркало водойм;

- розчинення у водоймах радіоактивних елементів та ізотопів земної кори. Вторинне забруднення водойм радіоактивними речовинами формується за рахунок:

- вітрового підйому і переносу радіоактивного пилу на дзеркало водойм;

- змиву радіоактивних речовин з площ водозборів під час дощів, сніготанень, весняних паводків;

- змиву радіоактивних речовин з берегів забруднених радіонуклідами територій під час повеней;

- переносу радіонуклідів водними потоками малих і великих річок.

Основними завданнями радіоекологічного моніторингу водойм є такі:

- спостереження та контролювання рівня радіонуклідного забруднення води;

- вивчення динаміки вмісту окремих радіонуклідів в компонентах водойм (воді, донних відкладеннях, біоті);

- дослідження закономірностей виносу радіоактивних речовин через гирлові створи річок у водойми;

- розробка рекомендацій щодо захисту водойм від радіонуклідного забруднення та їх очищення від радіонуклідів;
- прогноз можливого радіонуклідного забруднення водойм у випадку радіоактивного забруднення території.

Відбір проб з водної поверхні, як правило, не являє складної задачі. Стаціонарні спостереження передбачають відбір проб води для радіометричного і радіохімічного аналізу з глибини 0,2-0,5 м. Проби відбирають у чистий скляний, пластмасовий посуд, що герметично закривається, термоси, попередньо ополоснувши його тричі цією водою. Звичайно відбір здійснюють емальованим відром об'ємом 10 л. Відбір проводять у різних частинах акваторії водойма.

Проби води з річок відбирають в декількох пунктах у обох берегах і посередині річки на глибині 0,5 м, а якщо глибина річки перевищує 2-3 м, то проби води беруть також на глибині 0,5 м від дна.

Звичайно у річках відбір проб проводять по лінії, перпендикулярній напрямку течії, починаючи від одного берега до другого, у трьох-пяти місцях на різній глибині – з поверхні, у середині товщі води та поблизу дна. У озерах і ставках проби відбирають по перпендикулярним діагоналям аналогічно відбору в річках. Проби води із заданої глибини відбирають за допомогою батометрів чи пробовідбірників води – спеціальних приладів різного об'єму, які забезпечують герметичне їх відкривання і закривання на певній глибині, запобігаючи надходження води з інших шарів.

Для визначення багатьох радіонуклідів концентрування проб проводять шляхом співосадження або використовують сорбційне концентрування. Так, ^{90}Sr концентрують, співосаджуючі з карбонатами або оксалатами кальцію. Сорбенти на основі подвійних фероціанідів калію і перехідних металів ефективно поглинають ізомери ^{134}Cs і ^{137}Cs . Для визначення ізомерів плутонію відбирають проби великого об'єму, до 200 л, співосаджуючи їх гідроксидом заліза або діоксидом марганцю. Для концентрування ізомерів торію використовують сорбенти на основі того ж діоксиду марганцю.

Питну воду відбирають зі всіх вододжерел, при цьому слід мати на увазі, що при водозаборі з відкритого водоймища необхідно брати воду і з-під крана. Об'єм проби повинен бути не менше 1 л. Перед заповненням ємності її слід обполоснути досліджуваною водою.

Радіоекологічний моніторинг водойм звичайно передбачає проведення відбору проб води 7 разів на рік:

- під час повені: на підйомі, максимумі і спаді (3 відбори);
- під час літньої межені: при найменшому рівні води і при проходженні дощового паводка (2 відбори);
- восени перед льодоставом (1 відбір);
- під час зимової межені (1 відбір).

Основним прийомом захисту водойм є загорожа їх земляними валами і дамбами. Такі споруди з одного боку захищають водойма від змиву радіонуклідів з забруднених територій дощовими і талими водами, а з другого – від змиву радіонуклідів з забруднених берегів у період весняних паводків.

2. Радіоекологічний моніторинг ґрунту

Моніторинг ґрунтів – це система спостережень, кількісної оцінки та контролю за використанням ґрунтів і земель з метою організації управління їх продуктивністю. Моніторинг ґрунтів – це контроль, діагностика, прогноз і управління станом ґрунтів заради відтворення їх родючості. Він є складовою частиною екологічного моніторингу і входить до системи моніторингу суміжних середовищ і біосфери в цілому.

Можна виділити сім основних джерел первинного радіоактивного забруднення ґрунту:

1. Випадіння на поверхню землі космогенних радіонуклідів.
2. Розсіювання по поверхні землі природних радіоактивних ізотопів, які супроводжують видобуток будь-яких мінералів з товщі земної кори.
3. Осідання на поверхню ґрунту природних радіоактивних ізотопів з викидів ТЕС і ТЕЦ.
4. Робота підприємств ядерного паливного циклу: видобуток урану, збагачення його енергодіючого ізотопу ^{235}U , виготовлення твелів, які супроводжуються надходження у середовище природних радіоактивних ізотопів, та штатні викиди штучних радіоактивні ізотопів атомних електростанцій, при захороненні радіоактивних відходів та їх переробці.
5. Глобальне забруднення поверхні ґрунту штучними радіоактивними ізотопами внаслідок використання та багаторічних

випробувань ядерної зброї, застосування ядерних вибухів у виробництві.

6. Побутові інциденти з радіоактивними природними і штучними джерелами іонізуючих випромінювань.

7. Аварії на підприємствах ядерного паливного циклу, які є, як правило, джерелом штучних радіоактивних ізотопів.

Джерелом вторинного радіоактивного забруднення ґрунту може стати перенос радіоактивних речовин з забруднених територій з вітром або стічними водами. Так, у 1967-970 рр. на Уралі в Челябінській області відбулося забруднення території площею близько 1800 км² завдяки вітрового переносу радіоактивного пилу з берегів озера Карачай, котре використовувалось для видалення радіоактивних відходів підприємства для вироблення ²³⁹Pu. Було рознесено 6×10^{12} Бк ⁹⁰Sr і $1,7 \times 10^{13}$ Бк ¹³⁷Cs.

Під міграцією радіонуклідів в ґрунті слід розуміти сукупність процесів, що ведуть до їх переміщення в ґрунті та його поверхні і зумовлюють перерозподіл за глибиною і в горизонтальному напрямку. У зв'язку з цим виділяють два види міграції – вертикальну і горизонтальну, які проходять одночасно.

Вертикальна міграція – це переміщення радіонуклідів з поверхні ґрунту у глибинні шари; горизонтальна – перенос по поверхні ґрунту з вітром та з током води.

Рух повітря, атмосферні опади, температура довкілля та деякі інші явища, що характеризують особливості погодно-кліматичних умов, відіграють важливу роль в міграції радіонуклідів не тільки в атмосфері, але і в ґрунті.

В процесах горизонтальної міграції радіонуклідів велику роль відіграють особливості рельєфу місцевості, наявність на ній рослинності. Специфічні нерівності поверхні, лісові насадження та буяння трав'янистих рослин при певних поєднаннях можуть практично повністю затримувати поверхневий перенос радіонуклідів. В той же час круті схили, відсутність рослин посилюють його.

Для контролю за радіоактивним забрудненням ґрунту та відстеженням динаміки забруднення необхідне кількісне визначення вмісту окремих радіонуклідів у пробах ґрунту, відібраних безпосередньо на забрудненій території. При проведенні відбору проб ґрунту, як, до речі, й інших об'єктів (рослин, води, продукції)

найважливішою та необхідною умовою має бути дотримання таких основних принципів:

- прив'язка місця відбору до географічних координат чи плану місцевості,

- показність проби (репрезентативність вибірки),

- достатність проби (оптимальна кількість),

Показність, або репрезентативність проби (вибірки) ґрунту забезпечується кількістю відібраних проб з одиниці площі. При однорідному ґрунтовому покриві (не плямистому за гамма- чи бета-фоном) забрудненої території проби відбирають «методом конверта», тобто в п'яти точках (кути і центр квадрата із стороною 100 м) вибирається шар розміром 15×15 см на глибину 5 см. Контрольні точки відбору проб повинні бути віддалені від доріг не менше чим на 200 м. Остаточна проба (1 кг) складається з п'яти добре перемішаних зразків із заздалегідь видаленою рослинністю. При нерівномірному забрудненні поля чи ділянки або неоднорідному ґрунтовому покриві його ділять на декілька частин з однорідними умовами з котрих і відбирають проби також методом конверту. Проби ґрунту бажано відбирати за допомогою спеціальних бурівпробовідбірників на глибину до 20–25 см. Вони дозволяють відібрати як загальний зразок ґрунту з орного шару, так і пошарові зразки. Такий бур, призначений для взяття проб ґрунту, може використовуватися і для відбору донних відкладень у водоймах, про що буде говоритися у наступному розділі. Він являє собою металевий наконечник з хімічно стійкої загартованої сталі, який з'єднується зі штангою.

При відсутності буру зразки ґрунту відбирають за допомогою лопати, совка, ножа. Для відбору загального зразка ґрунту на глибину орного шару роблять прикопку на глибину штика лопати, у котрій з рівної стінки, заглиблюючи лопату на весь штик, зрізують шар ґрунту товщиною 5–7 см. Ґрунт виймають лопатою і покладуть на горизонтальну поверхню. Далі ножем прямо на лопаті формують стовпчик проби ґрунту висота якого дорівнює глибині відбору, а ширина близько 10 см. При необхідності цей стовпчик можна розділити на пошарові зразки.

Відібрані проби ґрунту найкраще упаковувати у два поліетиленових пакети, між котрими вкладають етикетки, у котрих вказується характер проби.

На забруднених після радіаційних чи ядерних інцидентів територіях проводять такі види відбору проб ґрунту: оперативний, плановий і контрольний. Оперативний відбір проб ґрунту проводять у першій гострій після аварійний період (перші дні–місяці після аварії). Мета відбору проб у цей час – це швидке уточнення радіаційної ситуації на забрудненій території та визначення основних параметрів радіоактивного забруднення без зайвої деталізації.

Плановий відбір проб ґрунту проводять у період стабілізації радіаційної ситуації, котрий триває від одного–двох місяців до одного–двох років після аварії.

Контрольний відбір проб ґрунту проводять для уточнення і перевірки результатів моніторингу, котрі з різних причин можуть викликати сумнів.

3. Радіоекологічний моніторинг біоти

Надходження радіоактивних речовин у рослини. Радіоактивні речовини надходять до рослин двома основними шляхами: через надземні органи (некореневе, або аеральне, надходження) і через кореневу систему з ґрунту (кореневе надходження). Надходження через надземні органи можливе головним чином лише в період випадання радіоактивних частинок з атмосфери, тоді як поглинання через коріння може відбуватися протягом десятків років.

Щодо здатності коренів рослин поглинати радіоактивні речовини, то вона визначається багатьма факторами водночас: специфікою виду, розвитком кореневої системи, фазою розвитку рослин, їх фізіологічним станом, вологістю ґрунту, наявністю у ньому елементів живлення. Зв'язування радіонуклідів ґрунтом та рослинами, фіксація біля поверхні ґрунту у зоні розміщення основної маси коріння затримує їх вимивання і перенесення до ґрунтових вод.

Поглинання радіонуклідів коренями, рух їх по рослині і розподіл по окремих органах в значній мірі зумовлені їх хімічними властивостями. Ізотопи цезію і стронцію, які мають багато подібного, відповідно, до калію і кальцію, надходять до рослин з ґрунту у великих кількостях. Радіонукліди ^{60}Co , ^{91}Y , ^{106}Ru , ^{144}Ce , ^{147}Pm , актиноїди нагромаджуються у кількостях на декілька порядків менших. Великі значення КН має сірка, яка є досить важливим для живих організмів макроелементом, близькі до неї значення можуть досягати деякі мікроелементи (залізо, марганець, цинк), котрі також

відіграють значну роль у метаболізмі. При цьому ^{137}Cs і ^{90}Sr легко і швидко пересуваються по рослині, в той час як більшість ізотопів нагромаджується переважно у коренях і далі практично не пересувається.

Розподіл радіонуклідів у надземних частинах рослин відбувається також по-різному. Близько половини їх кількості, що потрапила до рослини, нагромаджується у стеблі. Значно менше радіоактивності надходить до листя, ще менше – до колосся і лише кілька відсотків – до зерна (плодів). Отже, можна виявити закономірну залежність – чим далі по транспортному ланцюжку від коріння знаходиться орган, тим менше, як правило, радіонуклідів він нагромаджує. У випадку з зерновими та зернобобовими видами рослин, основною продукцією котрих є зерно, ця залежність дуже відрадна. Але коли продуктивними органами є листя, а особливо підземні частини рослин – у коренеплоди, цибулини, бульби доводиться мати справу з більш забрудненою продукцією.

Надходження радіонуклідів до організму тварин і людини.

Надходження радіоактивних речовин в організм тварин відбувається через шлунково-кишковий тракт, органи дихання, а також крізь ушкоджені і неушкоджені шкіряні покриви. Аеральний шлях надходження, тобто через органи дихання, має вагомий внесок лише у період випадання радіоактивних опадів. Незначним є також проникнення радіоактивних речовин через шкіру – перкутантний шлях.

Головним шляхом залучення їх у тваринний організм, як і організм людини, слід вважати пероральний – тобто з їжею та водою. Доля радіоактивних речовин в організмі тварин не відрізняється від такої звичайних стабільних хімічних речовин, які входять до складу кормів. Надходячи до шлунково-кишкового тракту, кормові продукти піддаються механічній та біохімічній обробці, перетворюючись на сполуки, які можуть бути засвоєні організмом. В процесі метаболізму радіоактивних речовин в організмі тварин розрізняють два етапи

Радіонукліди, що всмокталися у кров, розповсюджуються з її током по органах і тканинах тварини, де частково затримуються, вибірково концентруючись в окремих органах. Та більша їх частина одразу виводиться з організму.

Доля радіонуклідів, які беруть участь в обміні, неоднакова. Як правило, вони затримуються у тих тканинах і органах, до складу яких

входять їх стабільні ізотопи і елементи з аналогічними хімічними властивостями. Оскільки хімічний склад тканин сільськогосподарських тварин вивчений досить добре, можна передбачати, до яких саме частин організму потрапить той чи інший радіонуклід.

Існує три основних типи розподілу радіонуклідів в організмі хребетних тварин: дифузний, скелетний та ретикулоендотеліальний.

Дифузний, або рівномірний, тип характерний для ізотопів лужних елементів: калію, натрію, цезію, рубідію, а також водню, азоту, вуглецю, полонію.

Скелетний тип властивий, перш за все, радіонуклідам лужноземельної групи, головними представниками якої є ізотопи кальцію та стронцію. В мінеральній частині скелету накопичуються також ізотопи барію, радіоактивні елементи радій, плутоній, уран та деякі інші.

Ретикулоендотеліальне розподілення – розподілення по системі клітин кісткового мозку, лімфатичних вузлів, мигдаликів, селезінки, печінки, надниркової залози, гіпофізу та деяких інших, властиве для рідкоземельних металів: церію, прометію, а також цинку, торію, частково трансуранових елементів.

4. Радіоекологічний моніторинг сфери агропромислового виробництва

Радіоекологічний моніторинг агроєкосистем – це контроль сільськогосподарських угідь за щільністю радіоактивного забруднення ґрунтів, сільськогосподарської продукції, її похідних, у тому числі кормів та продуктів харчування, а також поверхневих вод сільськогосподарського призначення.

Основними завданнями радіоекологічного моніторингу агропромислового виробництва є:

- виявлення шляхів формування радіоактивного забруднення в аграрній сфері;
- виявлення динаміки і тенденцій радіоактивного забруднення сільськогосподарських угідь та продукції рослинництва і тваринництва;
- забезпечення директивних органів і населення об'єктивною інформацією щодо поточного стану агроєкосистем й рівнів їх забруднення радіонуклідами;

– встановлення закономірностей і верифікації моделей поведінки радіонуклідів в агроценозах;

– прогнозування можливих негативних наслідків радіоактивного забруднення внаслідок аварійних ситуацій;

– розробка рекомендацій по веденню сільськогосподарського виробництва у випадку радіоактивного забруднення агроecosystem з метою зменшення вмісту радіонуклідів у продукції, продуктах харчування населення і зниження дозових навантажень.

При радіоекологічному моніторингу агропромислового виробництва основними об'єктами відстеження є:

– в рослинництві – ґрунти орних і пасовищних угідь, сільськогосподарські рослини, продукція рослинництва, зрошувальна вода, добрива, агро меліоранти, меліоративні системи;

– в тваринництві – корми, кормові добавки, кормова сировина; сільськогосподарські тварини, у тому числі птиця і риба, раціон тварин, продукція тваринництва (молоко, м'ясо, яйця, шкіра, вовна, пух, перо та деякі інші), вода, що використовується для водопою худоби чи товарного розведення риби, гній, пташиний послід та інші відходи тваринництва, тваринницькі приміщення.

Основними контрольованими параметрами є такі: потужність експозиційної дози γ -випромінювання; вміст біологічно значимих радіонуклідів у ґрунті, добривах і агро меліорантах; вертикальний розподіл радіонуклідів у профілі ґрунтів; вміст радіонуклідів у рослинах, кормах і раціоні тварин; у воді водойм, використовуваних для поливу посівів і водопою худоби, а також для риборозведення; вміст радіонуклідів у продукції рослинництва і тваринництва. При цьому здійснюється прижиттєвий контроль вмісту радіонуклідів в організмі тварин. На основі цих контрольованих параметрів розраховуються щільність забруднення ґрунтів сільськогосподарських угідь, коефіцієнти накопичення (переходу) радіонуклідів із ґрунту в сільськогосподарські культури, корми і продукцію рослинництва і тваринництва.

Для визначення рівня радіоактивного забруднення ґрунту, рослинності й продуктів тваринництва роблять відбір зразків і наступний аналіз їх у лабораторних умовах.

Основні вимоги до зразків – наглядність, адекватність, стабільність, відсутність будь-яких змін. Кількісним вираженням

рівня радіоактивного забруднення об'єктів природного середовища є питома (концентрація) або об'ємна активність нукліда в зразку.

Для оцінки радіоактивного забруднення території використовують поняття щільності радіоактивного забруднення – поверхнева активність нукліду на певній площі. Для визначення вмісту радіонуклідів в об'єктах і продукції агропромислового виробництва застосовують різні методи аналізу. Повний радіонуклідний аналіз об'єктів природного середовища може бути здійснено лише при спільному використанні методів альфа-, бета- і гамма-спектрометрії і радіохімії.

Радіоекологічний моніторинг агропромислового виробництва повинен включати:

- періодичні (систематичні) виміри потужності дози γ -випромінювання (радіаційного фону) на місцевості;

- періодичний (систематичний) відбір зразків у спеціально обраних місцях спостереження й контрольних пунктах, визначення концентрації радіонуклідів у цих зразках, радіонуклідного складу забруднення й фізикохімічних форм радіонуклідів;

- розрахунок дозових навантажень на біоту на підставі первинних даних моніторингу;

- оцінку поточного стану радіаційної обстановки;

- підготовку інформації, необхідної для здійснення контролю радіаційної обстановки;

- прогноз можливих змін радіаційної обстановки. Радіоекологічну ситуацію, що існує чи склалася в агропромисловому виробництві внаслідок радіаційного чи ядерного інциденту, характеризують за допомогою таких основних показників:

- потужність дози γ -випромінювання; – щільність радіонуклідного забруднення сільськогосподарських і лісових угідь;

- вміст окремих радіонуклідів в сільськогосподарській продукції.

Оцінка радіаційної обстановки здійснюється шляхом порівняння результатів вимірів і розрахунків із системою спеціально вироблених критеріїв, що визначають допустимий рівень радіаційного впливу на біоту. При радіаційно-гігієнічному підході до оцінки забруднення сільськогосподарських угідь і продукції АПК основою для вироблення таких критеріїв є нормативи вмісту радіонуклідів у продуктах харчування й воді, обумовлені "Нормами радіаційної безпеки України (НРБУ-97)" та тимчасовими допустимими рівнями

вмісту критичних радіонуклідів у харчових продуктах, що можуть вводитися на певний період після радіаційного чи ядерного інциденту. На підставі цих нормативів можуть бути розраховані гранично допустимі концентрації радіонуклідів в агропромисловій продукції, межі допустимого вмісту радіонуклідів у раціоні тварин або гранично припустимий вміст найнебезпечніших у біологічному відношенні радіонуклідів у ґрунті (щільність її радіоактивного забруднення).

Для рішення цих завдань необхідні не тільки систематичні спостереження за вмістом радіонуклідів у контрольованих об'єктах, але й дослідження впливу природних (фізико-хімічних, біогеохімічних, мікробіологічних) і техногенних (агротехнічних, агрохімічних, зоотехнічних) факторів на міграцію радіонуклідів біологічними ланцюжками. Прогноз можливої зміни радіаційної обстановки здійснюється на підставі первинних даних радіоекологічного моніторингу, виявлених тенденцій і закономірностей міграції радіонуклідів, а також результатів лабораторних і польових досліджень. Необхідною умовою прогнозування є розробка концептуальних або математичних моделей розглянутих процесів, оснащення моделей емпіричними параметрами й перевірка їх на адекватність.

Список літератури

1. Гайченко В. А., Гудков І. М., Кашпаров В. О. Практикум з радіобіології та радіоекології. Київ : Кондор, 2010. 286 с.
2. Гудков І. М. Радіобіологія. Київ : НУБіП України, 2016. 485 с.
3. Гудков І. М. Радіобіологія : підручник. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2019. 504 с.
4. Гудков І. М., Віннічук М. М. Сільськогосподарська радіобіологія. Житомир : Вид-во ДАУ, 2003. 472 с.
5. Давиденко В. М. Радіобіологія : навчальний посібник. Миколаїв : МДАУ, 2010. 229 с.
6. Давиденко В. М. Словник понятійних термінів радіобіології. Миколаїв : МДАУ, 2006. 28 с.
7. Кічно В. О., Поліщук С. В., Гудков І. М. Основи радіобіології та радіоекології : навч. посіб. Київ : Хай-Тек-Прес, 2010. 320 с.
8. Кутлахмедов Ю. О., Войціцький В. М., Хижняк С. В. Радіобіологія : підручник. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2011. 543 с.
9. Лико Д. В., Костолович М. І., Войтович О. П. Радіоактивні відходи: технології утворення, поводження, утилізації : навчальний посібник. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2016. 204 с.
10. Методичні вказівки до практичних занять з радіобіології / уклад. : А. П. Мартиненко, В. Г. Мартиненко, О. В. Медведєва. Кропивницький : ЦНТУ, 2019. 106 с.
11. Сільськогосподарська радіобіологія з основами радіоекології: теоретичні основи та лабораторно-розрахунковий практикум : навч. посіб. / В. П. Славов та ін. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2015. 311 с.

Навчальне видання

РАДІОБІОЛОГІЯ

курс лекцій для здобувачів початкового рівня (короткий цикл) вищої освіти ОПП «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва» спеціальності 204 «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва» денної форми здобуття вищої освіти

Укладачі:

ЛУГОВИЙ Сергій Іванович

ЛЮТА Ірина Миколаївна

Формат 60×84 1/16 ум. друк. арк. ____

Тираж ____ прим. Зам. № ____.

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного аграрного університету
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р.