

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Г. Г. Трохименко

РАДІОЕКОЛОГІЯ. КУРС ЛЕКЦІЙ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою НУК

Електронне видання комбінованого
використання на DVD-ROM



МИКОЛАЇВ • НУК • 2012

УДК 504.064.2:557.346(075.8)
ББК 28.081я7
Т 76

Автор Г. Г. Трохименко, кандидат біологічних наук, доцент, заступник
завідувача кафедри екологічної безпеки

Рецензент О. І. Цебржинський, доктор біологічних наук, професор,
завідувач кафедри фізіології та біохімії МНУ ім. В.О. Сухомлинського

Трохименко Г. Г.

Т 76 Радіоекологія. Курс лекцій : навчальний посібник / Г. Г. Трохименко. –
Миколаїв : НУК, 2012. – 127 с.

Розглянуто актуальні проблеми вивчення та основні поняття і положення радіоекології. З урахуванням основ фундаментальної екології висвітлені питання медико-біологічних ефектів радіації. Викладено методи проведення радіоекологічних досліджень та уявлення про природні та техногенні джерела радіоактивного забруднення довкілля. Розглянуто сучасну радіаційну ситуацію в Україні та особливості радіоактивного забруднення її екосистем, нормування радіоактивного навантаження і радіоекологічного моніторингу досліджуваних територій. Подано словник радіоекологічних термінів та основних понять.

Рекомендовано для студентів екологічних, географічних, геологічних і біологічних спеціальностей вищих навчальних закладів освіти.

УДК 504.064.2:557.346(075.8)
ББК 28.081я7

Навчальне видання

ТРОХИМЕНКО Ганна Григорівна

РАДІОЕКОЛОГІЯ. КУРС ЛЕКЦІЙ

Навчальний посібник

Редактор *Ю.О. Банкулова*

Комп'ютерне складання та верстання *Н.В. Ялова*

Коректор *М.О. Паненко*

© Трохименко Г. Г., 2012

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2012

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 7,4. Обсяг даних 3200 кб.

Тираж 14 прим. Вид. № 25. Зам. № 94.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова,

просп. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025

E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

ЗМІСТ

<i>Лекція 1.</i> Тема: "Джерела іонізуючого випромінювання"	4
<i>Лекція 2.</i> Тема: "Види випромінювання. Дози. Системні та позасистемні одиниці виміру доз"	23
<i>Лекція 3.</i> Тема: "Дія іонізуючого випромінювання на живі організми" ...	32
<i>Лекція 4.</i> Тема: "Поширення кисневого ефекту. Прямі та непрямі ефекти опромінення, модифікація радіобіологічних ефектів"	41
<i>Лекція 5.</i> Тема: "Відповідь тваринного організму на опромінення " ..	55
<i>Лекція 6.</i> Тема: "Пізні ефекти опромінення та радіаційний канцерогенез"	63
<i>Лекція 7.</i> Тема: "Радіостійкість видів, що належать до різних таксонів. Радіочутливість рослин"	70
<i>Лекція 8.</i> Тема: "Процеси переносу радіонуклідів при випробуваннях ядерної зброї, аваріях та їхня міграція"	81
<i>Лекція 9.</i> Тема: "Перенесення радіонуклідів у водному середовищі та ступінь радіаційної небезпеки"	92
Контрольні питання	98
Термінологічний словник	102
Список рекомендованої літератури	124

Лекція 1

Тема: "ДЖЕРЕЛА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ"

План

1. *Поняття "радіоекологія". Зміст та завдання предмета.*
2. *Природні джерела радіації:*
 - а) космічні промені;*
 - б) земна радіація;*
 - в) внутрішнє опромінення;*
 - г) радон.*
3. *Аномалії природного фону.*
4. *Штучні джерела радіації.*
5. *Радіоактивне випромінювання при випробуванні ядерної зброї.*

Слово "екологія" походить від грец. "ойкос", що означає "будинок, житло". Зазвичай екологію визначають як науку, що вивчає взаємозв'язок між живими організмами та їхнім життєвим середовищем, функціонування і взаємодії багатокомпонентних і багаторівневих систем у природі й суспільстві та засоби корегування взаємного впливу техносфери і біосфери з метою збереження людства й біосфери.

Радіоекологія – розділ екології, який вивчає вплив іонізуючого випромінювання (ІВ) на навколишнє середовище, накопичення радіоактивних речовин (РР) організмами та їх міграцію в біосфері, визначаючи способи захисту людини від шкідливих наслідків, пов'язаних з радіоактивним забрудненням різних екологічних систем.

Радіоекологія виникла після відкриття іонізуючих випромінювань. У 1895 році німецький фізик Вільгельм Конрад Рентген відкрив Х-випромінювання, яке згодом отримало його ім'я. Рентгенівське випромінювання – це електромагнітні хвилі довжиною $10^{-5} \dots 10^2$ нм (0,1...100 кев). До речі, є свідчення, що першим відкрив невідомі промені, які виникають при бомбардуванні потоком електронів (катодне випромінювання) пластин важких металів (вольфраму), наш співвітчизник, професор Віденського університету фізик і електронник Іван Пулюй. Ві

Тема: "ДЖЕРЕЛА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ"

досліджував взаємодію катодних променів з речовиною, отримав перші знімки різних предметів у невідомих променях, але вважав результати своїх досліджень не готовими для оприлюднення. Вчені В.К. Рентген та І. Пулюй були особисто знайомі та Рентгену були відомі результати досліджень Пулюя, але Рентген першим оприлюднив результати своїх досліджень і у 1901 році першим серед фізиків став лауреатом Нобелівської премії. У 1896 році французький фізик Анрі Бекерель відкрив явище радіоактивності урану, яке супроводжується альфа-, бета- і гамма-випромінюваннями. Подальше вивчення характеристик цих випромінювань дозволило встановити, що α -частинки – це ядра гелію, β -частинки – це електрони, а γ -кванти – високоенергетичне електромагнітне випромінювання (100 кев... 10 Мев).

У процесі досліджень А. Бекерель і помічник В. Рентгена В. Груббе отримали радіаційні ушкодження – опіки шкіри. Тоді люди ще не знали, що вплив іонізуючих випромінювань небезпечний і може викликати негативні радіаційні ефекти: опіки шкіри, променеву хворобу, злоякісні новоутворення, що може призвести до летальних наслідків. Подальший великий внесок у дослідження радіоактивності зробили Марія Складовська-Кюрі та П'єр Кюрі. У 1898 році вони відкрили нові радіоактивні елементи – полоній і радій. Саме вони ввели термін "радіоактивність". У 1901 році П'єр Кюрі відкрив біологічну дію радіоактивного випромінювання, а в 1903 році – закон експоненційного убування радіоактивності із часом. Завдяки роботам подружжя Кюрі й англійського фізика лорда Ернста Резерфорда була розроблена перша модель будови атома. Подружжя Кюрі та Анрі Бекерель за відкриття радіоактивності отримали Нобелівську премію у 1903 році. Продовжила дослідження радіоактивності Ірен Кюрі (дочка Марії та П'єра Кюрі) та її чоловік Фредерік Жоліо, які у 1934 році відкрили явище штучної радіоактивності, що теж було відзначено Нобелівською премією. Наступний крок зробили російські фізики Костянтин Петржак і Георгій Флеров, які у 1940 році відкрили самочинний (спонтанний) поділ урану-235. Розвиток ядерних технологій почався з відкриття у 1939 році ланцюгової реакції поділу урану під дією нейтронів (Отто Ган, Ф. Штрассман, Лізе Майтнер, Нобелівська премія 1944 року) і створення першого ядерного реактора (Енріко Фермі, 1942 рік, і Ігор Курчатov, 1943 рік).

Інформація про біологічну дію накопичувалася у процесі дослідження характеристик ІВ, розробки і використання радіаційних і ядерних технологій. Необхідність медичної допомоги постраждалим дослідникам, тех-

ноголам, операторам, іншим спеціалістам обумовила участь у цих дослідженнях і розробках медиків та гігієністів. У медицині виникла окрема галузь – радіологія, в гігієні – новий напрям – радіаційна гігієна.

Наукове обґрунтування методів і засобів діагностики в радіології та ефективності радіаційного захисту обумовило необхідність проведення спеціальних радіоекологічних досліджень. Методологія цих досліджень має забезпечити виявлення кількісних залежностей між радіаційними характеристиками випромінювань і кінцевими радіаційними ефектами для окремих організмів і популяцій різних біологічних видів і людей. Ці дослідження виконувалися методом моделювання на штучно забруднених радіонуклідами (РН) сільськогосподарських ділянках, з використанням піддослідних тварин, а також проводилися у разі нещасних випадків, радіаційних аварій, які призводили до радіаційних ушкоджень людей і забруднення територій. Найбільший внесок у радіоекологічні дослідження був отриманий, на жаль, при вивченні наслідків ядерних бомбардувань Хіросіми і Нагасакі у серпні 1945 року, а також випробувань ядерної зброї, радіаційних аварій у Киштімі у 1958 році і на Чорнобильській АЕС у 1986 році.

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

Радіоекологія тісно пов'язана з іншими науками: фізикою, біологією, медициною. Природа радіоактивності, властивості радіоактивних ізотопів, характеристики ІВ, особливості їх взаємодії з речовиною є предметом ядерної фізики. Для визначення і вимірювання радіаційних характеристик радіоекологія використовує методи і засоби ядерної фізики. Це радіо-

Тема: "ДЖЕРЕЛА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ"

метричні, дозиметричні та спектрометричні методи, які базуються на основних ефектах взаємодії випромінювань з речовиною, а саме іонізація, виділення теплової енергії, сцинтиляція, фотоэффект та ін. За допомогою іонізаційних камер, лічильників, сцинтиляційних і напівпровідникових детекторів, калориметрів, які входять до складу радіометрів, дозиметрів, спектрометрів, вимірюються інтенсивність потоків, енергія, потужність дози, довжина пробігу, коефіцієнти розподілу, коефіцієнти ефективності та інші радіаційні характеристики. Діагностика, розвиток і методи лікування радіаційних ушкоджень організму людини є предметом радіології. Аналогічні методи і засоби спостереження радіаційних ефектів у тварин і рослин використовуються радіоекологією. Механізми впливу первинних радіаційних ушкоджень на функціонування живих організмів, умови відновлення нормальних функцій і розвитку первинних ушкоджень та їхнього перетворення в незворотні наслідки вивчаються біофізикою, радіаційною медициною, зокрема її новим розділом – фізикою радіаційної медицини. Радіоекологія широко використовує експериментальні статистичні дані епідеміології та застосовує аналогічні методи аналізу в дослідженнях популяцій тварин і рослин.

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

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

Предметом вивчення дисципліни "Радіоекологія" є вплив радіації на людину, тварин, рослини, біоценози, взаємодія випромінювання різної природи з речовиною, методи і засоби вимірювання радіаційних ефектів.

Метою вивчення курсу є здобуття знань щодо основних понять, характерних рис і етапів розвитку та досягнень сучасної радіоекології, особливостей її методології, взаємодії радіоекології з радіаційною медициною і комунальною гігієною та формування умінь використовувати системний підхід при аналізі й вирішенні екологічних проблем міста і територій з урахуванням радіаційних впливів на біосферу.

Основні завдання вивчення курсу:

набуття знань щодо властивостей різних видів радіації в навколишньому середовищі, ефектів їх взаємодії з речовиною, значення радіаційних ефектів для життя і розвитку живих істот і систем, методології вивчення та визначення впливу радіації на людину і біоценози, наукового обґрунтування безпечних умов життєдіяльності людей, тварин і рослин при наявності впливів радіації природного і техногенного походження;

формування умінь орієнтуватися у радіоекологічних проблемах міста і радіаційно забруднених територій, визначати пріоритетні проблеми і першочергові завдання, вирішення яких має суттєво покращити радіоекологічну ситуацію в місті, селищі, на території, орієнтуватися у наявній інформації щодо існуючої радіоекологічної ситуації, шукати потрібні джерела й обирати суттєву інформацію, необхідну для вирішення визначених завдань, оцінювати стан радіаційних характеристик навколишнього середовища, промислових і комунальних об'єктів, прогнозувати радіоекологічні ризики для персоналу і населення;

формування навичок визначати пріоритети, відокремлювати головні, суттєві радіоекологічні проблеми від другорядних при виконанні системного аналізу, робити обґрунтовані висновки на підставі результатів системних досліджень, використовуючи, зокрема, порівняння кількісних оцінок ризиків від різних природних і техногенних джерел небезпеки.

Природні джерела радіації

Основну частину опромінювання населення земної кулі отримує від природних джерел радіації (ПДР). Опромінення від більшості з них уникнути неможливо. Протягом всієї історії існування Землі різні види опромінювання падають на поверхню Землі з космосу і надходять від радіоактивних речовин, які знаходяться у земній корі. Людина підпадає під

Тема: "ДЖЕРЕЛА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ"

опромінення двома способами. Радіоактивні речовини можуть знаходитися поза організмом та опромінювати його зовні. У цьому випадку говорять про зовнішнє опромінення. Радіоактивні речовини можуть знаходитися у повітрі, їжі чи воді та попадати в організм. Такий спосіб опромінення називають внутрішнім.

Опроміненню від природних джерел радіації підлягає будь-який житель Землі, однак одні з них отримують більші дози, ніж інші. Це залежить, зокрема, від того, де вони живуть. Рівень радіації у деяких місцях земної кулі, там, де залягають особливо радіоактивні породи, виявляється значно вище середнього, а в інших місцях – відповідно нижче. Доза опромінення залежить також від способу життя людей. Застосування деяких будівельних матеріалів, використання газу для приготування їжі, відкритих вугільних жаровень, герметизація приміщень і навіть польоти на літаках – все це підвищує рівень опромінення за рахунок природних джерел радіації.

Земні джерела радіації у сумі відповідно більші за частину опромінення, під яке підпадає людина за рахунок природної радіації. У середньому вони забезпечують більше 5/6 річної ефективної еквівалентної дози, яку отримує населення в основному внаслідок внутрішнього опромінення. Іншу частину вносять космічні промені, головним чином, шляхом зовнішнього опромінення.

Розглянемо спочатку дані щодо зовнішнього опромінення від джерел космічного та земного походження. Далі зупинимося на внутрішньому опроміненні, до того ж особливу увагу приділимо радону – радіоактивному газу, який вносить найбільший внесок у середню дозу опромінення населення з усіх джерел природної радіації. Також будуть розглянуті деякі види діяльності людини, у тому числі використання вугілля та добрив, які сприяють вилученню радіоактивних речовин із земної кори та підвищують рівень опромінення людей від ПДР.

Космічні промені

Радіаційний фон, створюваний космічними променями, дає трохи менше половини зовнішнього опромінення, яке отримує населення від ПДР. Космічні промені в основному приходять до нас з глибин Всесвіту, але деяка їхня частина народжується на Сонці під час сонячних вибухів. Космічні промені можуть досягати поверхні Землі або взаємодіяти з її атмосферою, породжуючи вторинне випромінювання та приводячи до утворення різних радіонуклідів.

Немає такого місця на Землі, куди не досягав би цей невидимий космічний душ. Але одні частини земної поверхні більше підлягають його дії, ніж інші. Північний та Південний полюси отримують більше радіації, ніж екваторіальні зони, через наявність у Землі магнітного поля, яке відхиляє заряджені частинки (з яких в основному складаються космічні промені). Рівень опромінення підвищується з висотою, оскільки при цьому над нами залишається менше повітря, яке відіграє роль захисного екрана.

Люди, які живуть на рівні моря, отримують у середньому від космічних променів еквівалентну дозу біля 300 мкЗв на рік; для людей, які живуть вище 2000 м над рівнем моря, ця величина у декілька разів більша. Ще більш інтенсивному, хоч і відносно нетривалому опроміненню підлягають екіпажі та пасажери літаків. При підйомі з висоти 4000 м (максимальна висота, на якій розташовані поселення людей: села шерпів на схилах Евересту) до 12000 м (максимальна висота польотів трансконтинентальних авіалайнерів) рівень опромінення за рахунок космічних променів підвищується приблизно у 25 разів та продовжує зростати при подальшому підвищенні висоти до 20 000 м (максимальна висота польоту надзвукових реактивних літаків) та вище (табл. 1.1).

Таблиця 1.1. Доза, отримана при трансатлантичному перельоті Нью-Йорк–Париж

Швидкість перельоту	Час польоту	Приблизна доза за рейс, мкЗв *
Надзвуковий літак	2 год 35 хв	40
Літак, який пересувається зі швидкістю звуку	7 год 25 хв	50

*Індивідуальні дози, які отримують пасажери реактивних літаків при трансатлантичному перельоті за рахунок радіаційного фону, який створюється космічними променями при середній сонячній активності.

Підвищення з висотою, м, потужності еквівалентної дози опромінення, мкЗв/год, за рахунок космічних променів подано нижче:

Рівень моря	0,03
2000	0,10
4000	0,20
12000	5
20 000	13

Тема: "ДЖЕРЕЛА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ"

При перельоті з Нью-Йорка до Парижа пасажир звичайного турбореактивного літака отримує дозу біля 50 мкЗв, а пасажир надзвукового літака на 20 % менше, хоча підлягає більш інтенсивному опроміненню. Це пояснюється меншим часом польоту в другому випадку.

Земна радіація

Основні радіоактивні ізотопи, які зустрічаються у гірських породах Землі, – це калій-40, рубідій-87 та члени двох радіоактивних сімейств, які беруть початок відповідно від урану-238 та торію-232 – довготривалих ізотопів, які входять до складу Землі із часу її зародження.

Рівень земної радіації неоднаковий для різних місць земної кулі та залежить від концентрації РН у тій чи іншій частині земної кори. У місцях проживання основної маси населення вони приблизно одного порядку. Так, згідно з дослідженнями, проведеними у Франції, Німеччині, Італії, Японії та США, приблизно 95 % населення цих країн живе у місцях, де потужність дози опромінення у середньому складає 0,3...0,6 мЗв/рік. Але деякі групи населення отримують значно більші дози опромінення: біля 3 % отримують в середньому 1 мЗв/рік, а біля 1,5 % – більше 1,4 мЗв/рік. Є місця, де рівні земної радіації набагато вищі в залежності від джерела радіації. Наприклад, неподалік від міста Посус-ді-Калдас у Бразилії рівень радіації перевищує у 800 разів середній та досягає 250 мЗв/рік. А на курорті Гуарапарі на окремих частинах пляжу зареєстрований рівень радіації 175 мЗв/рік. Населений пункт стоїть на пісках, багатих на торій. Така ж ситуація на південному заході Індії, деяких місцях Франції, Нігерії, Мадагаскару.

За підрахунками НКДАР ООН середня ефективна доза зовнішнього опромінення, яке людина отримує за рік від земних джерел природної радіації, складає приблизно 350 мкЗв, тобто трохи більше середньої індивідуальної дози опромінення через радіаційний фон, створений променями на рівні моря.

Внутрішнє опромінення

У середньому приблизно 2/3 ефективної еквівалентної дози опромінення, яку людина отримує від ПДР, надходить від радіоактивних речовин, що потрапили в організм з їжею, водою та повітрям. Зовсім невелика частина цієї дози припадає на радіоактивні ізотопи типу вуглець-14 та тритій, які утворюються під впливом космічної радіації. Усе останнє надходить від джерел земного походження. У середньому людина отримує

біля 180 мкЗв/рік за рахунок калію-40, який засвоюється організмом разом з нерадіоактивними ізотопами калію, необхідними для життєдіяльності організму. Однак, значно більшу дозу внутрішнього опромінення людина отримує від нуклідів радіоактивного ряду урану-238 та у меншій мірі від радіонуклідів ряду торію-232.

Деякі з них, наприклад свинець-210 та полоній-210, надходять до організму з їжею. Вони концентруються у рибі та молюсках, тому люди, які споживають багато риби та інших дарів моря, можуть отримати відносно високі дози опромінення.

Десятки тисяч людей на Крайній Півночі живляться в основному м'ясом північного оленя (карибу), в якому обидва радіоактивні ізотопи присутні у досить високій концентрації. Особливо високий вміст полонію-210. Ці ізотопи надходять у організм оленів взимку, коли вони годуються лишайниками, в яких накопичуються ці ізотопи. Дози внутрішнього опромінення від полонію-210 у цих випадках можуть у 35 разів перевищувати середній рівень. У південній півкулі люди, які живуть у Західній Австралії у місцях з підвищеною концентрацією урану, отримують дози опромінювання, які у 75 разів перевищують середній рівень, тому що їдять м'ясо та внутрішні органи овець і кенгуру.

До того як потрапити в організм людини, радіоактивні речовини проходять складними маршрутами навколишнього середовища (див. рисунок), і це необхідно враховувати при оцінці доз опромінення, отриманих від будь-якого джерела.

Радон

Нещодавно вчені зрозуміли, що найбільш вагомим з усіх джерел радіації є важкий (у 7,5 разів важчий за повітря) газ – радон, який не має запаху, невидимий, без смаку.

За оцінкою НКДАР ООН радон разом зі своїми дочірніми продуктами радіоактивного розпаду відповідає приблизно за 3/4 річної індивідуальної ефективної еквівалентної дози опромінення, яку отримує населення від земних джерел радіації, і приблизно за половину цієї дози від усіх ПДР. Більшу частину цієї дози людина отримує від РН, які надходять в її організм разом з повітрям, особливо у непровітрюваних приміщеннях.

Основну небезпеку викликає його попадання в легені з водяною парою. Найчастіше це відбувається у ванній кімнаті, коли людина приймає гарячий душ.

Тема: "ДЖЕРЕЛА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ"

Під землею радон змішується з природним газом, який потім використовується в побутових газових плитах, і таким чином попадає в приміщення. Концентрація його значно збільшується за відсутності надійних витяжних систем. За американськими даними, середня концентрація радону, $\text{кБк} \cdot \text{м}^{-3}$, в різних приміщеннях квартири складає: у ванній кімнаті 8,5; кухні 3,0; житлових кімнатах 0,2. За даними наукового комітету з атомної енергетики ООН, концентрація радону разом з продуктами його розпаду всередині будинків приблизно у 25 разів перевищує середній рівень у зовнішньому повітрі.

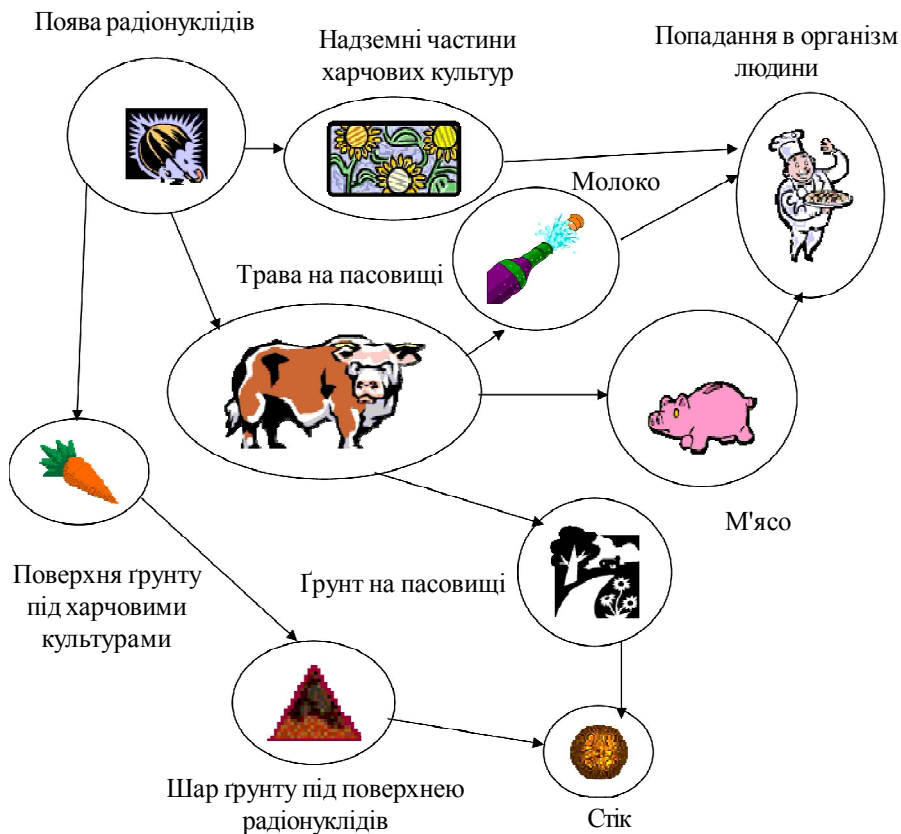


Схема розповсюдження радіонуклідів у навколишньому середовищі

Радон, потрапляючи в організм, відразу ж уражає залози внутрішньої секреції, гіпофіз, кору надниркових залоз. Це викликає задишку, серцебиття, мігрень, тривожний стан, безсоння. Іноді розвиваються злоякісні пухлини в легенях, печінці, селезінці.

Український науковий центр радіаційної медицини стверджує, що близько 70...75 % дози опромінення населення України від усіх джерел природної радіоактивності припадає на радон. Причиною є Український щит – тектонічна структура, яка проходить з півночі на південь майже посередині України і займає близько 30 % усієї території. Складається щит з гранітів та інших кристалічних порід, що характеризуються підвищеною радіоактивністю. Підвищену радіоактивність мають сланці, фосфорити. Тому фосфорні (а також азотні та калієві) мінеральні добрива часто є носіями радіоактивного забруднення ґрунтів і ґрунтових вод. Високу радіоактивність мають кальцієво-силікатний шлак, фосфогіпс, доменний шлак, вугільний шлак.

Аномалії природного фону

На планеті є місця, де рівні радіаційного фону підвищені внаслідок значних покладів радіоактивних мінералів. Виявлено п'ять основних населених місць, які мають істотно збільшений природний рівень радіації через певний склад ґрунту і гірських порід. Це Бразилія, Франція, Індія, острів Німус (Тихий океан) і Єгипет. У ряді місць Бразилії, головним чином у прибережних смугах, кожна з яких має довжину в кілька кілометрів і ширину в кілька сотень метрів, потужність випромінювання з ґрунту і скельних порід складає 5 мЗв/рік. Приблизно 1/6 частина населення Франції проживає в районах, де скельні породи представлені переважно гранітом, унаслідок чого радіаційний фон підвищений і потужність дози складає 1,8...3,5 мЗв/рік. В індійських штатах Керала і Мадрас прибережна зона довжиною 200 км і завширшки в декілька сотень метрів відома як область інтенсивного випромінювання, унаслідок чого 100 000 людей одержують за рік дозу, яка в середньому дорівнює 13 мЗв. Це найвищий рівень природного радіаційного фону, якого зазнає сучасна людина.

До аномальних районів в Україні можна віднести Хмільник, Миронівку, Жовті Води, а також Дніпропетровську, Кіровоградську і Миколаївську області, де знаходяться рудники з видобування урану. У цих місцях рівні природного фону в десятки і сотні разів більші, ніж на іншій території.

Тема: "ДЖЕРЕЛА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ"

У цілому, за даними спеціального наукового комітету ООН, середня еквівалентна доза опромінення населення в промислово розвинених країнах земної кулі за рахунок природних джерел випромінювання складає 2,5...3,0 мЗв/рік.

Слід зазначити, що діти до 10 років через вікові особливості організму одержують дозу в 1,5 рази більшу внаслідок надходження в організм продуктів розпаду радону з вдихуванням повітрям, оскільки частота дихання у дітей більша.

Штучні джерела іонізуючого випромінювання

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

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

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

До основних штучних джерел радіоактивних забруднювачів відносять: застосування РН у народному господарстві (у різних галузях промисловості та сільському господарстві) і в побуті;

уранова і радіохімічна промисловість, підприємства ядерної енергетики;

ядерні вибухи при випробуваннях ядерної зброї (ЯЗ);

застосування РН у медицині.

Застосування РН у народному господарстві й побуті. Про те, наскільки глибоко в побут людини ввійшла радіація, свідчать такі фактори:

для одержання стійкої фарби на банкнотах застосовується вуглець-14;

для одержання гарної жовтої емалі на кераміці або коштовних прикрасах застосовують уран;

для додання блиску штучним фарфоровим зубам широко використовують уран і цезій. Вони можуть бути джерелами опромінення тканин порожнини рота, тому рекомендують припинити їх застосування;

уран і торій використовуються при виробництві оптичного скла, керамічного і скляного посуду;

при виробництві люмінофорів використовуються радіоактивні матеріали;

солі радію використовують при виготовленні фарб, які мають властивість світитися, такі фарби наносять на циферблати і стрілки годинників, застосовують у прицільних пристроях, у театрі, рекламі тощо.

Найбільш поширеним побутовим опромінювачем є годинники із циферблатом, що світиться. Вони дають річну дозу, яка перевищує в 4 рази ту, що виникає внаслідок викидів на АЕС. Сьогодні вживаються заходи щодо заміни радію іншими речовинами, щоб значно знизити опромінення в різних показниках, компасах, прицілах, багатьох інших приладах, що світяться;

джерелом рентгенівського випромінювання є кольоровий телевізор з електронно-променевою трубкою. Так, при перегляді одного хокейного матчу людина одержує опромінення 0,01 мЗв. Якщо дивитися передачі протягом року щоденно по 3 години – 0,05 мЗв;

рентгенівські апарати використовуються в аеропортах для перевірки багажу пасажирів;

при польоті на висоті 12 км за 7 год 25 хв (Нью-Йорк–Париж) пасажир одержує дозу 0,05 мЗв, таку ж дозу пасажир одержує під час польоту Київ–Хабаровськ (0,04...0,05 мЗв). Льотчики та інші члени екіпажів реактивних лайнерів, які здійснюють регулярні перельоти через Атлантику або через континент, можуть накопичувати дозу опромінення понад 5 мЗв. Тому для них складається спеціальний розклад польотів; пожежні димові детектори містять радій або плутоній. У США до кінця 1980 р. було встановлено більше 26 млн таких детекторів;

підвищену радіоактивність мають фосфорні добрива, які містять, наприклад, радію та урану до 70 Бк/кг у кольському апатиті й 400 Бк/кг у фосфориті, які часто є носіями радіоактивного забруднення ґрунтів і ґрунтових вод. Радіоактивними є також азотні та калієві мінеральні добрива.

У промисловості за допомогою РН здійснюється контроль якості виробів за допомогою приладу дефектоскопії, контроль технологічних процесів, визначення структури сплавів, розмірів деталей, перевірка зварних з'єднань і дефектів у відлитих деталях. Радіоактивні джерела застосовують у вимірювальній техніці, каротажі свердловин, контролі подачі сировини і рівня заповнення ємностей, для калібрування і роботи контрольно-вимірювальних приладів. Використання іонізуючих властивостей РР знаходить застосування в блокувальних пристроях. Джерело слабого випромінювання надягають як браслет або кільце на руку робітника. Коли рука наближається до небезпечної зони, випромінювання впливає

Тема: "ДЖЕРЕЛА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ"

на датчик, перетворюючи його в електричний сигнал, який подається на тиратрон і реле, що розриває ланцюг магнітного пускача, і обладнання зупиняється.

Використання РН як так званих мічених атомів дозволило вивчити нові закономірності та зробити важливі відкриття в біології, хімії металургії та інших галузях народного господарства.

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

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

У 1978 році розвалився на частини радянський супутник "Космос-954". Залишки супутника з плутонієвим генератором були знайдені в північно-східних районах Канади.

Внаслідок згорання вугілля в ТЕС або в житлових будинках відбувається радіоактивне забруднення навколишнього середовища. У вугіллі містяться природні РН (калій-40, уран-238, торій-232) в рівновазі з їх продуктами розпаду. При згоранні вугілля відбувається концентрація РН у золі. Викид цих РН в атмосферу залежить від зольності вугілля та ефективності очисних фільтрів ТЕС. Фахівцями підраховано, що радіоактивні викиди ТЕС на порівнянних відстанях на 1–3 порядки більші від нормально працюючої АЕС.

Вважається, що населення, яке проживає в районі ТЕС (у радіусі 20 км), одержує за рік додаткову середню індивідуальну дозу опромінення до 0,06 мЗв.

Іонізуюче випромінювання знайшло широке застосування в сільському господарстві. На цей час склалися такі напрямки використання РР:

1. Для одержання мутацій і використання їх у селекційній роботі для виведення нових сортів у рослинництві. Цей метод дозволяє значно скоротити час виведення конкретних сортів.

2. Для підвищення продуктивності сільськогосподарських рослин шляхом передпосівного опромінення насіння. Картопля, вирощена

з опромінених коренеплодів, містить більше крохмалю, білків і вітаміну С, ніж контрольні коренеплоди.

3. Для подовження термінів зберігання продукції рослинництва без істотної зміни її якості. Велике значення має гамма-опромінення ягід і фруктів, що швидко псуються. Це знижує їх зараженість мікроорганізмами, пліснявими спорами і под.

4. Використання методу радіоактивних індикаторів, який дозволяє вивчити ефективність різних термінів і методів внесення в ґрунт добрива.

5. Використання для боротьби з кошами-шкідниками зерна, борошна, крупи. Якщо зерно перед завантаженням в елеватор пропустити через бункер з потужним джерелом гамма-випромінювання (^{60}Co), то можливе розмноження комірного кліща виключається і зерно може зберігатися тривалий час без будь-яких втрат.

6. Застосування радіаційних технологій у тваринництві та ветеринарії. Великі дози ІВ згубно діють на мікрофлору. Це використовується при консервації тваринницької продукції (досягається практично повна стерилізація продукції).

Радіоактивне випромінювання при випробуванні ядерної зброї

Випробування ЯЗ в атмосфері були розпочаті США у 1945 році. Найбільший розмах випробувань і викид радіоактивних продуктів в атмосферу мали місце в період 1954–1958 років, коли ядерні вибухи проводили Англія, США і СРСР, і в 1961–1962 роках, коли ядерні вибухи в основному проводили СРСР і США.

За даними ООН з 1945 по 1980 рік проведено 423 вибухи із сумарною потужністю 545,0 Мт.

У 1963 році США, СРСР і Великобританія підписали договір про припинення експериментальних ядерних вибухів в атмосфері, космічному просторі та під водою. Франція відмовилася приєднатися до цього договору і продовжувала випробування в атмосфері до 1974 року, а КНР – до 1980 року. Підземні випробування тривали до 1996 року.

Ядерну зброю випробовували на полігонах: у Моралію (Австралія), Семіпалатинську (СРСР), штаті Невада біля Лас-Вегаса, на атолі Муруроа (французька Полінезія) і в китайській провінції Сичуань.

З точки зору безпеки забруднення біосфери продуктами ядерних вибухів найбільш важливе значення мають наземні вибухи. У цьому випадку вогняна куля, що утворюється при ядерних вибухах, торкається

Тема: "ДЖЕРЕЛА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ"

поверхні Землі та величезні маси ґрунту випаровуються і втягуються у вогняну кулю. Достатньо сказати, що при наземному ядерному вибуху потужністю 20 кт на місцевості із супіщаним ґрунтом утворюється вирва діаметром 81 м і глибиною 19 м. Залежно від потужності ядерного вибуху і характеру ґрунту загальний викид ґрунту при наземному вибуху потужністю 1 кт складає приблизно 5000 т, а при потужності 20 кт – 20 000 т.

У результаті випробування ЯЗ до 1963 року в стратосфері (8...55 км) піднято більше 200 млн т радіоактивного пилу, який випадав по всій земній кулі протягом кількох років.

За даними наукового комітету ООН, при випробуваннях ЯЗ, які проводилися до 1963 року, інтегральне випадання (МКі) РН на суші та водній поверхні склало: ^3H – 3560; ^{14}C – 6,2; ^{55}Fe – 50; ^{90}Sr – 12,2; ^{106}Ru – 330; ^{144}Ce – 1824; ^{137}Cs – 19,5; ^{239}Pu – 0,32. Радіоекологічні наслідки випробувань ЯЗ в атмосфері слід розглядати як у просторі, так і в часі. Що стосується розподілу забруднення в просторі, то тут визначальну роль відіграли два фактори: розташування дослідних полігонів і розподіл повітряних мас в атмосфері й стратосфері, який зумовив нерівномірність випадання частинок на земній поверхні.

У 1963 році колективна середньорічна доза від РН, що утворилися в результаті ядерних випробувань, складала близько 7 % дози опромінення від природних джерел, у 1966 році вона зменшилася до 2 %, а до кінця 1980-х років складала 1 %.

Оскільки тепер глобальні випадання зі стратосфери переважно визначаються довготривалими продуктами поділу ^{90}Sr , ^{137}Cs і ^{14}C , то можна вважати, що кожний житель Землі за рахунок ядерних випробувань одержує річну дозу порядку 0,02 мЗв.

Радіоактивне опромінення від викидів уранової, радіохімічної промисловості та підприємств ядерної енергетики

Для забезпечення роботи АЕС необхідне добування уранової руди, подрібнення й видобування з неї урану, переробка його в збагачене ядерне паливо, виготовлення паливних елементів (ТВЕЛів) і використання їх у ядерних реакторах, переробка і поховання радіоактивних відходів.

Зазначені стадії входять у так званий ядерний паливний цикл (ЯПЦ). До них додається також транспортування радіоактивних матеріалів для забезпечення всіх цих стадій.

Уранова промисловість займається видобуванням, переробкою, збагаченням урану і виробництвом ядерного пального.

Радіохімічна промисловість займається переробкою ядерного пального. Відпрацьовані ТВЕЛі надходять на підприємство регенерації, де відбувається виділення урану і плутонію, а також продуктів поділу урану, які далі можуть бути використані як джерела випромінювання.

На кожному із цих етапів можливе забруднення навколишнього середовища.

Основна стадія ЯПЦ – виробництво енергії АЕС. Ця ланка значно виділяється у всьому циклі з точки зору проблем забезпечення радіаційної безпеки населення.

У результаті роботи АЕС утворюються радіоактивні відходи трьох типів: газоаерозольні, рідкі й тверді. У навколишнє середовище викидаються (після проходження систем очистки) тільки газоподібні й частково аерозольні та рідкі відходи. Тверді відходи зберігаються на майданчику АЕС, а далі відправляються на поховання.

Значний внесок у забруднення біосфери вносять довгоживучі РН: вуглець-14, криптон-85, тритій-3 і йод-129, що містяться в газоаерозольних викидах.

Навіть населення, яке проживає в зоні 1...10 км від АЕС, одержить ефективні дози у 1000 разів більші, ніж за рахунок природного радіаційного фону, тому середню ефективну дозу опромінення при нормально працюючій АЕС можна прийняти такою, що дорівнює 0,001 мЗв/рік.

Радіоактивне опромінення при медичних обстеженнях і радіотерапії. Використання ІВ і РР у медицині для діагностики і радіотерапії – це основне джерело штучного опромінення людей, що перевищує вплив усіх інших штучних джерел. Ці дози створюються при рентгенівській діагностиці людей, діагностиці стану окремих органів (легенів, печінки, нирок, щитовидної залози та ін.) за допомогою радіоактивних препаратів, які вводяться всередину організму, а також радіаційної терапії з використанням радіоактивних джерел. Доза опромінення при застосуванні радіофармацевтичних препаратів, як і при ізотопній діагностиці, може змінюватися в широких межах залежно від фізико-хімічних і біологічних властивостей РН, хімічної сполуки препарату, способу його введення в організм та ін. (Співвідношення між одиницями виміру активності дози і потужності дози в СІ та позасистемними одиницями наведені в табл. 1.2).

Індивідуальна доза на окремий критичний орган вимірюється десятками мілізівертів, в окремих випадках досягаючи навіть сотні

Тема: "ДЖЕРЕЛА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ"

мілізівертів за одну процедуру. За даними наукового комітету СОН, ефективна еквівалентна доза від найбільш часто використовуюваного ядерною медициною з метою діагностики РН технецію-99 знаходиться у межах $1 \dots 10$ мЗв.

При рентгенографії пальців людина одержує місцеве разове опромінення $0,6$ мЗв; черепа $8 \dots 60$ мЗв; зубів $30 \dots 50$ мЗв; хребта $16 \dots 147$ мЗв; при рентгеноскопії грудної клітки $47 \dots 195$ мЗв; при рентгеноскопії шлунка до 300 мЗв; при флюорографії легень $2 \dots 5$ мЗв.

Персонал і хворі курортів, де лікують радоновими ваннами, одержують дозу опромінення порядку 300 мЗв/рік, що в шість разів перевищує встановлені міжнародні норми.

Таблиця 1.2. Співвідношення між одиницями виміру активності дози і потужності дози в СІ та позасистемними одиницями

Вимірювана величина	Позасистемна одиниця	Одиниця СІ	Співвідношення між одиницями
Активність	Кюрі (Ки)	Беккерель (Бк)	$1 \text{ Бк} = 1 \text{ розпад} \cdot \text{с}^{-1}$; $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$; $1 \text{ Бк} = 2,703 \cdot 10^{11} \text{ Ки}$
Поглинута доза	Рад (рад)	Грєй (Гр)	$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} = 10^4 \text{ ерг} \cdot \text{г}^{-1}$; $1 \text{ рад} = 100 \text{ ерг} \cdot \text{г}^{-1} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр}$; $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$
Потужність поглинутої дози	Рад за секунду (рад $\cdot \text{с}^{-1}$)	Грєй за секунду (Гр $\cdot \text{с}^{-1}$)	$1 \text{ Гр} \cdot \text{с}^{-1} = 100 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$; $1 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр} \cdot \text{с}^{-1}$
Еквівалентна доза	Біологічний еквівалент рада (бер)	Зіверт (Зв)	$1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$; $1 \text{ бер} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}$; $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бер}$
Потужність еквівалентної дози	Бер за секунду (бер $\cdot \text{с}^{-1}$)	Зіверт за секунду (Зв $\cdot \text{с}^{-1}$)	$1 \text{ Зв} \cdot \text{г}^{-1} = 100 \text{ бер} \cdot \text{с}^{-1}$; $1 \text{ бер} \cdot \text{с}^{-1} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Зв} \cdot \text{с}^{-1}$
Експозиційна доза	Рентген (Р)	Кулон на кілограм (Кл $\cdot \text{кг}^{-1}$)	$1 \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1} = 3,9 \cdot 10^3 \text{ Р}$; $1 \text{ Р} = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$
Потужність експозиційної дози	Рентген за секунду (Р $\cdot \text{с}^{-1}$)	Кулон на кілограм за секунду (Кл $\cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$)	$1 \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1} = 3,9 \cdot 10^3 \text{ Р}$; $1 \text{ Р} \cdot \text{с}^{-1} = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$

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

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

Таким чином, у сучасних умовах за наявності високого природного радіаційного фону, при діючих технологічних процесах, при використанні радіоактивних препаратів у медичних цілях кожний житель України щорічно одержує ефективну еквівалентну дозу в середньому 4,75 мЗв (космічне випромінювання 0,5 мЗв, природні натуральні джерела 2,25 мЗв, штучні джерела 0,2 мЗв, медичні джерела 1,8 мЗв).

Індивідуальні річні дози опромінення можуть змінюватися в досить широких межах.

Лекція 2

Тема: "ВИДИ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ДОЗИ. СИСТЕМНІ ТА ПОЗАСИСТЕМНІ ОДИНИЦІ ВИМІРУ ДОЗ"

План

- 1. Корпускулярне та фотонне іонізуюче випромінювання.*
- 2. Поняття радіоактивності.*
- 3. Альфа-, бета-, гамма- та нейтронне випромінювання.*
- 4. Основні характеристики іонізуючого випромінювання.*
- 5. Одиниці виміру енергії іонізуючого випромінювання.*

Іонізуюче випромінювання – потоки електромагнітних хвиль або частинок речовини, що здатні при взаємодії з речовиною утворювати в ній позитивні та негативні іони.

Поняття "іонізуюче випромінювання" об'єднує різні за своєю фізичною природою види випромінювання. Подібність між ними полягає в тому, що всі вони характеризуються високою енергією, реалізують свою біологічну дію через ефекти іонізації, що в біологічних структурах призводить до загибелі клітин.

Таке випромінювання не сприймається органами чуття людини: ми не бачимо його, не чуємо і не відчуваємо впливу на наш організм.

Фотонне і корпускулярне випромінювання. Усі види ІВ можна розділити на дві групи: корпускулярне і фотонне (електромагнітне).

Корпускулярне ІВ – це потік частинок з масою спокою, відмінною від нуля, які утворюються при радіоактивному розпаді або ядерних перетвореннях. До нього належать альфа- і бета-частинки, нейтрони, електрони, протони, мезони та ін.

Корпускулярне випромінювання, яке складається з потоків заряджених частинок (альфа-, бета-частинок, протонів, електронів), належить до класу безпосередньо ІВ.

Корпускулярне випромінювання, що являє собою потоки незаряджених частинок (нейтрони й інші елементарні частинки), називають непрямым ІВ

Фотонне ІВ – це короткохвильова ділянка електромагнітного випромінювання, до якого належать рентгенівське і гамма-випромінювання, а також хвильова компонента космічного випромінювання.

Радіоізотопи (радіонукліди). Відомо, що в природі існують елементи, атоми яких, маючи однакові хімічні властивості, відрізняються масою. Наприклад, є три види водню: звичайний водень з масовим числом 1 – ${}^1_1\text{H}$ (протій), водень з масовим числом 2 – ${}^2_1\text{H}$ (дейтерій) і водень з масовим числом 3 – ${}^3_1\text{H}$ (трій).

Атом – найдрібніша частинка хімічного елемента, яка зберігає всі його властивості. Він складається з позитивно зарядженого ядра, що знаходиться в центрі атома, і негативно заряджених електронів, які обертаються навколо ядра на різних орбітах. Якщо негативний заряд електронів дорівнює позитивному заряду ядра, атом стає електрично нейтральним.

Атомне ядро складається з протонів і нейтронів, які називають нуклонами (від латин. *nucleus* – ядро).

Кількість протонів (електронів) визначає хімічні властивості елементів, а нейтронів – впливає тільки на масу атома. Отже, можуть бути елементи, однакові за своїми хімічними властивостями, але різні за атомною масою.

Атоми, що мають ядра з однаковою кількістю протонів, але розрізняються за кількістю нейтронів, є різновидами одного й того ж хімічного елемента і називаються його ізотопами (нуклідами) (грец. *isos* – однаковий, *topos* – місце).

Такі елементи мають однаковий номер у таблиці Менделєєва, але різне масове число.

Для позначення ізоотопу прийнята спеціальна символіка. Цифра внизу позначає атомний номер (він дорівнює кількості протонів у ядрі або електронів на оболонці), цифра зверху показує величину атомної маси, тобто суму протонів і нейтронів.

В ядрі атом урану ${}^{238}_{92}\text{U}$ містить 92 протони і 146 нейтронів. Більшість (71 з 90 природних елементів) являє собою суміш 2...10 ізоотопів.

За фізичними властивостями всі нукліди поділяються на дві групи: стійкі (стабільні) і нестійкі (радіоактивні). Найважливіша властивість нестійких нуклідів – це внутрішньоядерні перетворення, внаслідок яких відбувається спонтанне випромінювання частинок і променів, що іонізують навколишнє середовище.

Радіоактивність. Між елементами, що входять до складу ядра, діють ядерні сили притягання, які проявляються на дуже малих відстанях (до 10^{-15} м). Крім ядерних сил притягання між однойменно зарядженими частинками ядра – протонами – діють кулонівські сили відштовхування.

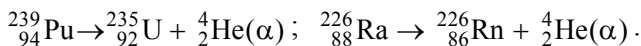
У важких елементів, ядра яких складаються з великої кількості частинок, ядерні сили притягання вже не спроможні компенсувати кулонівські сили відштовхування. У цьому разі починається внутрішня перебудова ядер і спонтанний перехід ядер від менш стійкого стану до більш стійкого. Це явище одержало назву радіоактивності.

Радіоактивність – це здатність ядер деяких хімічних елементів спонтанно перетворюватися в ядра інших хімічних елементів з виділенням енергії у вигляді іонізуючого випромінювання.

Альфа- (α -), бета- (β -) гамма- (γ -) і нейтронне (n°) випромінювання. Основними видами випромінювання, що виникають при розпаді різних нуклідів, є α -, β -, γ -, n° -випромінювання. *Альфа-випромінювання* являє собою потік позитивно заряджених частинок, що мають масове число 4 і заряд, який дорівнює 2. За своєю фізичною природою це ядра атома гелію. Тепер відомо близько 40 природних і понад 200 штучних α -активних ядер, тобто ядер, здатних до α -розпаду.

Альфа-розпад характерний для важких елементів (урану, торію, плутонію та ін.).

Унаслідок альфа-розпаду початкове ядро перетворюється в нове ядро з атомним номером на 2 одиниці та масовим числом на 4 одиниці менше початкового:



Проникна здатність альфа-частинок невелика. Довжина пробігу (при енергії 4 MeV) у повітрі складає 2,5 см, у біологічній тканині – 0,003 мм, в алюмінію – 0,01 мм. При зовнішньому опроміненні значної небезпеки для людини вони не становлять. Однак небезпека ця стає великою в разі проникнення альфа-частинок всередину організму. Пов'язано це з тим, що частинки мають високу густину іонізації.

Бета-випромінювання являє собою негативну або позитивну заряджені частинки (потік електронів або позитронів). Вони у 7300 разів легші за альфа-частинки і мають проникну здатність значно вищу, ніж альфа-частинки. Довжина пробігу в повітрі (при енергії 4 MeV) складає 17,8 м,

у воді – до 2,6 мм, у м'якій тканині – до 2 см, в алюмінію – 9,8 мм. Однак густина іонізації значно менша.

При електронному бета-розпаді відбувається перетворення нейтрона в протон, заряд ядра і його порядковий номер збільшуються на одиницю.

При позитронному бета-розпаді відбувається перетворення протона в нейтрон, який супроводжується утворенням і викиданням з ядра позитрона, заряд ядра і його порядковий номер зменшуються на одиницю.

Нейтронне випромінювання – потік нейтральних частинок, що не несуть електричних зарядів, проникна здатність яких дуже висока, вони можуть вільно проникати через тіло людини і більш щільне середовище. У повітрі довжина пробігу досягає декількох сотень метрів.

Нейтрони взаємодіють тільки з ядрами атомів речовини, унаслідок чого атоми окремих елементів перетворюються в нестабільні, тобто в радіоактивні. Іншими словами, нейтрони самі по собі не викликають іонізації, але, вибиваючи атоми з їх стабільних станів, створюють наведену радіоактивність у матеріалах і тканинах, крізь які проходять.

Гамма- і рентгенівське випромінювання – це потоки електромагнітних хвиль. У спектрі електромагнітних коливань вони розташовуються за ультрафіолетовими променями.

Чим менша довжина хвилі, тим вища енергія випромінювання і більша його проникна здатність (рис. 2.1).

Рентгенівські промені можна розглядати як гамма-промені низьких енергій, які не виходять з радіоактивного атома, їх одержують штучно.

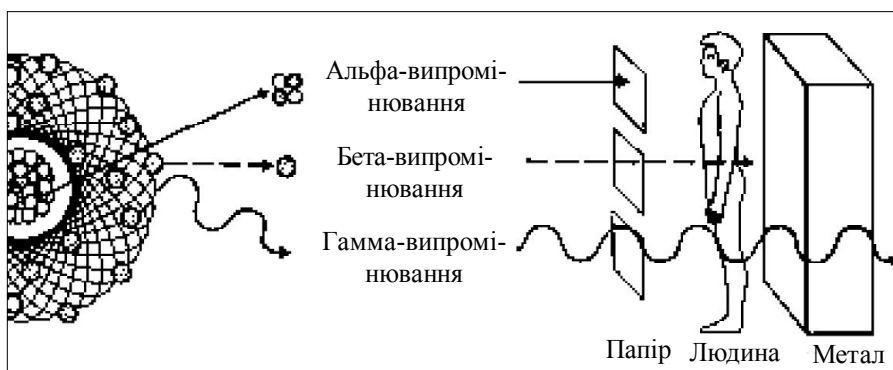


Рис. 2.1. Проникна здатність альфа-, бета- та гамма-випромінювання

Тема: "ВИДИ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ДОЗИ. СИСТЕМНІ ТА ..."

Вважається, що електромагнітні коливання випромінюються у вигляді згустка енергії – квантів. Якщо енергія квантів видимого світла вимірюється 2...3 еВ, а ультрафіолетового випромінювання 3...6 еВ, то кванти радіації переносять її в сотні тисяч і мільйони разів більше.

Джерелами гамма-випромінювання є ядерні реакції і розпад багатьох РР.

Джерелами рентгенівського випромінювання є різні апарати і прилади, що використовуються в медицині та для інших цілей (апаратура зв'язку, яка потребує великої напруги), а також Сонце.

Кожний прилад, у якому електрони прискорюються напругою більше 5 кВ, слід розглядати як можливе джерело невикористаного рентгенівського випромінювання.

Рентгенівське і гамма-випромінювання з однаковою довжиною хвилі, крім способу одержання, за характером впливу на живий організм нічим одне від одного не відрізняються.

Іонізуюче випромінювання має ряд спільних ознак. За характером впливу на об'єкти навколишнього середовища найбільш цікавими є дві з них: здатність проникати через різні товщі матеріалів (проникна здатність) і здатність іонізувати атоми і молекули речовини, в якій вони поширюються (іонізуюча здатність) (табл. 2.1).

Таблиця 2.1. Характеристика іонізуючого випромінювання

Вид випромінювання	Енергія, МеВ	Швидкість, км/с	Іонізуюча здатність (пара іонів на 1 см шляху)	Довжина пробігу, м	
				у повітрі	у біологічній тканині
α-частинки	4,0...10,0	10 000...20 000	30 000	<0,1	<0,0001
β-частинки	0,1...4,0	200 000... ...< 300 000	100	<5	<0,02
γ-промені	1,0...10,0	300 000	10...25	4000	На всю глибину
Нейтрони	0,1...10,0	20 000	10...25	4000	

За даними таблиці проникна та іонізуюча здатність різних видів радіоактивного випромінювання неоднакова. Чим більша маса частинок, тим більша їх іонізуюча здатність і тим менша довжина пробігу в навколишньому середовищі, тобто менша проникна здатність.

Отже, альфа-частинки мають найбільшу іонізуючу і найменшу проникну здатність, а гамма-промені, нейтрони мають найбільшу проникну і найменшу іонізуючу здатність.

Одиниці виміру енергії іонізуючого випромінювання

У результаті взаємодії випромінювання з біологічним середовищем живому організму передається певна величина енергії.

Для вимірювання кількості поглинутої енергії введено поняття "доза випромінювання". Розрізняють декілька видів доз випромінювання.

Поглинута доза – основна фізична величина, прийнята для оцінки впливу ІВ на об'єкти живої і неживої природи; характеризує енергію будь-якого виду випромінювання, поглинутого одиницею маси опроміненого середовища.

За одиницю поглинутої дози в системі СІ прийнято *грей* (Гр). Це така доза, за якої 1 кг опроміненої речовини поглинає енергію в 1 джоуль, $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$. Позасистемною одиницею є *рад* – така поглинута доза, при якій 1 г речовини поглинає енергію в 100 ергів незалежно від виду енергії випромінювання:

$$1 \text{ рад} = 100 \text{ ерг} \cdot \text{г}^{-1}; 1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}.$$

Експозиційна доза характеризує іонізуючу здатність фотонного випромінювання в повітрі (гамма- і рентгенівського випромінювання).

За одиницю експозиційної дози в системі СІ прийнято *кулон на кілограм* ($\text{Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$). Це така доза рентгенівського і гамма-випромінювання, при якій в 1 кг сухого атмосферного повітря утворюються іони, що несуть позитивний чи негативний електричний заряд, який дорівнює 1 кулону.

Позасистемною одиницею є *рентген* (Р). Це така доза рентгенівського і гамма-випромінювання, яка зумовлює виникнення в 1 см^3 сухого атмосферного повітря за нормальних умов ($t = 0^\circ \text{C}$ і $P = 101,3 \text{ кПа}$) 2,08 мільярда пар іонів:

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10 \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Відомо, що на утворення однієї пари іонів у повітрі витрачається в середньому 34 еВ, отже, при дозі в 1 Р енергія складає

$$E = 2,08 \cdot 10^9 \cdot 34 = 7,07 \cdot 10^{10} \text{ еВ}.$$

Оскільки $1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ ерг}$,

$$E = 7,07 \cdot 10^{10} \cdot 1,6 \cdot 10^{-12} = 0,113 \text{ ерг} \cdot \text{см}^{-3}.$$

Тема: "ВИДИ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ДОЗИ. СИСТЕМНІ ТА..."

Оскільки $1 \text{ см}^3 = 0,001293 \text{ г}$, то для одержання експозиційної дози в 1Р необхідно витратити енергію

$$E = 0,113 / 0,001293 = 87,7 \text{ ерг} \cdot \text{г}^{-1}.$$

Величини $0,113 \text{ ерг} \cdot \text{см}^{-3}$ і $87,7 \text{ ерг} \cdot \text{г}^{-1}$ називаються енергетичними еквівалентами рентгена, тобто $1 \text{ Р} = 87,7 \text{ ерг} \cdot \text{г}^{-1}$. Між поглинутою та експозиційною дозами також існують співвідношення:

$$\text{для повітря} - D_{\text{експ}} [\text{Р}] = 0,877 D_{\text{погл}} [\text{рад}],$$

$$D_{\text{погл}} [\text{рад}] = 1,14 D_{\text{експ}} [\text{Р}];$$

$$\text{для біологічної тканини} - D_{\text{експ}} [\text{Р}] = 0,93 D_{\text{погл}} [\text{рад}],$$

$$D_{\text{погл}} [\text{рад}] = 1,07 D_{\text{експ}} [\text{Р}].$$

Тому з високою точністю (похибка не більше 7 %) числові значення експозиційної дози в рентгенах і поглинутої дози в тканині (тілі людини) у радах можна вважати подібними, тобто про уражальну дію ІВ на живі тканини організму свідчить ефект іонізації повітря гамма-випромінюванням.

Детальні дослідження біологічних ефектів, які викликаються різними видами ІВ, показали, що ушкодження тканини пов'язане не тільки з кількістю поглиненої енергії, але і з її просторовим розподілом. Чим вища лінійна густина іонізації (кількість пар іонів, які утворюються випромінюванням на одиницю довжини шляху в середовищі), тим більший ступінь біологічного ушкодження. Для порівняння різних видів ІВ за їх біологічною дією введено поняття відносної біологічної ефективності (ВБЕ). Вона може бути охарактеризована за допомогою коефіцієнта якості випромінювання Q (для малих рівнів опромінення), який показує, у скільки разів ефективність біологічного впливу даного виду випромінювання більша за ефективність біологічного впливу гамма-випромінювання при однаковій поглинутій дозі.

Щоб урахувати цей ефект, уведено поняття еквівалентної дози.

Поняття "еквівалентна доза" використовується для визначення рівня радіаційної небезпеки при тривалому опроміненні людини в малих дозах. Вона визначається як добуток поглиненої дози даного виду випромінювання на коефіцієнт якості ІВ. У системі СІ за одиницю еквівалентної дози прийнято *зіверт* (Зв). Зіверт дорівнює еквівалентній дозі випромінювання будь-якого виду, яке створює такий же біологічний ефект,

як і поглинена доза в 1 Гр рентгенівського або гамма-випромінювання. Отже, $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр} \cdot Q^{-1}$.

Позасистемною одиницею еквівалентної дози є *бер* – біологічний еквівалент рада. Один бер – це поглинена доза будь-якого виду випромінювання, яка викликає той же біологічний ефект, що і один рад гамма-випромінювання, тобто $1 \text{ бер} = 1 \text{ рад} \cdot Q^{-1}$; $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бер}$.

Дози опромінення різних ділянок тіла або органів можуть бути неоднаковими, особливо при внутрішньому опроміненні. Це пояснюється тим, що різні органи мають свою чутливість до опромінення. Для оцінки нерівномірного опромінювання тіла користуються поняттям ефективної еквівалентної дози $D_{\text{ЕЕД}}$.

Ефективна еквівалентна доза (ЕЕД) – сума середніх еквівалентних доз $D_{\text{ЕД}}$:

$$D_{\text{ЕЕД}} = \sum W_T \cdot D_{\text{ЕД}},$$

де коефіцієнти порівняння для різних органів W_T , які дозволяють вирівнювати ризик наслідків опромінення незалежно від того, рівномірно чи нерівномірно опромінюється тіло. Ці коефіцієнти характеризують відношення ризику опромінення даного органа до сумарного ризику при рівномірному опроміненні всього тіла (табл. 2.2).

Таблиця 2.2. Значення коефіцієнтів W_T для різних органів і тканин організму людини

Орган і тканина	W_T	Орган і тканина	W_T
Гонади	0,20	Печінка	0,05
Червоний кістковий мозок	0,12	Стравохід	0,05
Товста кишка	0,12	Щитовидна залоза	0,05
Легені	0,12	Шкіра	0,01
Шлунок	0,12	Кісткова тканина	0,01
Сечовий міхур	0,05	Інші органи	0,05
Молочна залоза	0,05	Весь організм	1,00

Наприклад, доза опромінення щитовидної залози в 100 бер відповідає ЕЕД = 5 бер, тобто приймається, що при рівномірному опроміненні всього тіла дозою 5 бер імовірність ушкодження організму така сама, як і при опроміненні дозою 100 бер лише щитовидної залози.

При широкому використанні атомної енергії значний контингент людей може зазнавати впливу ІВ, тоді для оцінки використовується колективна еквівалентна доза $D_{\text{КЕД}}$.

Тема: "ВИДИ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ДОЗИ. СИСТЕМНІ ТА ..."

Колективна еквівалентна доза – сума індивідуальних доз даного контингенту людей за даний проміжок часу.

Одиницею колективної дози є *люд. · бер.*

Потужність дози P (поглинутої, експозиційної, еквівалентної) характеризує ступінь зараження місцевості РР і являє собою приріст дози за одиницю часу. Якщо за якийсь проміжок часу Δt приріст дози дорівнює ΔD , то середнє значення потужності дози

$$P = \Delta D / \Delta t.$$

Згідно із законом зміни потужності дози з часом $P(t)$ доза за час t визначається за формулою

$$D = \int_0^t P(t) dt.$$

Іншими словами, потужність дози (рівень радіації) показує, яку дозу може одержати людина за одиницю часу, перебуваючи на зараженій території.

Одиниці виміру потужності дози є частками від ділення одиниць вимірювання доз на одиниці часу (рад · год⁻¹, бер · год⁻¹, Р · год⁻¹).

Потужність експозиційної дози гамма-випромінювання можна визначити за таким виразом:

$$P = \frac{K_{\gamma} \cdot A}{R^2} \text{ Р/год},$$

де A – активність джерела випромінювання, мКі; R – відстань до джерела випромінювання, см; K_{γ} – іонізаційна гамма-стала, характеризує даний радіонуклід, Р · см²/год · мКі (значення K_{γ} наведені в довіднику з радіаційної безпеки [16]).

Лекція 3

Тема: "ДІЯ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ"

План

- 1. Особливості впливу ІВ на живі організми.*
- 2. Вільнорадикальний процес та перокисне окиснення ліпідів.*
- 3. Чотири ступені гострої променевої хвороби.*
- 4. Внутрішнє та зовнішнє опромінення.*

Про небезпечність ІВ стало відомо практично відразу ж після відкриття радіоактивності. До початку ХХ ст. вже було описано більше 70 випадків радіаційних шкірних опіків (еритеми). Зі зростанням термінів спостереження за персоналом з променевими опіками було виявлено, що навіть припинення роботи з ІВ не зупиняє переродження тканини, яке завершується через 6–30 років утворенням злоякісної пухлини і смертю.

Стало відомо, що переопромінення людей можливе також унаслідок попадання мінімальної кількості ІВ усередину організму.

Усі види ІВ надто руйнівні діють на живий організм. При вивченні дії ІВ на організм були виявлені такі особливості:

1. Радіація не має смаку і запаху, її не можна побачити і почути. Тому вплив ІВ на організм людина не відчуває. У людей відсутні органи чуття, які б сприймали ІВ. Тому людина може проковтнути, вдихнути РР без будь-яких первинних відчуттів.

2. Наявність прихованого (інкубаційного) періоду виявлення дії ІВ.

Видиме ураження шкірного покриву, нездужання, характерне для променевого захворювання, виявляються не відразу, а через деякий час. Цей період називається періодом гаданого благополуччя, він може тривати досить довго при опроміненні в малих дозах. Тривалість його скорочується зі збільшенням дози опромінення.

3. При систематичному попаданні в організм людини РР відбувається накопичення малих доз, що призводить до променевої хвороби. Цей ефект називається кумуляцією.

Тема: "ДІЯ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ"

4. Іонізуюче випромінювання на організм людини може впливати як безпосередньо – соматичне ураження (від грец. some – тіло), так і виявлятися у нащадків. Цей ефект називається генетичним.

5. Різні органи живого організму мають свою чутливість до опромінення. Тому нормами радіаційної безпеки установлені три групи критичних органів тіла людини. При щоденному впливі дози $(0,2 \dots 0,5) \cdot 10^{-2}$ Зв можуть відбутися зміни в крові.

6. Радіоактивні речовини, потрапляючи до організму людини, відкладаються вибірково в органах і частинах тіла. Залежно від розподілу в тканинах організму виділяють такі РН:

ті, що розподіляються рівномірно – тритій, вуглець, залізо, полоній, інертні благородні гази;

ті, що накопичуються в кістках – стронцій, кальцій, барій, радій, ітрій, цирконій, плутоній, торій, фосфор, вуглець;

ті, що залишаються в м'язовій тканині – цезій, радій, рубідій, кобальт;

ті, що відкладаються в шлунково-кишковому тракті – калій, натрій, тритій, полоній;

ті, що відкладаються в нирках – рутеній, плутоній;

ті, що відкладаються в селезінці та лімфатичних вузлах – рутеній, ніобій.

Радіонуклід йоду в щитовидній залозі концентрується в 100...200 разів більше, ніж в інших тканинах і органах.

7. Наслідки опромінення однаковими дозами для різних живих організмів неоднакові, тобто видова радіочутливість живих організмів різна. Чим більш примітивна будова організму, тим більшу стійкість до впливу ІВ він має.

Так, значення напівлетальної дози LD_{50} (30), від якої протягом 30 діб гине 50 % людей, що зазнали одноразового опромінення, складає близько 3...5 Зв.

Напівлетальні дози LD_{50} (30) для різних живих істот, Зв, наведені нижче:

Дрозофіли – 600	Кролі – 8	Мавпи – 5,5
Равлики – 100	Щури – 7,5	Собаки – 3,5
Черепахи – 15	Хом'яки – 7	Свині – 2,5
Кури – 10	Жаби – 7	Кози – 2,5
Горобці – 8	Миші – 6	

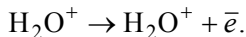
Бактерії, знайдені у воді, що омиває ядерний реактор у Лос-Анджелесі, при дозі 10 тис. Зв не тільки не гинуть, а продовжують розмножуватися, живлячись смолою іонообмінних фільтрів.

8. Ефект опромінення залежить не тільки від дози випромінювання, але й від часу, протягом якого одержана ця доза. Виявлено, що для біологічних клітин, які містять O_2 , тривале опромінення малими дозами більш небезпечне, ніж короточасне великими дозами (до певного рівня).

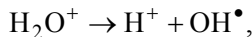
У чому полягає руйнівна дія радіації? Установлено, що дія радіації відбувається на атомному або молекулярному рівні незалежно від того, отримуємо зовнішнє опромінення чи внутрішнє через воду та їжу.

Іонізуюче випромінювання, діючи на живий організм, викликає у ньому ланцюжок зворотних і незворотних змін, які призводять до тих чи інших біологічних наслідків. Наслідки залежать від величини впливу, умов і тривалості опромінення. Під час впливу ІВ на живий організм відбувається іонізація і збудження молекул, що призводить до розриву хімічних зв'язків і їх дисоціації. Це так звана пряма дія ІВ. Більш важливу роль відіграє механізм побічної дії ІВ. Під побічною дією випромінювання розуміють радіаційно-хімічні зміни в даній розчиненій речовині, зумовлені продуктами радіолізу води.

Основну частину маси живого організму складає вода (у людини 70...75 %). Тому при опроміненні живої тканини значна частина енергії ІВ поглинається, відбувається її радіоліз, при якому молекули розщепляються на пару іонів:



Позитивний іон води відразу ж розпадається з утворенням вільного радикала $OH^\bullet$:



а вибитий електрон e захоплюється іншою молекулою води, у результаті утворюється негативний іон води, який розпадається з утворенням радикала $H^\bullet$:



Якщо іони H^+ та OH^- рекомбінуючи утворюють воду, то вільні радикали $H^\bullet$ (сильний відновник) і $OH^\bullet$ (сильний окиснювач) мають високу хімічну активність.

Тема: "ДІЯ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ"

За наявності кисню утворюються також вільні радикали гідроперекису $O_2H^\bullet$ і перекису водню $H_2O_2^\bullet$, які є сильними окиснювачами.

Вільні радикали води $H^\bullet$, $OH^\bullet$, $HO_2^\bullet$, $H_2O_2^\bullet$, що утворюються в процесі радіолізу води, маючи високу хімічну активність, вступають у хімічні реакції з молекулами білка, ферментів та інших структурних елементів біологічної тканини, що приводить до зміни біохімічних процесів в організмі. У результаті порушуються обмінні процеси, пригнічується активність ферментних систем, сповільнюється і припиняється ріст тканин, виникають нові хімічні сполуки, невластиві організму, – токсини. Порушується життєдіяльність окремих функцій або систем і організму в цілому.

Це призводить до незворотних процесів в організмі людини. Змінюється склад найважливіших тканин живого організму (зокрема, крові, кісткового і спинного мозку). Починається переродження клітин. Наприклад, зменшується кількість еритроцитів (червоних кров'яних тілець) після одноразового опромінення всього тіла людини поглиненою дозою 0,5 Гр через два тижні після опромінення.

У здорової людини налічується близько 10^{14} червоних кров'яних тілець, при щоденному відтворенні 10^{12} , у хворого на променеву хворобу таке співвідношення порушується, внаслідок чого організм гине.

Специфіка дії ІВ на біологічні організми полягає в тому, що ефект, який викликається ними, зумовлений не стільки кількістю поглинутої енергії, скільки формою передавання цієї енергії. Жодний інший вид енергії (теплової, електричної та ін.), поглиненої організмом у тій же кількості, не призводить до таких змін, як ІВ.

Наприклад, смертельна доза ІВ, яка для ссавців дорівнює 5 Гр, відповідає поглинутій енергії випромінювання $5 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$. Якщо цю енергію перетворити у теплову, то вона нагріла б тіло на $0,001^\circ\text{C}$. Це тепла енергія склянки гарячого чаю.

Саме іонізація і збудження атомів та молекул середовища зумовлює специфіку дії ІВ.

Зміни, що відбуваються в організмі під впливом радіації, можуть виявитися через порівняно короткий проміжок часу після опромінення (кілька годин, днів) – гострі променеві ураження – або через тривалий проміжок часу (декілька років або навіть десятиріччя) – віддалені наслідки.

Кожна клітина містить молекулу ДНК, яка несе інформацію, потрібну для правильного утворення нових клітин. Радіаційне опромінення може вбити клітини або змінити інформацію в ДНК так, що із часом в організмі

почнуть з'являтися дефектні клітини. До того ж це випромінювання може змінити структуру клітини настільки, що її оновлення стане неможливим.

Зміна генетичного коду клітини організму називається *мутацією*. Мутація може призвести до значних змін, у тому числі й розвитку раку. Найбільш небезпечним є те, що дитина з такими клітинами може досягти зрілого віку, а потім передати змінений генетичний код своїм дітям. Ця прихована небезпека радіації може привести до того, що через певний час збільшиться кількість фізичних і психічних відхилень, а також інших непередбачених захворювань.

Тому при оцінці небезпеки опромінення, якого можуть зазнавати окремі контингенти людей і популяція в цілому, радіаційні ураження прийнято ділити на соматичні й генетичні.

Гостра і хронічна променеві хвороби

До соматичних уражень належать гостра і хронічна променеві хвороби (ПХ), локальні променеві ураження організму. Гострі променеві ураження мають поріг, тобто вони проявляються після перевищення якоїсь дози опромінення.

Установлено, що при одноразовому рівномірному гамма-опроміненні всього тіла (доза до 0,25 Зв) не можна виявити якихось змін стану здоров'я людини.

При еквівалентній дозі 0,25...0,50 Зв також відсутні зовнішні ознаки променевого ураження. В інтервалі доз 0,5...1,0 Зв виникає відчуття втоми без втрати працездатності. Менше ніж у 10 % опромінених можуть з'явитися блювання, зміни крові.

Різні форми променевої хвороби розвиваються при дозах одноразового опромінення вище 1 Зв.

Розрізняють чотири ступені гострої променевої хвороби.

1 ступінь – легкий (1...2 Зв) – характеризується відсутністю або слабкою вираженістю первинної реакції на опромінення. Прихований період продовжується 3–5 тижнів, після чого з'являються нездужання, загальна слабкість, нудота, підвищена температура. У першу добу після опромінення в 30...50 % випадків спостерігається блювання. Після видужання працездатність людей, як правило, зберігається. Смертельний кінець відсутній.

2 ступінь – середньої важкості (2...4 Зв) – протягом перших двох-трьох діб спостерігається бурхлива первинна реакція організму (нудота і

Тема: "ДІЯ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ"

блювання, різко знижується вміст лейкоцитів у крові). Далі настає прихований період (симптоми хвороби зникають), який триває від 5 до 20 діб, після чого загальний стан різко погіршується. У 20 % випадків можливий смертельний кінець. Смерть настає через 2–6 діб після опромінення. У кращому випадку при активному лікуванні видужання може початися через 2–6 місяців.

3 ступінь – важкий (4...6 Зв) – протягом місяця після опромінення смертельний кінець настає в 50 % випадків.

4 ступінь – дуже важкий (понад 6 Зв). Прихований період хвороби відсутній. У перші години з'являється блювання, сильний розлад шлунково-кишкового тракту (ШКТ) і порушення кровообігу. Наприкінці другого тижня настає смерть. Видужання можливе у 30...50 % за умови невідкладного початку лікування в спеціалізованій клініці. На цей час є досвід комплексного лікування ПХ, що дозволяє виключити смертельний кінець при дозах до 10 Зв.

Підсумовуючи сказане, слід зазначити, що при одноразовій дозі загального опромінення всього тіла 1 Зв не виникає ніяких серйозних відхилень у стані здоров'я, що яким-небудь чином впливали б на нормальне функціонування органів і систем організму, а також на працездатність людини. Ця доза визнана Міжнародною комісією з радіаційного захисту (МКРЗ) і національними комісіями радіаційної безпеки і є тим порогом, вище якого виникають нестохастичні (невипадкові) ефекти опромінення.

Ще однією принциповою точкою відліку, що характеризує граничні можливості захисних механізмів організму протидіяти радіаційному ураженню, є мінімальна смертельна доза (МСД), що дорівнює 6 Зв.

Проміжне положення займає величина середньої смертельної дози 50%-го виживання (ССД-50), яка складає близько 4,5 Зв і свідчить про індивідуальні відмінності радіочутливості, пов'язані також із функціональним станом організму в період опромінення.

Крім індивідуальних відмінностей, необхідно також враховувати радіочутливість крайніх вікових груп: дітей, літніх людей і людей похилого віку.

У тканинах дитячого організму концентрація найбільш радіочутливих молекул і клітин вища, ніж у дорослого, тому зростає можливість прямої дії радіації, а внаслідок великого питомого вмісту радіолізованої води – і побічного впливу. З іншого боку, дитячий організм має високу здатність відновних процесів.

У літніх людей відновні процеси сповільнюються, мають меншу ефективність, що й визначає підвищену уражуваність осіб цього віку. Період напіввиведення цезію-137 у дорослих близько 140 діб, а в дітей залежно від віку від 50 до 20 діб. Чим молодший організм, тим швидше (за інших однакових умов) він очищається від РН.

Хронічна променева хвороба розвивається поступово, триває довго. У цьому разі опромінення систематично повторюється дозами нижче тих, що викликають ПХ, але в сумі набагато більшими за гранично-допустимі. Ознаками хронічної ПХ є зміни складу крові (недокрів'я) і ряд симптомів розладу нервової системи.

За встановленими даними, реакція організму на вплив ІВ може проявитися і у віддалений період (через 10–29 років і більше).

Такими реакціями можуть бути лейкози, злоякісні пухлини різних органів і тканин, катаракти, ураження шкіри, скорочення тривалості життя. Віддалені наслідки, зумовлені впливом ІВ, можна оцінити тільки статистичними методами.

Так, першими в групі ракових захворювань, які вражають населення в результаті опромінення, стоять лейкози. Вони призводять до смерті людей у середньому через 10 років з моменту опромінення – значно раніше, ніж інші види ракових захворювань. Смертність від лейкозів серед тих, хто пережив атомне бомбардування Хіросіми і Нагасакі, стала різко знижуватися тільки через 25 років.

Зовнішнє і внутрішнє опромінення

Уражаюча дія радіоактивних випромінювань пов'язана з опроміненням, яке буває зовнішнім і внутрішнім.

Під зовнішнім опроміненням слід розуміти такий вплив випромінювань на людину, при якому джерело радіації знаходиться поза організмом і виключена ймовірність попадання РР усередину організму. При цьому людина опромінюється тільки протягом того часу, коли вона знаходиться поблизу джерела випромінювання. При зовнішньому опроміненні найбільш небезпечне рентгенівське, гамма- і нейтронне опромінення. Біологічний ефект залежить від дози опромінення, його виду, часу впливу, розмірів опромінюваної поверхні, індивідуальної чутливості організму. Альфа- і бета-частинки, маючи незначну проникну здатність, викликають при зовнішньому опроміненні тільки шкірні ураження.

Тема: "ДІЯ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ"

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

Можливі чотири шляхи проникнення РР в організм: через органи дихання, через ШКТ, через ушкодження і розриви на шкірі та шляхом абсорбції через здорову шкіру.

Найбільш небезпечний перший шлях, оскільки об'єм споживаного повітря складає 20 м^3 за добу, а з їжею людина споживає тільки 2,2 л води за добу (800 л у рік). При цьому засвоєння і відкладення в організмі РН, як правило, вище, ніж при проковтуванні.

Радіоактивні аерозолі залежно від дисперсності частинок по-різному затримуються в різних відділах дихальних шляхів. Так, аерозолі з розміром частинок більше 1 $\mu\text{м}$ переважно затримуються у верхніх дихальних шляхах і виштовхуються назовні; частинки до 1 $\mu\text{м}$ – у трахеобронхіальній ділянці, а частинки менше 1 $\mu\text{м}$ – у легених альвеолах. При цьому нерозчинні частинки зберігаються в легенях, і легенева тканина одержує певну дозу радіації, а розчинні РН потрапляють у кров і далі разом з нею надходять до різних тканин організму. Отже, частина РР, які потрапляють з легень до інших органів, значною мірою залежить від дисперсності вдихуваних аерозолів. Очевидно також, що швидкість переходу РР з легень до інших органів організму тим вища, чим краща розчинність вдихуваних аерозолів у фізіологічних рідинах організму і, зокрема, у лімфі крові.

При пероральному (травним каналом) надходженні РР потрапляють у ШКТ, звідки всмоктуються в кров та розносяться по різних органах і тканинах. Чим менша розчинність сполуки, що містить РН, тим більше її проходить транзитом по ШКТ і евакуюється з організму.

Радіоактивні речовини, які проникли через шкіру, надходять безпосередньо в кров, і далі РН залежно від хімічних властивостей накопичуються в конкретних органах, що спричиняє високі локальні дози радіації.

Якщо РН не закріпилися в тканинах і органах тіла, вони через деякий час проходять через нирки і виходять із сечею. Отже, у процесі життєдіяльності певна частина радіоактивних елементів виводиться з організму (з потом, слиною, сечею, калом і т. д.). Цей процес характеризується такими показниками:

періодом біологічного напіввиведення T_6 – часом, протягом якого

кількість (активність) даного РН в організмі зменшується вдвоє внаслідок фізіологічного обміну;

ефективним періодом напіввиведення $T_{\text{еф}}$ – часом, протягом якого кількість (активність) РН в організмі зменшується вдвоє за рахунок радіоактивного розпаду (фізичний період напіврозпаду $T_{1/2}$) і біологічного виведення (T_0).

Лекція 4

Тема: "ПОШИРЕННЯ КИСНЕВОГО ЕФЕКТУ. ПРЯМІ ТА НЕПРЯМІ ЕФЕКТИ ОПРОМІНЕННЯ, МОДИФІКАЦІЯ РАДІОБІОЛОГІЧНИХ ЕФЕКТІВ"

План

- 1. Кисневий ефект у радіаційно-хімічних реакціях.*
- 2. Прямі та непрямі ефекти опромінення клітин.*
- 3. Модифікація радіобіологічних ефектів.*
- 4. Радіопротектори та радіосенсибілізатори.*
- 5. Пострадіаційне відновлення та репарація клітин від променевого ураження.*

Від наявності кисню в реакційному середовищі, де опроміненням індукована поява іонізованих і збуджених станів атомів та молекул, залежить подальший розвиток радіаційно-хімічних і радіаційно-біохімічних реакцій і, врешті-решт, вихід радіаційних ушкоджень біологічно важливих молекул у клітинних ультраструктурах.

Вплив кисню на перебіг радіаційно-хімічних перетворень речовин, який посилює прояв радіобіологічної реакції, отримав назву *кисневого ефекту*. Цей ефект проявляється в разі опромінення біологічних об'єктів у атмосфері, що містить кисень у різних концентраціях.

Кисневий ефект зумовлений взаємодією кисню з вільними радикалами, які виникають унаслідок дії іонізуючого випромінювання на молекули різних речовин, насамперед води. У складних біологічних системах вплив кисню на вихід продуктів радіаційно-хімічних перетворень молекул визначає подальший розвиток радіобіологічного ефекту.

Кисневий ефект проявляється на різних рівнях організації процесів у біологічних системах, починаючи з елементарних радіаційно-хімічних реакцій – радіолізу води – й закінчуючи складними, інтегральними радіобіологічними реакціями клітин, тканин і багатоклітинних організмів.

Видалення кисню із середовища могло б послабити радіаційне ураження організму, але для життєдіяльності аеробних клітин аноксичні аб

гіпоксичні умови є вкрай несприятливими, й це обмежує використання кисневого ефекту як засобу захисту організму від шкідливої дії іонізуючого випромінювання.

Прояви кисневого ефекту – посилення індукованої іонізуючим випромінюванням реакції – поширюються на хімічні та складні біологічні системи: за наявності кисню в середовищі спостерігається збільшення виходу радіаційно-хімічних реакцій внаслідок опромінення окремих речовин, а також клітин, органів і цілісного багатоклітинного організму.

Для пояснень механізму кисневого ефекту залучаються уявлення про появу первинних потенційних ушкоджень типу $R^\bullet$. Якщо тривалість існування цього збудженого стану біомакромолекули значна, то є підстави говорити про довгоіснуючі потенційні киснезалежні ушкодження. На прикладі водних розчинів міозину, який характеризується аденозинтрифосфатазною активністю, було показано, що опромінення супроводжується інактивацією ферментативної активності, й у цій інактивації чітко проявляється кисневий ефект. Інактивація міозину за опромінення в аноксичних умовах набагато менша, ніж у присутності кисню. Проте, якщо до міозину, опроміненого в аноксичних умовах, через деякий час після дії випромінювання додавати кисень, то реєструватиметься така сама інактивація ферментативної активності, як у разі опромінення в середовищі, що містить кисень. Отже, первинні киснезалежні ушкодження зберігаються як потенційні, тому й проявляється киснева післядія.

Російський радіобіолог Л.Х. Ейдус виявив так званий відтермінований кисневий ефект, який полягає в тому, що інактивація біологічних макромолекул, опромінених в аноксичних умовах, може посилюватися під впливом кисню, якщо його вводити в середовище через деякий час після опромінення. Наявність кисневої післядії свідчить про те, що за умов опромінення в безкисневому середовищі у макромолекулах виникають киснечутливі ушкодження, що можуть зберігатися досить тривалий час. Ці ушкодження належать до потенційних, оскільки вони реалізуються лише за наявності кисню. Потенційні киснечутливі ушкодження є стабільними вільнорадикальними станами молекул, і їх можна реєструвати методом електронного парамагнітного резонансу. На прикладі міозину було визначено, що час, протягом якого зберігаються потенційні киснезалежні ушкодження його молекул, досить значний – багато годин.

Оскільки інтенсивність прояву відтермінованого кисневого ефекту із часом ослаблюється, є підстави вважати, що потенційні киснечутливі ушкодження макромолекул розпадаються.

Тема: "ПОШИРЕННЯ КИСНЕВОГО ЕФЕКТУ. ПРЯМІ ТА НЕПРЯМІ..."

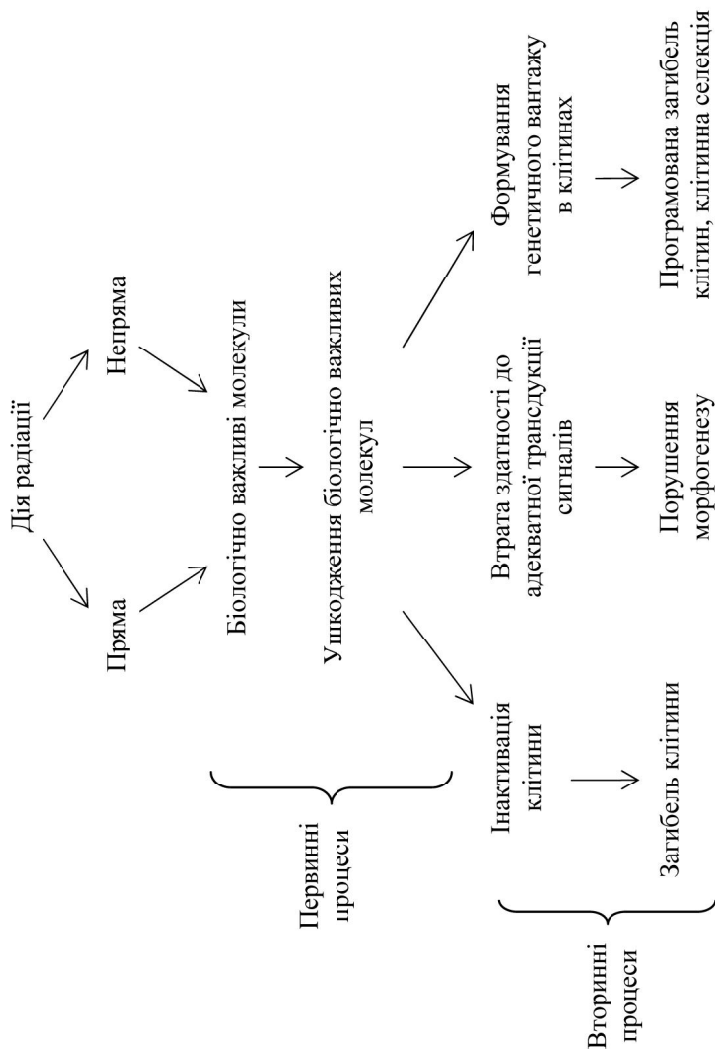
У складніших системах, наприклад у клітинах або багатоклітинних організмах, кисневий ефект проявляється не тільки в зростанні радіочутливості, яку визначають, досліджуючи виживаність, а й на рівні різних молекулярно-біологічних або метаболічних процесів. Так, як уже зазначалося, інтенсивність транскрипції ДНК зазнає більшого радіаційного гальмування за наявності кисню в середовищі. Так само індукована опроміненням деградація ДНК у клітинах деяких бактерій в 2–4 рази сильніша в присутності кисню, ніж в аноксичних умовах опромінення. Наявність кисню в клітині впливає на ефективність відновлення ДНК від ушкоджень (репарацію).

Очевидно, є всі підстави стверджувати, що внаслідок опромінення клітин виникають як киснезалежні, так і кисненезалежні ушкодження. Очевидно також, що в клітинах містяться тілові сполуки, які забезпечують ліквідацію ушкоджень макромолекул, зокрема ДНК.

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

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

З появою змінених унаслідок опромінення біологічно важливих молекул розпочинаються *вторинні процеси*, які раніше тлумачилися як реалізація потенційно летальних ушкоджень молекул. Ці процеси охоплюють низку клітинних явищ, в яких беруть участь ушкоджені молекули, що спричиняє формування летального ураження клітини. До таких явищ належать реплікація ДНК, якщо йдеться про радіаційне ушкодження молекули. У разі реплікації відбувається дублювання ушкодження ДНК з появою двониткового розриву подвійної спіралі. За подальшого поділу клітини з таким двонитковим розривом ДНК може настати проліферативна загибель клітин унаслідок формування хромосомної аберації. Якщо ж інактивації зазнала молекула білка, яка до того ж має унікальний для клітини характер, то розвиток вторинних процесів відображує дефіцит певної функції, здійснення якої потребує наявності ушкодженої опроміненням молекули білка.



Загальна схема радіобіологічного процесу

Якщо ж первинний процес завершився порушенням молекулярної структури, яка забезпечує перетворення сигналів, що визначають функціональну орієнтованість клітинних процесів, то спостерігається патологічне відхилення онтогенетичного розвитку ураженої клітини. Раніше вважали, що вторинні процеси відбуваються в одному напрямі реалізації молекулярного ушкодження аж до повної інактивації. Останнім часом до вторинних відносять також різні за напрямом розвитку процеси. При цьому великого значення надають реакції клітини на появу в ній первинно ушкоджених молекул. У цих активних реакціях реалізується стратегія виживання клітини або багатоклітинного організму, до складу тканин якого входять уражені внаслідок опромінення клітини. Крім того, як вторинні процеси слід розглядати зведення до мінімуму генетичної загрози для виду, яку може становити ушкоджена опроміненням клітина або група клітин.

Модифікація радіобіологічних ефектів

Унаслідок впливу різних факторів на опромінену систему може змінюватися ступінь прояву радіобіологічного ефекту. Такі впливи називають *модифікувальними*, а явище, що полягає в управлінні формуванням радіобіологічного ураження – *модифікацією променевого ураження*.

Поняття "модифікація променевого ураження" є доволі широким за своїм змістом і охоплює коло найрізноманітніших ефектів залежно від того, на якому етапі формування радіобіологічного ефекту здійснюється його модифікація.

Щодо типізації модифікації є два підходи.

По-перше, виділяють модифікацію променевого ураження, яка сприяє або підвищення, або зменшення радіостійкості під впливом модифікувального фактора.

По-друге, враховують, за яких проміжків часу дії модифікатора відносно моменту опромінення його модифікувальний вплив виявляється найефективнішим.

Дійсно, під впливом деяких факторів до опромінення ультраструктури мішеней клітин можуть переходити в такий стан, коли їх ушкодження внаслідок опромінення буде або більшим, або меншим порівняно з біологічними об'єктами, які не зазнали дії модифікаторів.

Якщо модифікувальні впливи виявляються ефективними лише за умови їх наявності в момент опромінення, то, очевидно, механізм їхньої

дії пов'язаний з впливами на виходи радіаційно-хімічних реакцій. Впливи, які спричиняють модифікувальний ефект після опромінення, певно, мають бути пов'язані зі змінами відповідних процесів відновлення клітини або розвитку її ушкодження. Вони, на відміну від попередніх типів дії, не запобігають появі первинних радіаційних ушкоджень.

Історія розвитку радіобіології – це пошуки ефективних засобів підвищення радіостійкості організмів, оскільки практична мета теоретичних розробок у цій науці полягає, насамперед, у визначенні шляхів активного втручання в процеси формування радіобіологічних ефектів.

Особливо важливим явищем є *радіопротекція* – запобігання появі первинних ушкоджень біологічно важливих молекул. Завдяки радіопротекції зменшується вихід радіаційно-хімічних перетворень таких клітинних структур, як хроматин і мембрани, на одиницю дози. Фактори хімічної природи, що спричиняють радіопротекторний ефект, називають *радіопротекторами*.

Проте в "чистому вигляді" радіопротекторні ефекти можна спостерігати лише в дуже простих системах, таких, як, наприклад, розчини окремих речовин або їх суміші. У клітинах, тканинах, багатоклітинних організмах під впливом тих чи інших речовин, як правило, реєструють відповідь системного характеру, що формується за участі самого радіопротекторного ефекту та низки інших механізмів, які часто охоплюють і власне процеси модифікації радіаційного ураження. Тому в більшості існуючих класифікацій ефектів модифікації поняття радіопротекторних ефектів конкретизують, зважаючи на те, що модифікація променевого ураження, яка зменшує інтенсивність прояву радіобіологічної реакції, може мати прояв, тотожний радіопротекторному ефекту.

За характером розрізняють *позитивну* й *негативну модифікації* променевого ураження, залежно від того, ослаблюється чи посилюється прояв радіобіологічної реакції внаслідок дії модифікувального фактора.

Найчастіше поняття "модифікація променевого ураження" розглядається в контексті радіобіологічної реакції клітини або організму, проте його можна застосовувати й до систем будь-якої складності, в тому числі до видових популяцій і біоценозів. Отже, модифікація радіаційних уражень може здійснюватися на різних рівнях: молекулярних субклітинних процесів, процесів у клітинних популяціях, компенсаторних процесів у багатоклітинному організмі, у видових популяціях і біоценозах.

Природа модифікувальних факторів

Модифікація променевого ураження може відбуватися під впливом факторів різної природи – фізичної, хімічної й біологічної.

До *фізичних* належать фактори, пов'язані власне з характером опромінення, а також фізичні поля, під дією яких змінюється розвиток променевих ушкоджень різної природи в процесі формування. Оскільки прояв променевого ураження залежить від якості випромінювання, ефекту фракціонування і потужності поглинутої дози, то ці фактори можна вважати модифікаторами фізичної природи.

Модифікаторами променевого ураження можуть бути впливи світла (фотомодифікація), магнітні поля різної природи, температурні впливи, малі дози іонізуючого випромінювання, що передують опроміненню організму в більших дозах (радіоадаптація).

До *хімічних* модифікувальних факторів належить багато хімічних речовин, під впливом яких змінюється інтенсивність прояву радіобіологічних реакцій біологічних систем.

З *біологічними* модифікувальними факторами пов'язують залежність радіочутливості клітини від фази мітотичного циклу, в якому вона перебуває під час опромінення, функціональну здатність систем клітинної репарації, проліферативну активність клітин, здатність клітинних популяцій до репопуляційного відновлення, генетичні фактори, що визначають реакцію організму на опромінення. До модифікувальних факторів біологічної природи належить здатність клітин нагромаджувати продукти метаболізму, які виявляють властивості нативних хімічних радіомодифікаторів. Отже, ефекти від впливу біологічних і хімічних модифікувальних факторів можуть бути однаковими.

Безперечно, дуже часто вплив факторів хімічної й фізичної природи опосередковується біологічними факторами.

Якщо модифікатори виявляють ефективність у разі впливу до опромінення, то такі модифікувальні впливи називають *профілактичними*. Якщо модифікатор проявляє ефективність дії після опромінення, то йдеться про *пострадіаційну модифікацію*. Якщо вплив пострадіаційного модифікатора ослаблює прояв радіобіологічного ефекту, то його називають *терапевтичним*.

Очевидно, профілактичні модифікувальні впливи слід розглядати як модифікацію радіочутливості організму.

Хімічні радіомодифікатори променевого ураження й радіопротектори часто класифікують за хімічною природою речовин, які виявляють відповідні радіомодифікувальні властивості.

У радіології профілактичні протипроменеві засоби класифікують за особливостями змін перебігу гострої променевої хвороби в разі використання цих засобів і виділяють такі групи: мієло-, ентеро- та цереброрадіопротектори; стимулятори радіорезистентності; фактори, що запобігають нагромадженню доз внутрішнього опромінення пригніченням депонування радіонуклідів у окремих тканинах організму.

Радіопротекторні ефекти

Речовини, що сприяють зменшенню радіаційного ураження, за часом, протягом якого вони справляють радіопротекторну дію, поділяються на такі групи:

1) речовини, що ефективні за умов дії на клітини до опромінення, — *профілактичні радіопротектори*. Очевидно, їх радіозахисна функція пов'язана з тим, що вони індукують процеси, які супроводжуються зростанням радіостійкості клітини;

2) речовини, що є активними лише в тому разі, коли присутні в момент опромінення. Здебільшого вони взаємодіють з короткоіснуючими продуктами, які виникають у клітинах унаслідок опромінення. Ці речовини належать до групи *власне радіопротекторів*, оскільки під їхнім впливом інактивуються продукти радіолізу, а отже, зменшується вихід радіаційних ушкоджень макромолекул у клітинах;

3) речовини, що є активними в разі потрапляння в клітини після опромінення — *терапевтичні*. Їх радіозахисна дія зумовлена активацією репараційних процесів або впливом на інші процеси пострадіаційного відновлення, зокрема на репопуляцію. Очевидно, терапевтичні радіопротектори є позитивними радіомодифікаторами.

Радіопротектори

Відомо дуже багато різних за хімічною природою речовин, які мають протирадіаційні захисні властивості.

Радіопротектори класифікують за хімічною природою радіопротекторних речовин або за клінічними проявами захисних ефектів.

За хімічними властивостями радіопротектори поділяють на такі класи:

Тема: "ПОШИРЕННЯ КИСНЕВОГО ЕФЕКТУ. ПРЯМІ ТА НЕПРЯМІ..."

I. Сульфогідрильні сполуки – речовини, до складу яких входить SH-група. Серед цих речовин є сполуки з найсильнішими радіопротекторними властивостями, зокрема цистеамін і цистеїн. На сьогодні відомо понад 400 сульфогідрильних сполук радіопротекторної дії. До протекторів цієї групи належать також S-β-аміноетилізотіоуроній (АЕТ), меркаптоетилтіогуаїгнідин (МЕТ), 2,3-меркаптопропанол (БАЛ), тіоурацил, глутатіон та ін. Сульфогідрильні сполуки з радіопротекторними властивостями, в свою чергу, розподіляються на різні групи.

II. Відновники: аскорбінова кислота та її похідні, пропіловий спирт, сульфід натрію, етиловий спирт та ін.

III. Окисники: кисень, пероксид водню, меланіни, піросульфат натрію, феросульфат.

IV. Комплексні сполуки: 8-гідроксихінолін, дауекс-50, диетилдитіокарбамат, купферон, трилон Б, ЕДТА.

V. Іони металів: Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Hg^{2+} , Co^{2+} та ін. Радіопротекторну дію справляють також деякі кофактори – цитохром С, як окремо, так і в суміші. Радіопротекторні властивості виявляють і деякі вітаміни: тіамін, ціанокобаламін.

Кількісна характеристика радіопротекторного ефекту. Радіопротек-ефекти характеризують коефіцієнтом захисту (КЗ), який відображує ймовірність ефекту захисту й обчислюється як відношення різниці показників ушкоджуваності системи без захисного фактора та з ним.

Проте найчастіше ступінь протирадіаційного захисту характеризують *фактором зменшення дози*:

$$\text{ФЗД} = \frac{LD_{53/30} \text{ для захищеного організму}}{LD_{53/30} \text{ для незахищеного організму}}.$$

Час дії радіопротектора. Радіопротекторний ефект того чи іншого радіопротектора залежить від часу введення його в організм – до чи після гострого опромінення. Найбільша ефективність справжніх радіопротекторів досягається у випадку, коли їхні молекули присутні в клітинах у момент дії радіації.

Дослідження впливу радіопротекторів на вихід радіаційних ушкоджень складних організмів, зокрема вищих тварин і рослин, можуть ускладнюватися внаслідок того, що засвоєння тієї чи іншої речовини часто супроводжується її метаболічним перетворенням, або ж вона взагалі може й

не потрапити до місця дії, наприклад у хроматин клітинного ядра. Тому експерименти на організмах слід дублювати на модельних системах, що дає змогу однозначніше тлумачити отримані дані.

Радіосенсибілізація

Під впливом низки хімічних сполук зростає радіочутливість клітин. Це явище називають *радіосенсибілізацією*, а сполуки, що спричиняють ефект радіосенсибілізації, – *радіосенсибілізаторами*.

Серед радіосенсибілізаторів є речовини різної хімічної будови, що свідчить про існування кількох механізмів радіосенсибілізації.

До радіосенсибілізаторів належать насамперед кисень, за наявності якого в опромінюваній клітині або тканині радіаційні ефекти, як правило, істотно посилюються, а також:

галоїдовмісні речовини (монойодоацетат, йодоацетамід, йодобеганіна кислота, йодистий метил, йодистий калій);

сполуки з ненасиченими зв'язками (акриламід, акрилова кислота, N-етиламеїд, похідні малеїнової кислоти);

сполуки, які внаслідок перетворення здатні утворювати молекули з реакційноздатною карбонільною групою (хлоралгідрат, трифторацетальдегідгідрат);

заміщені гліюксалі, кетоальдегіди, нінгідрин, синкавіт;

ртутеорганічні сполуки (меркуріюїодид);

сполуки, здатні існувати у формі вільних радикалів, – дитретичний бутіл-нітроксид, триацетамід, К-оксил.

Кількісною характеристикою ефекту радіосенсибілізації є *фактор зменшення дози* – коефіцієнт, який показує, наскільки збільшується радіочутливість клітин під впливом радіосенсибілізатора:

$$\PhiЗД = D_0^{\text{cont}} / D_0^{\text{rad}},$$

де D_0^{cont} і D_0^{rad} – значення D_0 відповідно за відсутності й за наявності радіосенсибілізатора.

Слід зауважити, що цей коефіцієнт подібний до фактора збільшення дози. Тому часто говорять про *фактор зміни дози*, значення якого може бути й більшим за одиницю (для радіопротекторів) і меншим за одиницю (для радіосенсибілізаторів). Очевидно, коефіцієнт кисневого посилення (ККП) пов'язаний із ФЗД.

Природні й штучні радіосенсибілізатори. Серед речовин, які на-

лежать до продуктів обміну речовин, є чимало сполук з карбонільними групами. Вони можуть спричиняти радіосенсибілізувальні ефекти певного рівня. Певно, компартментація метаболічних фондів у клітині обмежує прояв цих ефектів. Проте не виключено, що підвищена радіочутливість клітин може бути наслідком наявності природних радіосенсибілізаторів. Натомість штучні радіосенсибілізатори, яким немає аналогів серед речовин, властивих метаболізму клітини, належать до ксенобіотиків. Можлива поява радіосенсибілізаторів під впливом факторів, які, змінюючи напрям обміну речовин, спричиняють зростання внутрішньоклітинної концентрації природних радіосенсибілізаторів.

Механізми ефектів радіосенсибілізації досить різноманітні. Їх реалізація може бути пов'язана як з безпосередньою взаємодією радіосенсибілізатора з біомакромолекулами, так і з непрямим впливом на умови атакуювання макромолекул вільнорадикальними продуктами радіолізу води. Так само, як і для радіопротекторів, слід чітко розрізняти власне радіосенсибілізацію, коли наявність радіосенсибілізатора збільшує виходи первинних ушкоджень молекул, та радіосенсибілізувальні модифікаційні впливи, за яких радіосенсибілізатор підвищує інтенсивність вторинних процесів розвитку радіаційного ушкодження, наприклад негативним впливом на репарацію ДНК у клітині.

Пострадіаційне відновлення та репарація клітин від променевого ураження

Пострадіаційне відновлення – ліквідація ушкодження, викликаного впливом іонізуючого випромінювання.

Відкриття феномена пострадіаційного відновлення і вивчення його механізмів пов'язані з іменами радянських дослідників Н.В. Лучника (1951), В.Л. Корогодіна (1956) і американського вченого Елкінда (М. Elkind, 1959).

Пострадіаційне відновлення проявляється на різних рівнях біологічної організації від молекулярного до організменого. У його основі лежать фізіологічні процеси, спрямовані на забезпечення стабільності генетичного матеріалу й клітинного відновлення життєво важливих систем. Відновлення, що протікає в опромінених клітинах без їхнього поділу (внутрішньоклітинне відновлення), називають репарацією. У клітинах опроміненого організму відбувається репарація сублетальних і потенційно летальних ушкоджень. Репарація сублетальних ушкоджень характерна

для активно проліферувальних клітин, наприклад клітин кісткового мозку й епітелію кишечника. При такому типі пострадіаційного відновлення у перші кілька годин після опромінення репаруються ушкодження, які сприяють підвищенню чутливості клітини до повторного опромінення. Репарація сублетальних ушкоджень звичайно буває повною й завершується до вступу опромінених клітин у період синтезу ДНК.

Репарація потенційно летальних ушкоджень характерна для клітин, що перебувають у фазі тимчасового або постійного проліферативного спокою, наприклад для клітин печінки, нирок, головного мозку. У цьому випадку виживаність клітин зростає зі збільшенням тимчасового інтервалу між опроміненням і впливом стимулу до клітинної проліферації або зі зниженням потужності дози випромінювання. Репарація потенційно летальних ушкоджень звичайно не є повною, частина популяції – це клітини, що втратили здатність до "нескінченного" розмноження і відмирають після одного або декількох поділів.

Обидва типи клітинної репарації значно більш виражені при дії рідкоіонізуючого випромінювання, ніж щільноіонізуючого.

Різноманіття процесів пострадіаційного відновлення обумовлене як численністю виникаючих радіаційних ушкоджень, так і використанням різних показників: ушкоджень ДНК, хромосом і цілих клітин. Крім того, доведено, що різні репаративні процеси, розділені за швидкістю їх молекулярних проявів, проходять паралельно. Відповідні типи репарації можуть бути повністю або частково завершеними; крім того, у ряді випадків репарація проходить як "помилкова". Доведений генетичний контроль різних етапів репаративних процесів. У процесах репарації беруть участь численні ферменти: ДНК-полімерази, рестриктази, лігази й ін. На клітинному рівні може бути відновлена більша частина ушкоджень молекул-мішеней. Так, наприклад, при опроміненні в дозі 1 Гр у клітинах ссавців у середньому утворюється близько 1000 одиночних розривів ДНК, 100 подвійних розривів і 1500 зіпсованих її основ, які реалізуються потім усього в 1 хромосомну аберацію обмінного типу, тобто до 99,9 % молекулярних ушкоджень ДНК можуть бути відновлені. Однак через стохастичний (імовірний) характер нанесення різних ушкоджень і неможливість 100%-ї репарації в кожній клітині або її генетичній структурі, навіть при найнижчій дозі випромінювання, існує деяка ймовірність летального ушкодження або індукування мутацій.

Пострадіаційне відновлення тканин опроміненого організму включає у себе як внутрішньоклітинне відновлення, так і розмноження клітин,

що вижили та заміщають загиблі клітини. При цьому в критичних органах і системах клітинного відновлення, які визначають виживаність організму (кістковий мозок і кишковий епітелій), вирішальне значення має розмноження стовбурових клітин і їх нащадків. Стовбурові клітини за рахунок швидкої проліферації й диференціації здатні досить швидко (до кінця проявів гострого променевого синдрому) повністю відновити клітинний склад критичних органів. Тому стовбурові клітини, що відновилися після опромінення, є як би детермінантами променевої реакції систем клітинного відновлення. При опроміненні в більших дозах і значному виснаженні пулу стовбурових клітин клітинна система не здатна відновитися і визначає результат гострого або пізнього променевого ураження.

В органах і системах, у яких клітинне відновлення відбувається повільно (стаціонарні системи), а в дорослих практично відсутнє, результат променевого ураження із завершенням репарації потенційно летальних уражень залежить від ступеня ушкодження ендотелію судин. У результаті порушень мікроциркуляції відбувається зниження загальної кількості клітин й функціональних можливостей тканин. Таку реакцію на дію опромінення, яка поступово реалізується, розглядають як прояв незворотного компонента радіаційного ураження на тканинному рівні. Він з'являється у віддалений термін після опромінення також у системах швидкого клітинного відновлення. У цьому випадку він може бути пов'язаний не тільки зі зменшенням проліферативного потенціалу стовбурових клітин (через додаткову проліферацію при відновленні клітинної системи в гострий період променевого ураження), але й з виснаженням стромы, що повільно поновлюється (у результаті ушкодження мікроциркуляції, відновлення фібробластів та ін.).

Феномен відновлення ураховується при розробці засобів профілактики й лікування радіаційних уражень, спрямованих на стимулювання процесів відновлення насамперед у критичних органах і системах. Істотне значення проблема пострадіаційного відновлення одержує при променевій терапії злоякісних новоутворень у клінічній радіобіології. Деякі типи пухлин (наприклад, меланома, саркома) є радіорезистентними через здатність їхніх клітин до пострадіаційного відновлення. Крім того, в абсолютній більшості пухлин через недостатність їх васкуляризації є гіпоксичні клітини, багато з яких тимчасово перебувають у стані проліферативного спокою. Такі клітини після опромінення здатні до репарації потенційно летальних ушкоджень, а добре окисегоновані й проліферувальні клітини пухлини репарують сублетальні ушкодження. Тому для вибіркового

підвищення радіочутливості пухлини в процесі променевої терапії використовують хімічні й фізичні радіомодифікуючі агенти, які пригнічують пострадіаційне відновлення (гіпертермію, препарати, що зв'язуються з ДНК, кисень під тиском, електронакцепторні сполуки тощо). Із цією ж метою застосовують схеми й види опромінення, при яких реалізуються відмінності у швидкості пострадіаційного відновлення в пухлині й нормальних тканинах (багаторазове опромінення протягом доби невеликими дозами, тривале внутрішньотканинне опромінення, застосування щільноіонізуючих випромінювань і т. д.).

Лекція 5

Тема: "ВІДПОВІДЬ ТВАРИННОГО ОРГАНІЗМУ НА ОПРОМІНЕННЯ"

План

- 1. Радіочутливість різних тканин організму. Схема формування відповіді тваринного організму на опромінення.*
- 2. Радіаційні синдроми у ссавців. Кістковомозковий та гастроінтестинальний синдроми.*
- 3. Вплив опромінення на клітини крові й тканини кровотворних органів.*
- 4. Вплив іонізуючих випромінювань на плід людини й тварин.*

Загальна схема формування відповіді тваринного організму на опромінення

Радіаційне ураження людини розвивається за тими самими законами, що й в опромінених вищих тварин. Тому висновки про характер впливу іонізуючого випромінювання на ті чи інші тканини та органи людини здебільшого зроблено на підставі результатів спостережень над опроміненими ссавцями. Це стосується формування радіаційних синдромів, у чому беруть участь ушкодження складних інтегрованих систем організму, й у патогенетичному процесі проявляються не лише прямі наслідки опромінення, а й нашарування численних побічних процесів, які супроводжують радіаційне ураження окремих клітин і тканин та зниження власних їм функціональних потенцій.

Реакція вищих тварин на дію ІВ розпочинається з радіаційного ушкодження клітин, що проявляється в проліферативній загибелі клітин у твірних тканинах або порушенні функцій клітин у диференційованих спеціалізованих тканинах. Якщо клітина, яка стала мішенню для влучання променя, але не зазнала повної репарації чи елімінації, започаткує клітинну лінію, яка або призведе до утворення гамет, або ж проявить наслідки індукованої опроміненням трансформації, то реакція на опромінення виражатиметься в *стохастичному віддаленому ефекті* – генетичних змінах або канцерогенезі.

Детерміністичний ефект можна розглядати як наслідок появи в тканині певної кількості клітин, інактивованих у результаті стохастичного ефекту. Чим більше таких інактивованих клітин, тим інтенсивніше проявляються детерміністичні ефекти опромінення. Завдяки механізмам, що забезпечують клітинний або функціональний гомеостаз, утрати, зумовлені порушенням нормальної життєдіяльності інактивованих клітин, компенсуються, й променеве ураження не виявляється, якщо число ушкоджених клітин не перевищує певного значення.

Очевидно, критичні тканини (тобто тканини, клітини яких мають найвищу радіочутливість) є відповідальними за прояв радіобіологічних нестохастичних ефектів унаслідок опромінення в дозах, за яких можливе нагромадження певної кількості інактивованих клітин.

Радіаційні синдроми у ссавців

Критичні тканини, радіаційне ушкодження яких унаслідок опромінення спричиняє розвиток радіаційного ураження, можна виявити, досліджуючи залежність між дозою опромінення та проміжком часу від моменту опромінення до загибелі організму. Це класична радіобіологічна дозова функція, на основі якої зроблено дуже важливі висновки про наявність кількох критичних щодо дії іонізуючого випромінювання систем організму.

На кривій найчастіше виділяються три компоненти радіаційного ураження. Кожному з них відповідає сукупність ознак хворобливого стану – *синдромів радіаційного ураження*. Таким чином окреслюються три синдроми радіаційного ураження, в основі кожного з яких лежать ушкодження клітин певних тканин.

Розбіжність інтервалів доз, у межах яких проявляються зазначені синдроми радіаційного ураження, пояснюється тим, що істотно відрізняється радіочутливість клітин, інактивація яких спричиняє загибель тварини внаслідок прояву відповідного синдрому. Так, найчутливішими є клітини, із загибеллю яких пов'язаний синдром I; найменш чутливими є ті клітини, інактивація яких супроводжується синдромом III; синдром II формується за умови інактивації клітин проміжної радіостійкості.

Загибель тварини внаслідок розвитку синдрому III настає скоріше, ніж при синдромі II, а тим паче при синдромі I, тому в результаті опромінення у великих дозах тварина гине, демонструючи прояв синдрому III, оскільки синдроми I і II не встигають реалізуватися.

Тема: "ВІДПОВІДЬ ТВАРИННОГО ОРГАНІЗМУ НА ОПРОМІНЕННЯ"

Синдром I спричинений інактивацією клітин кровотворної тканини кісткового мозку, тому його називають *кістковомозковим*, або *гемопетичним*.

Синдром II відображує наслідки променевого ураження клітин, функція яких полягає в забезпеченні оновлення клітин епітелію кишкового тракту, й називається *гастроінтестинальним*.

Синдром III розвивається внаслідок ушкодження нервових клітин центральної нервової системи, тому його називають *нервово-паралітичним*, або *синдромом центральної нервової системи* (синдром ЦНС).

Загибель тварин безпосередньо в момент опромінення в дуже високій дозі зумовлена масовим радіаційно-хімічним перетворенням молекул, що внеможливиє функціонування будь-яких клітин. Цю форму загибелі називають *молекулярною*, або *смертю під променем*.

Кістковомозковий синдром

Причиною розвитку цього синдрому є ушкодження популяції стовбурових клітин системи кровотворення, розташованих у кістковому мозку. Розрізняють червоний кістковий мозок, в якому переважає кровотворна мієлоїдна тканина, та жовтий, що складається в основному з жирової тканини. Червоний кістковий мозок зберігається протягом усього життя тварини й зосереджений він у ребрах, груднині, кістках черепа, таза, хребцях, в епіфізах трубчастих кісток. У людини маса червоного кісткового мозку складає близько 1,5 % маси тіла.

До складу кісткового мозку входять стовбурові кровотворні клітини, які дають початок усім формам кров'яних та лімфоїдних клітин. Частка стовбурових клітин у червоному кістковому мозку не перевищує 0,1 % всіх його клітин. Основу кісткового мозку становить ретикулярна тканина, яка утворює так зване кровотворне мікрооточення – комплекс мікроанатомічних, гуморальних та інших факторів, що забезпечують розмноження й диференціювання клітин крові.

Найчутливішими до дії випромінювань є стовбурові клітини органів кровотворення, клітини-попередники цих органів та лімфоїдні клітини. За відсутності факторів росту строми ці клітини приречені на загибель. Продуцентами гемопетичних факторів росту є В-лімфоцити, які гинуть після гострого опромінення кісткового мозку. Некротизовані рештки клітин захоплюються локальними фагоцитами. Ці процеси спричиняють ослаблення міжклітинних взаємодій, зокрема контактів між гемопетичними

стовбуровими клітинами й клітинами строми, а також зниження забезпечення стовбурових клітин факторами росту, зокрема інтерлейкіном *L*.

Більш стійкими є мієлоїдні клітини, що дозрівають: мегакаріоцити, моноцити, макрофаги.

Унаслідок перетворень клітин-попередників виникають зрілі клітини периферичної крові.

Після опромінення тварин чисельність клітин у периферичній крові поступово зменшується. Зниження клітинної репродукції тим більше, чим вища доза опромінення. При перевищенні певного значення дози репопуляційне відновлення клітинної репродукції не відбувається.

Для проходження етапів формування зрілої клітини крові в паростку потрібен певний час, який називають *транзитним*. Тривалість транзитного часу компартменту клітин, що зазнають поділу в ході дозрівання (до них належать еритробласти, базофільні, поліхроматофільні та оксифільні нормобласти), складає 8...10 діб. Транзитний час компартменту клітин, що дозрівають, – зрілих поліхроматофільних і оксифільних нормобластів та кістковомозкових ретикулоцитів – менший – 2...4 доби.

Вплив опромінення у високих дозах на клітини периферичної крові й тканини кровотворних органів. Під дією іонізуючої радіації у високих дозах (5...10 Гр) концентрація всіх клітинних форм крові зменшується. Причинами цього явища є такі:

пряма деструкція зрілих клітин периферичної крові;

втрата клітин унаслідок геморагії або витоку крізь стінки капілярних судин;

припинення продукції клітин у системі кровотворення. Особливо чутливі до опромінення лімфоцити й тканини лімфатичних вузлів, тимусу та селезінки.

Популяція клоногенних клітин-попередників гемопоетичної строми характеризується гетерогенністю: найчисленнішу групу складають мегакаріоцити, а найменш численну – фібробласти, проліферація яких відбувається дуже повільно, а отже, вони є більш радіостійкими, ніж мегакаріоцити. Ці субпопуляції можуть забезпечувати регенерацію гемопоезу після опромінення у високих дозах.

Крім того, в ураженні системи кровотворення тварин унаслідок дії рідкоіонізуючого випромінювання дуже чітко проявляється ефект потужності поглинутої дози. Це зумовлене клітинним ефектом потужності дози стосовно популяції стовбурових клітин кісткового мозку. Проте внаслідок

Тема: "ВІДПОВІДЬ ТВАРИННОГО ОРГАНІЗМУ НА ОПРОМІНЕННЯ"

дії випромінювань з великими значеннями лінійного передавання енергії (ЛПЕ) ефект потужності дози може й не виявлятися.

Причина загибелі тварини внаслідок кістковомозкового синдрому полягає в нашаруванні вторинних захворювань у відповідь на зменшення клітин периферичної крові.

Гастроінтестинальний та інші синдроми

Причиною розвитку цього синдрому є радіаційне ураження клітинної популяції вистильного епітелію шлунка й кишечника.

Радіаційне ушкодження шлунково-кишкового тракту супроводжується істотним порушенням функцій травлення. Це проявляється в розвитку низки патологічних станів, оскільки вповільнюється або й зовсім припиняється оновлення інтестинальних клітин.

В епітелії тонкого кишечника виділяють п'ять основних типів клітин: циліндричні (або всмоктувальні), келихоподібні, екзокриноцити, екзокриноцити з ацидофільними гранулами (клітини Панета) та ентерохромофіноцити. Початок усім популяціям цих клітин (ентероцитів) дають крипти, в базальній частині яких є стовбурові клітини. У наслідок опромінення стовбурові клітини ушкоджуються, що змінює кінетику клітинних популяцій інтестини й спричиняє прояв гострого радіаційного синдрому.

Функціональні зміни в нервових клітинах відбуваються при опроміненні в порівняно невеликих дозах. Наприклад, навіть при опроміненні в дозах 0,1...0,5 Гр спостерігалось помітне гальмування трансмембранного перенесення натрію – процес, що відображує основну функцію нейронів.

Легені, органи нюху, гортань, глотка, трахея та бронхи є порівняно радіостійкими. У легенях радіаційного ураження зазнають альвеолярні клітини, які щільно оплетені кровоносними капілярами.

Органи внутрішньої секреції – щитоподібна й парашитоподібна залози, гіпофіз, надниркова залоза, ендокринні частини репродуктивних органів – характеризуються значною стійкістю до прямої дії іонізуючої радіації. Функціональні зміни в цих органах унаслідок опромінення зумовлені вторинними процесами в інших тканинах і органах.

Під дією радіації в порівняно невеликих дозах можливий розвиток катаракти – помутніння кришталика ока. Цей процес має тривалий латентний період від кількох місяців до багатьох років. У мишей юдини – 0,20...0,45 Гр. Латентний період катарактогенезу у людини від

6 міс. до 35 років залежно від дози опромінення та значення ЛПЕ. За низьких значень ЛПЕ і доз порядку 2,5...6,5 Гр латентний період складає близько 8 років. Особливо ефективним щодо катарактоутворення є нейтронне опромінення.

Органи слуху належать до порівняно радіостійких. Однією з форм функціонального розладу внаслідок опромінення є втрата здатності орієнтуватися в просторі.

Здебільшого неважко передбачити наслідки опромінення тієї чи іншої частини тіла, аналізуючи відповідні реакції тканин опромінюваного органа та зв'язки цих реакцій із загальнофізіологічними процесами цілісного організму й ураховуючи при цьому впливи неопромінених тканин на опромінені.

Вплив іонізуючих випромінювань на плід людини і тварини

Радіочутливість плоду (а також його окремих органів) набагато вища, ніж людини або тварини в немовлячому й у дорослому віці. У зв'язку із цим ефекти опромінення плоду мають деякі виразні особливості.

У людини після запліднення протягом 9 днів яйце рухається фаллопієвою трубою до матки, де на 11-й день відбувається його імплантація. У цій стадії ембріон є надзвичайно чутливим до дії іонізуючих випромінювань, і дози порядку 0,05...0,15 Гр можуть виявитися для нього летальними. Опромінення в цій дуже ранній стадії впливає на виживаність за правилом "все або нічого", але генетична дія випромінювання є безпороговою.

Стадія основного органогенезу триває з 11-го по 41-й день. Цілком зрозуміло, що опромінення навіть у дуже малих дозах протягом перших двох тижнів вагітності часто спричиняє спонтанні аборти й формування аномалій розвитку.

Між 3-м і 6-м тижнями вагітності, коли формуються головні системи органів, опромінення навіть у малих дозах також може спричинити значні аномалії розвитку.

Оскільки органогенез в ембріона відбувається в певній часовій послідовності, опромінення в різні дні після запліднення завдає більшої шкоди тим групам клітин, які саме в момент опромінення забезпечують формування того чи іншого органа. Тому є певна відповідність між індукованою опроміненням морфогенетичною аномалією та часом опромінення від моменту запліднення.

Тема: "ВІДПОВІДЬ ТВАРИННОГО ОРГАНІЗМУ НА ОПРОМІНЕННЯ"

Після 41-го дня ембріон стає більш радіостійким, хоча й у цей період підвищеною радіочутливістю характеризуються нейробласти та зародкові клітини, тому ІВ може вплинути на формування нервової системи й репродуктивних органів. Наприклад, після ядерного бомбардування міст Хіросіми й Нагасакі у семи жінок з одинадцяти, які, перебуваючи в гіпоцентрі вибуху (відстань від епіцентру менша за 1200 м), зазнали опромінення саме на цьому етапі вагітності, народилися діти з мікроцефалією (істотне зменшення черепа та відповідно головного мозку) та гальмуванням розумового розвитку.

Ушкодження головного мозку належать до типових ефектів опромінення ембріона та плоду й проявляються в мікроцефалії, ментальній нерозвиненості, зниженні здатності до навчання, погіршенні нейромушкульярних зв'язків. Нейрогенез характеризується високоінтегративними процесами індукції органогенезу, утворення нервових клітин та міграції клітин, і ці процеси є дуже радіочутливими.

У людини наприкінці 3-го тижня розвитку плоду формуються субодиниці мозку: стовбурові структури – кора головного мозку й мозочок. Опромінення плоду в цей час навіть за дуже малих доз (порядку 12,5 сГр) негативно впливає на утворення макронервових клітин у вентрикулярному компартменті мозку.

Отже, внаслідок опромінення організму людини на 2–3-му тижнях вагітності підвищується ймовірність летального ефекту, але зменшується ймовірність появи аномалій розвитку.

Опромінення на 4–11-му тижнях вагітності спричиняє значні аномалії у формуванні різних внутрішніх органів. Опромінення на 11–16-му тижнях викликає розвиток мікроцефалії, пригнічення росту плоду й аномалії статевих органів. При опроміненні на 16–20-му тижнях вагітності реєструються помірна мікроенцефалія, затримка розумового розвитку та гальмування росту. В разі опромінення після 30-го тижня морфологічні аномалії розвитку плоду спостерігаються рідше, й на перший план виходять розлади функціонального характеру, наприклад ментальна недостатність.

Прямі й непрямі ефекти опромінення ембріона або плоду досліджують використовуючи екранування окремих частин тіла під час дії іонізуючого випромінювання.

Підвищена радіочутливість зародків та аномалії розвитку залежно від того, на який момент ембріогенезу припадає опромінення, характерні

для різних тварин – як ссавців, так і представників інших класів. Детально вивчено аномалії розвитку й дозові залежності виживаності зародків птахів і риб.

Зародки курчат порівняно радіостійкі в перші два дні насиджування яєць, але їхня радіочутливість різко зростає між 2-м і 9-м днями, потім знову зменшується до 15-го дня насиджування й зростає на 17–18-й день.

У дослідях на собаках показано, що внаслідок опромінення плоду формуються морфологічні аномалії саме тих органів, які в момент дії іонізуючого випромінювання перебували в активній фазі утворення.

Лекція 6

Тема: "ПІЗНІ ЕФЕКТИ ОПРОМІНЕННЯ ТА РАДІАЦІЙНИЙ КАНЦЕРОГЕНЕЗ"

План

- 1. Види пізніх ефектів опромінення.*
- 2. Вплив опромінення на процеси старіння, реакції поведінки, стресову реакцію організму.*
- 3. Біологічні фактори модифікації реакцій ссавців на опромінення: вік, генетична конституція, стать, стан здоров'я, дієта, концентрація кисню в атмосфері, температура.*
- 4. Вплив опромінення на процеси регенерації.*
- 5. Радіаційний канцерогенез.*

Вплив опромінення на процеси старіння

Гістопатологічні зміни, пов'язані з природним старінням, полягають у тому, що кількість і об'єм сполучної тканини із часом збільшуються, тоді як число клітин паренхіми і тонких кровоносних судин зменшується. Унаслідок зазначених явищ відбувається розростання сполучної тканини між клітинами паренхіми й кровоносними судинами: виникає так званий гістогематичний бар'єр, який перешкоджає обміну газами й метаболітами між кров'ю та клітинами інших тканин.

Під час довготривалих спостережень над опроміненими тваринами виявлено, що такі самі гістопатологічні зміни виникають у них в більш ранньому віці, ніж у неопромінених контрольних особин. Цим і зумовлене раннє радіаційне старіння.

Найпоширеніша гіпотеза про механізм старіння організму вбачає причину старіння в нагромадженні в клітинах ушкоджень ДНК (однотипних двониткових розривів, делецій, утрат теломерних ділянок, зшивок ДНК), білку та ін.

Експерименти свідчать про те, що опромінені тварини, навіть коли відбувається відновлення клітин, тканин та їхніх функцій, гинуть раніше,

ніж неопромінені. Для мишей встановлено, що в разі гострого опромінення на кожен 1 Гр дози очікувана тривалість життя скорочується на 5,4 %.

Оскільки відмінних від притаманних природному старінню патологічних явищ як віддалених наслідків опромінення не було виявлено, прискорення старіння отримало назву *неспецифічного скорочення тривалості життя*.

Чим вища загальна доза опромінення, тим більше скорочується тривалість життя тварини. При цьому ефект залежить від способу передавання дози: при фракціонуванні дози він істотно менший, ніж при гострому опроміненні. Так само в разі хронічного опромінення скорочення тривалості життя менше, ніж при гострому опроміненні в такій самій дозі.

У деяких експериментах з опроміненням у малих дозах виявляли, хоча й не дуже значне, але статистично достовірне, збільшення тривалості життя. Для пояснення причин цього явища було висловлено такі припущення: опромінення може мати терапевтичний ефект за вже розвинутих захворювань або радіація діє як профілактичний засіб, запобігаючи новим захворюванням інфекційного характеру.

Показано, що під впливом опромінення в малих дозах активується ретикулоендотеліальна система, що спричиняє деяке зростання числа лімфоцитів і нейтрофілів, які циркулюють у крові.

Вплив опромінення на реакції поведінки

Умовно-рефлекторна функція вищої нервової системи дуже чутлива до дії іонізуючих випромінювань. У разі хронічного опромінення порушення цієї функції виявляється за доз порядку 5...20 сГр. Наприклад, за малих доз (порядку 5...15 сГр) на 1–7-й дні після опромінення спостерігали зниження властивої нормі агресивності територіальної поведінки тварин, які ставали спокійнішими й менш активними, ніж звичайно. Проте такий ефект не виявляли за доз 25...35 сГр. Якщо опромінювали не все тіло тварини, а лише головний мозок, то ефект проявлявся повною мірою.

Водночас зі зміною поведінки зменшувалася концентрація в мозковій тканині серотоніну й 5-гідроксиіндолілоцтової кислоти.

При хронічному опроміненні в синаптичних мембранах виявляють зменшення кількості фосфоліпідів, лізофоефтидилхоліну, фосфатидилетаналаміну, фосфатидилхоліну й холестерину.

Вплив опромінення на стресову реакцію організму. Вважають, що загальний адаптаційний синдром у ссавців пов'язаний з безпосередньою

Тема: "ПІЗНІ ЕФЕКТИ ОПРОМІНЕННЯ ТА РАДІАЦІЙНИЙ..."

стимуляцією гіпоталамічних нервових центрів або з впливом на них адреналіну. Гіпоталамічний контроль над передньою часткою гіпофіза супроводжується збільшенням секреції андренокортикотропного гормону, який стимулює надниркову залозу, що спричиняє посилення секреції з неї. Опромінення стимулює цей процес, що проявляється в змінах кількісних характеристик стресових реакцій організму.

Стійкість тварин до хронічного опромінення

Узагальнення даних про вплив хронічного опромінення на ссавців показує, що за потужності поглинутої дози 10 мГр на добу зміни в популяції тварин можна вважати достовірним явищем.

Дуже часто реакція організму на хронічне опромінення характеризується наявністю плато в розвитку радіаційного ушкодження.

У разі хронічного опромінення тварини, яке спричиняє летальний кінець, час до смерті залежить від потужності поглинутої дози.

Визначення радіостійкості тварин за хронічного опромінення дає змогу передбачати фауністичні зміни, що можуть статися на територіях з підвищеним радіоактивним фоном. Вплив хронічного опромінення на тварин досліджувався переважно на територіях з підвищеним рівнем радіоактивності, де були точкові джерела іонізуючого випромінювання. Наприклад, багаторічні дослідження біологічної дії хронічного опромінення здійснювалися в місцях виходу на поверхню уранових руд, а останнім часом у зоні аварії на ЧАЕС. Хронічне опромінення тварин здебільшого впливає на суцесійні зміни в угрупованнях, що мешкають на забруднених радіонуклідами територіях.

Біологічні фактори модифікації реакцій ссавців на опромінення

Радіостійкість тварин і людини істотно залежить від стану організму в момент опромінення, а отже, й від факторів фізіологічної активності, які називаються біологічними.

Вік. Радіостійкість організму залежить від його віку, причому ця залежність не є лінійною: радіочутливість збільшується в міру втрати клітинами здатності до репарації від ушкоджень, завданих опроміненням, а також до заміни уражених клітин і тканин.

Генетична конституція. Спостерігаються істотні відмінності в радіочутливості різних генетичних ліній тварин. Наприклад, для різних лабораторних ліній мишей значення $LD_{50/30}$ варіює в межах від 5,44 до 6,65 Гр.

Стать. Як правило, особини жіночої статі є радіостійкішими порівняно з чоловічими особинами. У ссавців це пов'язують з впливом тестостерону (чоловічий гормон), що збільшує смертність опромінених рентгеновською радіацією мишей, тоді як естрадіолбензоат (жіночий гормон) зумовлює деяке зменшення загибелі опромінених.

Стан здоров'я. Хворі тварини зазвичай радіочутливіші за здорових. Наприклад, криві кумулятивної смертності для мишей, інфікованих псевдомоцасом і опромінених, та для здорових (неінфікованих) тварин істотно відрізняються.

Дієта. Тварини, яких утримують на повноцінній, збалансованій дієті, характеризуються підвищеною радіостійкістю. Радіочутливість тварин істотно зростає за умов протейнової недостатності раціону харчування. Наприклад, щури на безпротейновій дієті були чутливішими до опромінення всього тіла, ніж тварини, які споживали їжу з протейнами. Тварини, в раціоні яких жири рослинного походження складали 2...10 %, після опромінення жили довше, ніж ті, в раціоні яких містилося 20...30 % жирів або зовсім їх не було. Особливо важливим для збереження високої радіостійкості тварин є забезпечення їх усіма необхідними вітамінами. Тривалість життя опромінених тварин збільшувалася, якщо до раціону в значних кількостях входили також свіжі овочі.

Гормональний статус. Радіостійкість тварин істотно залежить від функціональної активності адреналогіпофізарної системи. Спостерігається пряма залежність між радіостійкістю тварин та їхнім гормональним статусом. Синдром, що пов'язаний з недостатністю адренокортикотропного гормону, подібний до гастроінтестинального: тварина гине внаслідок різкого порушення балансу між концентрацією іонів натрію та рівнем оводнення тканин організму. Як відомо, саме ці параметри перебувають під контролем адреналіну.

Концентрація кисню в атмосфері. Оскільки кисневий ефект є дуже вагомим фактором, що модифікує радіаційне ураження клітин, варіювання кисню в атмосфері спричиняє істотні зміни радіочутливості. Наприклад, для щурів у атмосфері, що містить 5 % кисню і 95 % азоту, $LD_{50/30} = 12...14$ Гр, у той час як в атмосфері звичайного газового складу лише 7 Гр.

Температура. Вплив температури на радіочутливість організму пов'язують з кисневим ефектом, оскільки концентрація кисню в біологічних рідинх залежить від температури.

У теплокровних тварин охолодження тіла нижче за нормальну для них температуру супроводжується підвищенням радіостійкості. Так, унаслідок охолодження тіла новонароджених мишей до температури 5 °С під час опромінення спостерігали зменшення смертності тварин, причому виживаність їх була вдвоє вищою, ніж в опроміненних у такій самій дозі тварин, що утримувалися за кімнатної температури. Охолодження тіла дорослих тварин також справляє радіозахисну дію. Це виявляється у збільшенні значення $LD_{50/30}$ для селезінки й кісткового мозку. Певно, зниження температури впливає на радіочутливість опосередковано – через зменшення в тканинах концентрації кисню.

Радіостійкість у холонокровних тварин також може зростати в умовах низьких температур. Проте смертність цих тварин (наприклад, жаби), спричинена опроміненням, унаслідок зниження температури тіла під час опромінення не зменшується. Це пояснюють тим, що тканини холонокровних тварин задовільно оксигенуються й за низьких температур.

Радіочутливість тварин у стані анабіозу

У разі опромінення тварин у стані анабіозу значення напівлегальної дози не зменшується, але прояв радіаційного ефекту відстрочується. Це було показано в дослідях з байбаком і ховрахом. Коли навесні з підвищенням температури відновлюється активність тварин, у них розвивається типовий променевий синдром. В анабіозі дихальні й циркуляторні процеси не гальмуються, а отже, тканини оксигенуються цілком задовільно, проте знижується метаболічна активність, що, певно, й відстрочує прояв радіаційних ушкоджень систем організму.

Вплив опромінення на регенерацію у тварин

Це явище досліджено на амфібіях (тритонах, саламандрах, аксолотлях). У разі ампутації хвоста в цих тварин за порівняно короткий період часу рана загоюється й починається формування нового органа. Якщо ж перед ампутацією орган опромінювали у великій дозі, то регенерація не відбувалася. Якщо опромінювали дистальну (віддалену від тіла) частину хвоста, а ампутацію робили в проксимальній (близькій до тіла) частині, то орган повністю регенерувався завдяки активності клітин неопроміненої проксимальної частини. Разом з тим, у випадку опромінення проксимальної частини хвоста й ампутації екранованої дистальної частини остання знову відростала, хоча й межувала з опроміненою проксимальною частиною.

У разі опромінення органа, що регенерує після ампутації, процес не завершується формуванням морфологічно нормальної структури. Якщо ж орган відновився морфологічно цілком нормальним, то після ампутації вдруге він не регенеруватиме. Часом спостерігають процес дедиференціації клітин, що супроводжується руйнуванням новоутворених тканин, унаслідок чого орган скорочується до стану "бруньки".

У найпростіших (Protozoa) після відрізування передньої половини клітини спостерігається її відновлення. У багатьох найпростіших у цій передній частині розташована ротова частина, й поява трофічної вакуолі є свідченням регенерації втраченої частини клітини. Якщо опромінювати задню частину розрізаної клітини, то розвиток трофічної вакуолі вповільнюється. Для чіткого ефекту треба застосовувати дози 200...800 Гр, які досить близькі до летальної – 1000 Гр.

У ссавців зручним для дослідження регенерації органом є печінка, яка відновлюється після гепатектомії. Опромінення організму затримує й синтез ДНК, і мітози. Якщо здійснити гепатектомію навіть через кілька днів або тижнів після опромінення регенерація печінки вповільнюється.

Радіаційний канцерогенез у людини

Протягом ста років, що минули після відкриття рентгенівських променів, нагромаджено багато різноманітних даних, які однозначно свідчать: опромінення людини спричиняє зростання частоти захворювань на злоякісні пухлини різної локалізації. Так, у радіологів початку ХХ століття часто розвивався рак шкіри. Випромінювання радону та його дочірніх радіоактивних елементів є причиною підвищеної частоти розвитку раку легенів у працівників уранових копалень. Серед радіологів частіше, ніж у середньому для людської популяції, трапляється й захворювання на лейкемію.

Злоякісні пухлини поділяють на два типи: *карциноми* – пухлини, що виникають унаслідок злоякісного переродження (малігнізації) епітеліальних тканин, і *саркоми*, які утворюються внаслідок малігнізації мезенхімних тканин (м'язи, хрящі, кістки, сполучні тканини). У межах цих типів розрізняють пухлини відповідно до їх гістологічного походження.

Більшість злоякісних пухлин виникає з однієї ініціальної клітини, яка зазнала злоякісної трансформації. Вважають, що початковим етапом у радіаційному канцерогенезі є поява мутації критичного онкогена або гена-супресора пухлини. Частота таких прямих мутацій доволі низька –

Тема: "ПІЗНІ ЕФЕКТИ ОПРОМІНЕННЯ ТА РАДІАЦІЙНИЙ..."

$10^{-5} \dots 10^{-7}$. Виникають вони під час реплікації або репарації ушкодженої внаслідок опромінення ДНК. Крім того, в ініціальній клітині мають нагромадитися додаткові мутації шести-восьми генів, щоб клітина стала цілком злаякісною. Оскільки такі мутації виникають незалежно одна від одної та ймовірність їх появи також невелика, постає запитання: як одинична клітина може нагромадити всі ці мутації протягом життя організму? Висловлено припущення, що ініціальним критичним кроком у радіаційному канцерогенезі є індукція генетичної нестабільності в досить значній частині клітинної популяції. За генетичної нестабільності зростає ймовірність появи в клітинній популяції повністю трансформованих клітин.

Індукована опроміненням трансформація клітин відбувається під впливом деяких хімічних реагентів – коканцерогенів (наприклад, пірену).

Збільшення абсолютної частоти пухлиноутворення пов'язують з дійсною їх індукцією.

У радіаційному канцерогенезі проявляється *кумулятивний ефект дози*, коли відбувається сумація ефектів від послідовно здійснюваних опромінь. Так, чіткий прояв кумулятивності має індукована опроміненням лімфома у мишей: одноразове опромінення в дозі 4,75 Гр виявилось значно менш ефективним, ніж фракціоноване чотириразове опромінення в однаковій дозі з чотириденними інтервалами часу між фракціями. Можливо, індукція пухлини цієї форми має пороговий характер, оскільки внаслідок опромінення мишей у дозі 2,83 Гр істотної відмінності частоти появи лімфоми від контролю не реєстрували, а при дозі 4,75 Гр виявили 41 % лімфом. Фракціонування дози спричинило подвоєння частоти розвитку лімфом.

Щодо радіаційної індукції раку молочної залози в щурів пороговості не виявлено, й залежність частоти розвитку пухлин від дози має лінійний характер.

Кількісно радіаційний канцерогенез характеризують частотою прояву на одиницю дози. Цю величину називають *ризиком канцерогенезу*.

У більшості пухлин людини є терапевтично резистентні гіпоксивні клітини, які не виявляються в аномальних тканинах. Ідентифіковано різні типи стресових гіпоксивних білків. У гіпоксивних клітинах виявлено різні фактори транскрипції, які сприяють експресії протоонкогенів та генів-супресорів пухлини.

Лекція 7

Тема: "РАДІОСТІЙКІСТЬ ВИДІВ, ЩО НАЛЕЖАТЬ ДО РІЗНИХ ТАКСОНІВ. РАДІОЧУТЛИВІСТЬ РОСЛИН"

План

- 1. Радіостійкість вірусів, бактеріофагів, бактерій, грибів, рослин та тварин.*
- 2. Радіочутливість рослин. Критичні органи вищих рослин.*
- 3. Надходження радіонуклідів у рослини з різних типів ґрунтів.*
- 4. Радіоактивне забруднення тварин.*
- 5. Радіостійкість видів і філогенез.*

Найповніше досліджено вплив іонізуючих випромінювань на бактеріофаги, які порівняно легко виділяти й очищувати, дістаючи суспензії фагових частинок високих титрів. Розрізняють три основних типи негативного ефекту опромінення: інактивація вірусної частинки (*летальний ефект*); зміна властивостей культури вірусу щодо її вірулентності без генетичних наслідків (*нелетальний ефект*); *нелетальний мутагенний ефект*.

Інактивація вірусів, яку характеризують залежністю виживаності від дози опромінення, в умовах прямої дії радіації здійснюється за експоненціальною кривою, що свідчить про одноударну інактивацію. Проте характер інактивації вірусів істотно залежить від умов опромінення, які визначають співвідношення між прямою та непрямою дією радіації. При опроміненні в концентрованому бульйоні або в разі додавання в середовище радіопротекторів (цистеїну, цистеаміну), коли вільні радикали продуктів радіолізу води, що виникають, перехоплюються й не досягають вірусних частинок, переважає пряма дія радіації; при опроміненні в буфері або у воді основну роль відіграє непряма дія радіації.

Криві дозових залежностей виживаності свідчать про те, що мішенню є нуклеїнова кислота вірусу. Тому відносні молекулярні маси вірусів, визначені за кривою дозової залежності виживаності, збігаються з добутими за допомогою інших фізико-хімічних методів. При цьому для бак-
70

Тема: "РАДІОСТІЙКІСТЬ ВИДІВ, ЩО НАЛЕЖАТЬ ДО РІЗНИХ ..."

теріофагів з односпіральними РНК або ДНК співвідношення між відносними молекулярними масами, визначеними за теорією мішені та іншими методами, дорівнює одиниці. У вірусі з двоспиральною ДНК це співвідношення менше за одиницю. Це свідчить про те, що одониткові розриви є потенційно летальними, й вони не всі реалізуються інактивацією вірусної частинки.

Радіостійкість бактерій та грибів

Бактерії є класичним об'єктом для генетичних, біохімічних та радіобіологічних досліджень, оскільки їхні біологічні властивості дають змогу з належною точністю з'ясовувати природу окремих елементарних процесів, на які значно меншою мірою нашаровуються вторинні зміни, ніж це спостерігається в складніше організованих клітинах.

Радіостійкість різних видів бактерій LD_{90} , Гр, варіює в дуже широких межах, що видно з наведених нижче даних (при опроміненні гамма- або рентгенівською радіацією):

<i>Micrococcus radiodurans</i>	10 000
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	20
<i>Streptomyces flaveolus</i>	460
<i>Haemophilus influenza</i>	120
<i>E. coli</i> B	110
<i>E. coli</i> B/Г	100
<i>E. coli</i> B ₈₋₂	36

Ці дані відносні, оскільки значення LD_{90} істотно залежить від стану культури в момент опромінення, й тому різні дослідники діставали неоднакові кількісні характеристики радіостійкості бактерій.

Характер дозових залежностей виживаності для різних видів бактерій дуже відрізняється: для радіостійких видів на кривій виживаності є велике "плече", для радіочутливих – це прості експоненти. Радіостійкість клітин деяких видів взагалі залежить від умов, у яких перебувають клітини в момент опромінення. Найвищу радіостійкість клітини мають у замороженому стані ($LD_K = 21$ кГр).

На бактерії *Micrococcus radiodurans*, що характеризується надзвичайно низькою радіочутливістю, досліджують природу тих процесів, від яких залежить унікально висока радіостійкість. Ця бактерія має досить великі клітини, з'єднані в групи по дві-чотири, й утворює рожеві колонії на твердому середовищі. Виявляють мікрокок у м'язах та шкірі тварин.

У стані спори бактеріальні клітини виявляють високу стійкість до різних факторів, зокрема й до іонізуючого випромінювання. Наприклад, для спор *Bacillus subtilis* летальна доза вдвоє вища, ніж для вегетативних клітин.

Численні дослідження, проведені на бактеріях, остаточно довели основне положення радіобіології про те, що ДНК хромосоми є мішенню для дії іонізуючого випромінювання. Разом з тим було показано, що радіостійкість контролюється генетичними системами. Так, з'ясувалося, що в культурах *E. coli* спонтанно із частотою порядку 10 виникають радіостійкі мутанти, які відселектовуються внаслідок дії ультрафіолетового випромінювання.

Було виділено й надчутливі до дії іонізуючих випромінювань (ультрафіолетового, гамма- й рентгенівського) мутанти цієї бактерії. Підвищена радіочутливість клітин корелює з порушеннями процесів життєдіяльності. Згідно з класифікацією радіочутливих мутантів *E. coli* розрізняють такі типи мутантів:

- після опромінення втрачають здатність до поділу й клітини утворюють довгі ниткоподібні форми – *філаменти*;

- після опромінення втрачають здатність реактивувати фаги, інактивовані ультрафіолетовим випромінюванням;

- характеризуються підвищеною чутливістю до дії ультрафіолетового випромінювання;

- мають підвищену чутливість як до ультрафіолетових променів, так і до більш жорсткого ІВ;

- мають підвищену чутливість до ультрафіолетового й гамма-випромінювання; для них характерне порушення механізму генетичної рекомбінації.

Особливості розмноження грибів та організації ядерного апарату їхніх клітин зумовлюють досить високу радіостійкість цих організмів.

Радіоактивне забруднення рослин

Радіоактивне ураження рослин проявляється в гальмуванні росту, зниженні врожайності, репродуктивної якості насіння, а при великих дозах викликає загибель рослин.

Рослини можуть забруднюватися двома шляхами: аерозольним (некореневий шлях) і кореневим (грунтовий шлях надходження).

Особливість некореневого шляху надходження полягає в тому, що при безпосередньому осіданні радіоактивних частинок з різних шарів

Тема: "РАДІОСТІЙКІСТЬ ВИДІВ, ЩО НАЛЕЖАТЬ ДО РІЗНИХ ..."

атмосфери відбувається забруднення надземної маси рослин усіма РН, що випадають.

Радіоактивні частинки неповністю затримуються на рослинах. Ступінь затримання радіоактивних частинок рослинами характеризується величиною первинного затримання: відношенням кількості осілих на рослинах радіоактивних частинок до загальної їх кількості, яка випала з атмосфери на даній площі.

Коефіцієнт первинного утримання розраховується як

$$K_{п. у} = \zeta_p / \zeta_v,$$

де ζ_v – густина випадань (кількості радіоактивності, що випала на одиницю площі посіву або травостою); ζ_p – густина радіоактивного забруднення надземної маси рослин (кількості радіоактивності в надземній масі з одиниці площі посіву).

Різні сільськогосподарські культури мають неоднакову здатність до утримання радіоактивних опадів з атмосфери, що зумовлено як специфікою морфологічної будови рослин, так і ступенем розвитку надземної маси. (Морфологія та будова рослин: форма, розміри, розташування листя, ступінь шорсткості їх поверхні.)

Коефіцієнт первинного утримання може змінюватися в дуже широких межах – від кількох до 95 %.

Так, $K_{п. у}$ мають пшениця яра 71 %, просо 51 %, горох 74 %, гречка 39 %, картопля 25 %.

Неоднаковою здатністю до утримання радіоактивних опадів характеризуються не тільки різні види сільськогосподарських культур, але й різні частини та органи однієї і тієї ж рослини. Так, для ярої пшениці первинне утримання складає: для листя 41 %, для стебел 18 %, для половини 11 %, для зерна 0,6 %.

Вміст РН в одиниці маси зерна залежить від строків їх випадання. Найбільша концентрація РН у зерні спостерігається при їх випаданні в період цвітіння і молочної спілості, більш низька у фазі кушіння і виходу в трубку.

Найбільш чутливі до радіації в різних фазах розвитку квасоля, кукурудза, жито, пшениця; більш стійкі – льон, конюшина, люцерна, рис, томати. Це зумовлено перш за все тим, що колосся, яке вже з'явилося, має високу здатність до утримання радіоактивних опадів, і частково тим, що в період наливання зерна відбувається відтік поживних речовин з вегетативних органів у зерно.

Випадання ^{90}Sr з атмосфери на поверхню рослин практично не забруднює зерно сільськогосподарських культур із закритим насінням (горох, кукурудза). Бульби картоплі й коренеплоди столового і цукрового буряків також виявляються практично чистими, тому що стронцій при попаданні на листя дуже слабо проникає всередину рослин.

Однак випадання аерозольних частинок ^{90}Sr з атмосфери на деякі рослини дуже небезпечне. Це перш за все овочеві культури. Томати, огірки, капуста, листові овочі можуть сильно забруднюватися.

При випаданні з атмосфери ^{137}Cs не тільки механічно забруднює урожай, але й інтенсивно проникає в тканини надземних органів рослин, включається в метаболізм, переміщується всередині рослини і накопичується в урожаї. Досить інтенсивно рухається всередині рослини при попаданні на її поверхню ^{131}I . Незважаючи на порівняно короткий період напіврозпаду, цей РН може проникати з кормом тварин у молоко, а через молоко – в організм людини.

Надходження радіонуклідів у рослини залежно від їхніх фізико-хімічних властивостей

Механізм засвоєння РН корінням рослин подібний до поглинання основних поживних речовин макро- і мікроелементів.

Головна відмінність полягає в тому, що здебільшого РН у зовнішньому середовищі наявні в гранично низьких концентраціях. Наприклад, стронцію 90 міститься $1,4 \cdot 10^{-12} \text{ г} \cdot \text{кг}^{-1}$ ґрунту, а маса 1 Кі ^{90}Sr складає $7 \cdot 10^{-3} \text{ г}$.

Цезій ^{137}Cs є хімічним аналогом калію, а ^{90}Sr – кальцію, тому спостерігається певна подібність поглинання рослинами і пересування по них К, Са та їх хімічних аналогів Cs і Sr.

Найбільше поглинається рослинами з поживного розчину ^{137}Cs , значно менше – ^{90}Sr . Таких РН, як ^{60}Co , ^{106}Ru , ^{144}Ce , ^{147}Pm , надходить з водного розчину в надземну масу рослин у 10 разів менше, ніж Cs і Sr.

При просуванні РН по різних органах надземної частини рослин зберігається певна закономірність. Радіонукліди, що надійшли в надземну частину рослин, переважно концентруються в соломі (листя, стебла), менше – у полові (колосся, волоття зерна) і в невеликих кількостях – у зерні. Деякий виняток із цієї закономірності складає цезій, відносний вміст якого в насінні може досягати 10 % і вище загальної кількості його в надземній частині.

Загалом накопичення РН і їх вміст на одиницю маси сухої речовини в процесі росту рослин має таку ж закономірність, як і накопичення біологічно важливих елементів: з віком рослини у надземних органах збільшується абсолютна кількість РН і знижується вміст на одиницю маси сухої речовини.

При збільшенні врожаю, як правило, зменшується вміст РН на одиницю маси.

Надходження радіонуклідів у рослини з різних типів ґрунтів

Забруднення продукції рослинництва (ступінь засвоєння) РР залежить від специфіки шару ґрунту, тобто від типу і властивостей ґрунтів, на яких зростають рослини.

Найбільш високі рівні забруднення стронцієм спостерігаються на дерново-підзолистих ґрунтах, менші – на сірих лісових ґрунтах і сіроземах та найнижчі – на чорноземах. Аналогічна залежність встановлена і для цезію.

Велика різноманітність ґрунтів у нашій країні визначає значну різницю в поведінці РН у ґрунтах і накопиченні їх у рослинах. Тому концентрація РН у рослинах на різних ґрунтах в різних ґрунтово-кліматичних зонах країни при одному й тому ж рівні забруднення може різнитися в 10 разів.

Існує прямо пропорційна залежність між щільністю забруднення місцевості та накопиченням РН у рослинній продукції.

Надходження радіонуклідів у рослини залежно від їхніх біологічних особливостей

Розмір накопичення РН у рослинах залежить від їхніх видових і сортових особливостей. Рослини, які утримують більше кальцію, накопичують ^{90}Sr більше, а рослини, що відрізняються високим вмістом калію, накопичують більше ^{137}Cs .

У товарній частині рослинницької продукції найбільше ^{90}Sr і ^{137}Cs містять коренеплоди (столовий буряк, морква) і бобові культури (горох, соя, вика), далі картопля, менше РН у зернових злаках.

За накопиченням ^{90}Sr на одиницю сухої речовини овочеві культури можна розташувати в такому порядку: буряк, огірки, морква, капуста, томати, картопля.

Дослідженнями встановлено, що діапазон накопичення ^{137}Cs в зерні різних сільськогосподарських культур різкий. Так, у зерні квасолі цезію

на одиницю маси міститься в 3–5 разів менше, ніж у зерні гороху і вівса. Видова відмінність у накопичуванні цезію окремими сортами пшениці, вівса, квасолі та гороху на одиницю маси зерна може досягати 10, а сортова складає 1,5–2,0 рази.

Значно відрізняються вмістом РН озимі та ярові зернові культури. Озимі (пшениця, жито), як правило, накопичують у 2,0–2,5 рази менше ^{90}Sr і ^{137}Cs , ніж ярові зернові культури (пшениця, овес, ячмінь). Це пояснюється більш високим урожаєм озимих порівняно з яровими.

Овочі здебільшого надходять у їжу без переробки, тому їх споживання становить певну небезпеку. Стронцій ^{90}Sr найбільше накопичується в коренеплодах степового буряка, моркви, огірках і найменше – у плодах томатів і бульбах картоплі, що певною мірою пов'язано з концентрацією кальцію в цих частинах урожаю.

Менший вміст ^{90}Sr у бульбах картоплі, ніж у коренеплодах буряка і моркви, пояснюється, очевидно, тим, що коренеплід – це видозмінений корінь, через який РН надходять з ґрунту в рослину; бульба ж картоплі – видозмінене стебло, і РН можуть надходити з ґрунту в надземну частину рослини, обминаючи бульби. У зовнішній частині бульби картоплі (коркова тканина) міститься в 3 рази більше ^{90}Sr на 1 г сухої маси, ніж у решті бульби.

У природних умовах у багатьох продуктах харчування містяться РР. Наприклад, в 1 кг свіжої картоплі міститься близько $2,9 \cdot 10^{-9}$ Кі радіоактивного калію.

Забруднення харчових продуктів рослинництва, що сталося при завоюванні РН кореневою системою і проникненні з атмосфери через поверхню, можна визначити кількісно. Концентрацію РН у рослинних продуктах визначають за формулою

$$C = C_r \cdot K_r - C_n \cdot K_n,$$

де C_r – вміст РН у ґрунті, $\text{мКі} \cdot \text{м}^{-2}$; C_n – інтенсивність осідання РН з атмосфери, $\text{мКі} \cdot \text{м}^{-2}$; K_r і K_n – ґрунтовий і повітряний коефіцієнти, що встановлюються шляхом дослідів.

Ґрунтовий коефіцієнт K_r виражає концентрацію відповідних РН у рослинній продукції на одиницю щільності забруднення ґрунту. Наприклад, K_r ^{90}Sr для основних харчових продуктів рослинного походження має такі значення: для пшениці – 7, картоплі – 16, цукрового буряка – 6. Середньоквадратичне відхилення від наведених цифр не перевищує 25 %. Величина K_r значною мірою залежить від природи РН.

Для відносної оцінки вмісту РН у раціоні людини і в кормах тварин необхідно знати розміри порівняльного їх накопичення в господарсько-цінній частині врожаю.

Радіоактивне забруднення тварин

Радіонукліди можуть надходити в організм тварин через органи дихання, шлунково-кишковий тракт і поверхню шкіри. Однак потенційний внесок кожного із зазначених шляхів далеко не однаковий.

Якщо в період радіоактивних опадів худоба знаходиться на пасовищі, то надходження РН може скласти (у відносних одиницях): через ШКТ – 1000, органи дихання – 1, шкіру – 0,0001.

На пасовищі корова протягом доби з'їдає траву з площі 100...300 м². При цьому з травою вода споживає велику кількість радіонуклідів.

Науковий комітет ООН щодо дії атомної радіації підкреслює, що продукти тваринництва належать до основних джерел надходження РН до організму людини.

У багатьох країнах молоко виявлялося головним джерелом (на 70...90 %) надходження ¹³¹I.

Молоко, м'ясо і продукти їх переробки є основним постачальником ¹³⁷Cs (на 60...80 %) до організму людини. Продукти тваринництва містять звичайно до 40...60 % ⁹⁰Sr, що надходить до організму людини з раціоном.

Основне значення має фактор радіоактивного забруднення кормів. На забрудненій території споживання питної води не вносить істотних змін у загальне надходження РН до ШКТ тварин. Як приклад можна навести матеріали, опубліковані після аварії на ЧАЕС. У період аерозольного викиду (квітень–травень 1986 року) максимальна концентрація РН у воді р. Прип'ять, яка протікала на відстані 1,5...2,0 км від пром-майданчика АЕС, дорівнювала 10⁻⁷ Кі · л⁻¹, а після закінчення радіоактивних викидів (липень–серпень 1986 року) концентрація бета-випромінювання у воді знизилася до 10⁻⁹...10⁻¹⁰ Кі · л⁻¹.

Іншими словами, в зоні радіоактивного забруднення надходження РН з питною водою завжди буде на декілька порядків нижчим, ніж з кормами, одержаними на прилеглий водозбиральній території.

При однаковій щільності забруднення території (1 Кі · км⁻²) забруднення кормів ⁹⁰Sr на порядок вище, ніж ¹³⁷Cs.

Накопичування і розподіл радіонуклідів в організмі тварин

Враховуючи те, що ^{90}Sr і ^{137}Cs є хімічними аналогами кальцію і калію, накопичення їх в основному визначається розподілом цих елементів в організмі тварин.

Найбільш висока концентрація ^{90}Sr виявляється в скелеті, тоді як у м'яких тканинах і органах вона в десятки разів нижча. При цьому концентрація в таких органах, як печінка, легені, нирки, у 2–5 разів вища, ніж у м'язах.

На відміну від ^{90}Sr радіонукліди ^{137}Cs розподіляються в організмі більш рівномірно. З урахуванням введеної кількості на 1 кг тканини ^{137}Cs трохи більше відкладається в печінці та нирках. Характерна його особливість – висока швидкість обміну в організмі. Так, 55 % РН цезію-137 виводиться з м'язів з ефективним періодом напіввиведення 46,2 доби.

Радіонуклід ^{132}I концентрується в щитовидній залозі. Вважається, що при пероральному надходженні РН йоду у щитовидній залозі затримується близько 30 % введеної кількості. Приблизно така ж кількість РН йоду затримується в організмі, і 60...70 % РН затримується в м'яких органах і тканинах, частково виводиться з організму, а частково переходить у щитовидну залозу. Врешті-решт на 144-й день у щитовидній залозі виявляється близько 18 % введеної кількості йоду (з урахуванням розпаду), а в інших органах і тканинах – близько 14 %.

Тривале надходження РН – це поширений варіант надходження. Найбільш інтенсивно РН накопичуються в молодому віці. Відкладення ^{90}Sr залежить від рівня кальцієвого харчування. Насичення кальцієм раціону дозволяє знизити накопичування ^{90}Sr в скелеті приблизно в 2–4 рази. Закономірності накопичування ^{137}Cs в організмі тварин мають багато спільного із закономірностями відкладення ^{90}Sr .

При хронічному надходженні РН їх відкладення в організмі поступово збільшується, далі настає стан рівноваги.

На відміну від ^{90}Sr , для ^{137}Cs характерне швидке встановлення рівноважного стану, приблизно протягом 1–2 місяців після початку надходження (для ^{90}Sr 3–4 місяці).

Рівноважний стан – це стан, коли кожна нова порція РН при надходженні в органи і тканини зрівноважується радіонуклідами, які виділяються з організму.

Різні види організмів значно відрізняються за своєю здатністю витримувати великі дози опромінення.

Загалом ссавці мають найбільшу чутливість, а мікроорганізми – найбільш стійкі.

Найбільш чутливі до опромінення клітини, які діляться (цим пояснюється зниження чутливості з віком).

Радіостійкість видів і філогенез

Незважаючи на різноманітність рівнів радіочутливості видів у межах будь-якого таксона, все ж простежуються відмінності між великими таксонами щодо властивих їхнім представникам рівнів радіостійкості. Наприклад, найрадіостійкіші види трапляються серед бактерій і синьо-зелених водоростей. Висока радіостійкість властива частині видів найпростіших.

Розглядаючи загальноприйнятту схему еволюції живого світу, можна побачити, що в давніх таксонів, які сформувалися на початкових етапах еволюції, радіостійкість видів, які до них належать, вища, ніж у видів більш просунутих таксонів. Це пов'язують і з тим, що становлення давніх таксонів відбувалося за тих часів історії Землі, коли природна радіоактивність земної кори була вищою, ніж в останній мільярд років.

У дуже давні періоди історії нашої планети радіоактивність була вищою за рахунок переважно ізотопу калію К (що достатньо просто обчислити за константою його розпаду), а також частково за рахунок важких радіоактивних елементів. Є підстави вважати, що через несформованість атмосфери в ті часи була істотно більшою інтенсивність ультрафіолетових і космічних променів.

За умов підвищених рівнів іонізуючого, ультрафіолетового, космічного випромінювання й радіоактивності відбувався доклітинний етап біохімічної еволюції, коли виникали первинні біомакромолекули, ускладнювалася їхня структура й функції та робилися перші кроки в еволюції протобіонтів і прокаріот. Певно, за тих дуже давніх часів доклітинної й початкової клітинної еволюції виникла система репарації ДНК, яка є необхідною для закріплення й стабілізації нуклеотидних послідовностей, що виникли в ході еволюції й сприяють удосконаленню біологічних систем. Не виключено, що й подвійна спіраль ДНК усталилася як така структурна організація геному, яка вможливорює репарацію. Оскільки формування систем репарації ДНК підвищувало рівень організації та життєздатність живих систем, його слід розглядати як важливий ароморфоз (перетворення будови й функцій систем клітини й організму), що

зумовив прогрес в еволюції видів. У пізніші часи такими ароморфозами, крім зазначених, були формування ядра в еукаріот, ускладнення структури хроматину й геному, виникнення поліалельності та систем міжклітинних взаємодій, що регулюють репопуляційне відновлення, тощо.

Лекція 8

Тема: "ПРОЦЕСИ ПЕРЕНОСУ РАДІОНУКЛІДІВ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ ЯДЕРНОЇ ЗБРОЇ, АВАРІЯХ ТА ЇХНЯ МІГРАЦІЯ"

План

- 1. Наслідки випробувань ядерної зброї.*
- 2. Експлуатація реакторів та Чорнобильська катастрофа. Процеси переносу.*
- 3. Очищення повітря від радіоактивних забруднень.*

Наслідки випробувань ядерної зброї

За період з 1945 по 2000 рік здійснено більше 400 ядерних вибухів у атмосфері. Найінтенсивніше випробування ЯЗ проводилися в 1957–1962 роках (здійснено 128 вибухів атомних бомб, серед яких були дуже потужні). Сумарна активність наступних випробувань була приблизно в чотири рази меншою за радіоактивністю, що інжектвана в атмосферу внаслідок цих випробувальних вибухів.

Випробування атомної зброї супроводжуються викидами великої кількості різних РН, що виникають унаслідок поділу урану, а також у ядерних реакціях за участі нейтронів.

Радіонукліди, що потрапляли в атмосферу внаслідок вибухів атомних бомб, розносилися вітрами по всій земній кулі й, урешті-решт, випадали на поверхню Світового океану та континентів, забруднюючи води, ґрунти, рослинність. Ці радіоактивні опади належать до так званих глобальних. Найінтенсивнішими вони були в середніх широтах Північної півкулі (випробування зброї колишнім СРСР). Південна півкуля забруднена глобальними радіоактивними опадами, які супроводжували випробування атомної зброї США.

Щільність поверхневого забруднення територій континентів (поверхневу активність) виражають у бекерелях на квадратний метр (Бк/м²). Оскільки випадання РН на поверхню Землі було тісно пов'язане з метеорологічними умовами під час поширення радіоактивних хмар,

інтенсивність глобальних радіоактивних опадів у тих або інших місцях була неоднаковою. Тому забруднення носили плямистий характер.

Зберігання руди та інших матеріалів, які утворюються в ході вилучення урану, також супроводжується радіоактивним забрудненням атмосфери. Зокрема, залишки урановмісних порід після флотаційного відокремлення збагачених ураном фракцій є досить потужним джерелом радіоактивних речовин, які розсіюються в довкіллі в регіонах розвитку уранодобувної промисловості. До найнебезпечніших елементів, що потрапляють у довкілля в ході цих технологічних процесів, належать радон, ^{210}Pu і ^{210}Pb .

Уран і радіоактивні продукти його розпаду потрапляють у довкілля також у ході технологічних процесів підготовки мінеральної сировини для добування ядерного палива. Експлуатація реакторів неодмінно супроводжується викиданням у довкілля РН, які входять до продуктів поділу урану, а також виникають унаслідок ядерних реакцій, що здійснюються за участі потоків нейтронів. До цих активованих нейтронами довгоіснуючих радіонуклідів належать ^{60}Co , ^{14}C , ^3H та деякі інші, які виявляються в зоні розташування атомних реакторів. Наведена радіоактивність з'являється в матеріалах, ядра атомів яких вступають у ядерні реакції за участі нейтронів, зокрема в контурі омолодження активної зони реактора. Серед продуктів поділу урану є благородні гази, наприклад ^{85}Kr і ^{133}Xe . Запобігти потраплянню їх у повітряне середовище дуже важко. Викидаються в довкілля також ізотопи йоду. Радіонукліди різняться здатністю дифундувати з ядерного палива: найвищою дифузійною здатністю характеризуються Cs, I, Xe, Kr, Rb, Br, Te, Mo, найнижчою – Sr, Ba, Zr, Ce, а також рідкісноземельні елементи.

Переробляється лише незначна частина відпрацьованого ядерного палива. Решта ж зберігається в тимчасових сховищах (до ухвалення рішень щодо технології довготривалого зберігання радіоактивних матеріалів). Перебування дедалі більшої кількості радіоактивних відходів атомної енергетики в тимчасових сховищах і невирішеність питань надійного й довготривалого їх зберігання – це гострі проблеми, що мають екологічні й політичні аспекти. Не менш нагальною є проблема транспортування радіоактивних матеріалів для ядерного паливного циклу.

Чорнобильська катастрофа

На Чорнобильській АЕС (ЧАЕС) 26 квітня 1986 року сталася аварія, яка за масштабами викиду з довкілля радіоактивних речовин не має ана-

Тема: "ПРОЦЕСИ ПЕРЕНОСУ РАДІОНУКЛІДІВ ПРИ..."

логів у світі. Аварія була наслідком недосконалості власне конструкції реактора (РБМК-1000) та істотних відхилень у режимі його експлуатації. Катастрофа розпочалася різким зростанням нейтронного потоку, збільшенням енерговиділення, що призвело до руйнування активної зони реактора, диспергування ядерного палива й різкого підвищення температури. При цьому утворилися суміші речовин, які спричинили потужні вибухи, що вщент зруйнували реактор, який і розгерметизувався, у зв'язку із чим розпочалося виділення РР у довкілля. Утворився струмінь, який піднявся на висоту до 1,5 км й виносив з кори реактора оксиди, карбіди й атомарні форми продуктів поділу урану й радіоактивних речовин, що виникли під впливом нейтронів. У струмені були й аерозольні частинки, в яких також містилися радіоактивні речовини. Струмінь з реактора, що мав дуже високу температуру, діяв як своєрідна термохімічна колонка, в якій відбувалося певне розділення різних радіонуклідів. Із цього радіоактивного струменя вітром відокремлювалися з різних висот маси радіоактивних речовин, які у радіоактивних хмарах розносилися в різних напрямках, й за напрямом руху окремих радіоактивних хмар радіонукліди випадали на поверхню Землі, забруднюючи території. Під час аварії у зруйнованому реакторі тривала ланцюгова реакція, а викиди РН були дуже інтенсивними протягом 10 діб, поки жерло, крізь яке виривався струмінь, не було відповідним чином засипано.

Під час аварії в атмосферу було викинуто до 100 % радіоактивних благородних газів, 20...50 % ізотопів йоду, 12...30 % ^{134}Cs , ^{137}Cs і 3...4 % менш легких радіонуклідів від їх умісту в реакторі на момент аварії.

Зміни метеорологічних умов під час викидів з реактора радіоактивних матеріалів зумовили складну картину забруднення великих територій не лише в Україні, Білорусі й Росії, а також у багатьох країнах Європи.

Рух радіоактивних хмар, з яких РН у складі опадів потрапляли на поверхню Землі, спричинив формування так званих слідів. Найчіткіше проявився західний слід, що являє собою вузьку лінію, яка тягнеться до Польщі. Другим за інтенсивністю радіонуклідного забруднення є північний слід. Проте він набагато ширший, ніж західний, і тому загальна активність радіонуклідів тут істотно вища. З цим слідом пов'язане забруднення радіонуклідами країн Скандинавії. Широкий, віялоподібний є південний слід. Формування східного сліду зумовило забруднення кількох областей Росії. Зони з підвищеними активностями радіонуклідів утворилися

також на територіях Швеції, Фінляндії, Німеччини, Австрії, Швейцарії, Греції, Болгарії, Румунії, Грузії.

Радіонуклідний склад забруднень, що виникли за різними слідами, неоднаковий, хоча спостерігається деяка кореляція між умістом ізотопів Pu й ^{241}Am та щільністю забруднення ^{90}Sr .

Оскільки осідання радіонуклідів на поверхню Землі було значнішим у тих місцях, де під час проходження радіоактивних хмар випадали дощі, забруднення мають чітко виражений плямистий характер. Фізико-хімічні особливості радіонуклідних опадів були неоднаковими: певні РР перебували в стані так званих гарячих частинок – частинок гратчастої структури паливного матеріалу або цирконію, які містили продукти поділу. Із часом РН, які потрапили в довкілля (у водойми, рослини, ґрунти), додалися до речовин, що беруть участь у біогеохімічних перетвореннях, у русі трофічними ланцюгами. При цьому створилися умови, за яких зростає потужність дози зовнішнього й внутрішнього опромінення людей, які проживають на забруднених РН територіях. Зовнішнє опромінення зумовлене тим, що збільшилася концентрація РР, насамперед радіонукліда ^{137}Cs , який випромінює гамма-радіацію. Внутрішнє опромінення зумовлене надходженням радіоактивних речовин в організм людини разом з питною водою, їжею, а також за рахунок інгаляції РР у складі повітря. У перші тижні після аварії дуже значний внесок в опромінення людини забезпечили РН йоду, насамперед його ізотоп ^{131}I . За усередненими даними співвідношення колективних ефективних доз внутрішнього й зовнішнього опромінення населення, яке проживає на забруднених унаслідок аварії на ЧАЕС територіях, і накопичених за період з 1986 по 2000 рік, складає 65:35.

На територіях, забруднених унаслідок Чорнобильської катастрофи, опромінення в підвищених дозах зазнали не тільки люди, а й усі без винятку живі істоти будь-яких екосистем. З понадфоновим опроміненням, яке за характером передавання дози є хронічним, пов'язані певні, вже реалізовані радіобіологічні ефекти, та є підстави вважати, що в майбутньому проявляться негативні віддалені наслідки цього опромінення.

Унаслідок аварії на Чорнобильській АЕС в Україні основним радіоактивним забруднювачем – штучним довгоживучим радіонуклідом ^{137}Cs за рівнів вище 1 Кі/км^2 , або 37 кБк/м^2 – була забруднена територія у 53,5 тис. км^2 , або 5,35 млн га, – 9 % території країни. З них 4 млн га – під лісом і 1,13 млн га – під сільськогосподарськими угіддями; решта – під населеними пунктами, дорогами, водоймами.

Основна господарча спрямованість регіону аварії – зона Полісся, північна частина Лісостепу – аграрне виробництво. Відповідно до 70 % населення, що проживає у цьому регіоні, складають сільські жителі. Сільськогосподарська продукція, яка виробляється на забруднених РН територіях, і продукти харчування є одним з основних, а часом домінуючим джерелом дії іонізуючої радіації на людину. Дози опромінення сільського населення значно вищі, ніж міського, що визначається специфічним "сільським типом харчування". Нарешті, мінімізація наслідків аварії у сільськогосподарській сфері, до яких належить виконання радіозахисних заходів, або так званих контрзаходів, є одним з основних елементів системи радіаційної безпеки всього населення країни.

Саме тому радіоактивне забруднення сільськогосподарських угідь стало одним з найбільш тяжких наслідків аварії, і вона з усіма підставами була названа "сільськогосподарською катастрофою". І завдання, і проблеми, що постали перед радіоекологією, – це у значній мірі завдання і проблеми окремого її напрямку – сільськогосподарської радіоекології. Утім, відокремлювати ці завдання не слід, оскільки аварія, не перекресливши класичних фундаментальних завдань загальної радіоекології, пов'язаних з оцінкою кількості, визначенням концентрації та вивченням шляхів міграції природних і штучних РН в об'єктах навколишнього середовища та впливом їх іонізуючих випромінювань на живі організми, висунула нові завдання і поставила нові проблеми, зумовлені надзвичайно великими масштабами та особливостями радіоактивного забруднення довкілля.

Тепер, через 26 років після аварії, головними завданнями як загальної радіоекології, так і окремих її напрямів, слід вважати декілька.

1. Широкий систематичний моніторинг території країни з метою виявлення лісних, сільсько- і водогосподарських угідь та інших об'єктів, забруднених довгоживучими штучними радіонуклідами, в першу чергу ^{137}Cs , ^{90}Sr і ^{239}Pu .

2. Вивчення особливостей міграції цих РН в об'єктах навколишнього середовища, закономірностей їх надходження, транспортування, розподілу і перерозподілу в екосистемах з подальшою оцінкою їх накопичення в окремих ланках, у першу чергу в продукції рослинництва, тваринництва, лісівництва, харчових продуктах як основних джерел формування дози опромінення людини.

3. Розробка основ раціонального використання забруднених радіонуклідами територій, головним чином сільськогосподарських і лісових угідь, для різних напрямів господарювання з урахуванням специфіки заб-

руднення, географічних, ландшафтних, ґрунтово-кліматичних та інших умов регіонів.

4. Вивчення особливостей біологічної дії іонізуючих випромінювань інкорпорованих радіонуклідів на живі організми і, в першу чергу, людину.

5. Дослідження впливу інших антропогенних чинників довкілля (важкі метали, кислотні дощі, добрива, пестициди та інші) на перехід радіонуклідів у рослини і організм тварин та людини, в тому числі з метою розробки заходів з мінімізації накопичення радіонуклідів у продукції рослинництва і тваринництва, продуктах харчування.

6. Довгострокове прогнозування поведінки РН у біоценозах, в т. ч. на основі моделювання різних ситуацій, і розробка системи підтримки прийняття рішень щодо ведення окремих галузей господарювання в умовах радіоактивного забруднення.

7. Розробка науково обґрунтованих систем ведення сільського, лісового, водного господарства, харчової і фармацевтичної промисловості, транспорту та деяких інших сфер діяльності, які забезпечують постійне зменшення рівня опромінення населення.

Уже в перше післяаварійне десятиліття у рамках цілої низки наукових програм і проєктів роботи з вивчення наслідків аварії та їх мінімізації у різних сферах виробництва та діяльності людини були розгорнуті у широкій мережі науково-дослідних інститутів і вищих навчальних закладів різних відомств. На превеликий жаль, у другому десятилітті внаслідок багатьох об'єктивних причин вони абсолютно невинувато були скорочені. Проте перші три завдання вирішувалися і вирішуються досить успішно, хоча постійно зустрічають фінансові труднощі. Обстежується ступінь забруднення території країни окремими радіонуклідами, створені та опубліковані карти радіоактивного забруднення за ^{137}Cs , ^{90}Sr і ^{239}Pu , обласні й районні організації різних спрямувань озброєні картами-планами радіоактивного забруднення підлеглих територій, в усякому разі за ^{137}Cs , а в окремих випадках і за ^{90}Sr . При вивченні особливостей міграції РН відокремлено трофічні ланцюги, які характеризуються особливо високою швидкістю їх пересування, наприклад торфоболотні ґрунти–рослини, ґрунти–лучні рослини. Оцінені коефіцієнти накопичення і переходу окремих радіонуклідів для різних типів ґрунтів і видів рослин. Була розроблена система комплексу радіозахисних заходів (контрзаходів), які охопили всі напрями господарювання на забруднених територіях, зокрема сформульовано організаційні основи ведення агропромислового і лісового

Тема: "ПРОЦЕСИ ПЕРЕНОСУ РАДІОНУКЛІДІВ ПРИ..."

господарств в умовах радіоактивного забруднення. Усе це знайшло відображення у серії рекомендацій з ведення окремих напрямів виробництва в таких умовах.

Важлива проблема – радіаційне ураження живих організмів на забруднених радіонуклідами територіях. Вважається, що на сьогодні радіаційна небезпека як для людини, так і для різних видів тварин і рослин за межами зон відчуження та відселення не існує. Проте певні питання виникають при вивченні можливих ефектів низьких (так званих "малих" і навіть "надмалих") доз хронічного опромінення інкорпорованих РН, яке формується місяцями, роками. Якщо говорити про можливість прояву в цих умовах радіаційного гормезису і розглядати ці дози як потенційний фактор прискорення росту й розвитку, то слід допускати, що в умовах агроценозів стимуляційні явища можуть стосуватися не тільки культурних рослин, але й бур'янів. Між рослинами, які відрізняються за радіочутливістю, можуть складатися досить незвичайні взаємовідносини. Зокрема, не впливаючи на культурні рослини і навіть пригнічуючи їх, малі дози ІВ можуть стимулювати розвиток бур'янів, які, як правило, мають більш високу радіостійкість.

Крім того, у рослин, що ростуть на забруднених радіонуклідами землях, у тварин, що утримуються на них, нерідко спостерігається невідповідність порівняно низьких доз, які формуються у тих умовах, тим радіобіологічним ефектам, які реєструються. Це є наслідком нерівномірного розподілу радіонуклідів у рослинному або тваринному організмі, за рахунок чого утворюються місця їх високої концентрації та формуються часом дуже високі дози локального опромінення у зонах критичних органів. Крім того, є рослини, які здатні накопичувати радіонукліди у кількостях, у десятки разів більших, ніж інші. Це призводить до їх сильних радіаційних уражень. Саме це, можливо, є причиною випадання деяких видів на забруднених радіонуклідами територіях.

Велика кількість радіонуклідів, зокрема ^{137}Cs , може накопичуватися у квіткових бруньках і квітках. Безперечно, під час запліднення радіочутливі статеві клітини отримують значні дози опромінення. Це може негативно вплинути не тільки на продуктивність рослин, але й призвести до уражень у наступних поколіннях, виникнення мутацій.

Традиційно вважається, що ^{90}Sr , накопичуючись разом з кальцієм у скелеті, створює загрозу тільки для клітин червоного кісткового мозку – депо всіх клітин крові. Але добре відомо, що кальцій є основним

мінеральним компонентом оболонок рослинних клітин і у підвищених кількостях накопичується в ядерних оболонках усіх типів клітин. Є всі підстави вважати, що разом з ним накопичується і ^{90}Sr , піддаючи опроміненню ядра як соматичних, так і статевих клітин. Тому слід переглянути деякі загальні й дещо спрощені погляди відносно розподілу певних радіонуклідів у рослинах і в організмі тварин та людини. Особливо це стосується радіоцезію, про який склалася тверда упереджена думка, що він, накопичуючись у м'язах тварин, рівномірно розподіляється організмом, визначаючи опромінення, аналогічне зовнішньому. Подібна думка існує і відносно розподілу цезію в рослинах.

Важливу проблему утворюють радіонукліди альфа-випромінюючих трансуранових елементів (ТУЕ), особлива небезпека яких добре відома радіобіологам. Якщо абсолютна кількість радіонуклідів у навколишньому середовищі, як це прийнято вважати, з роками зменшується за рахунок фізичного розпаду, то це у даній ситуації стосується тільки ^{90}Sr і ^{137}Cs , періоди напіврозпаду яких складають відповідно 29 і 30 років та кількість яких за 26 років зменшилася трохи більше ніж на третину. Однак це не відноситься до ТУЕ, таких, як плутоній і америцій, у деяких ізотопів яких періоди напіврозпаду вимірюються сотнями і тисячами років і відносна частка яких з роками зростатиме. Традиційно вважається, що вони в основному являють загрозу лише при інгаляційному надходженні в організм, оскільки дуже повільно пересуваються звичайними транспортними шляхами з ґрунту, "застрягаючи на вході" у ланці ґрунт–рослина, і надходять до організму людини лише з бульбо- і коренеплодами. Однак зараз це положення переглядається. Є дані про те, що ТУЕ можуть транспортуватися за допомогою переносників кальцію, заліза, марганцю і коефіцієнти їх накопичення рослинами можуть на порядок-два перевищувати відомі. Особливу небезпеку становить ^{241}Am , кількість якого за рахунок відносно швидкого розпаду ^{241}Pu (період напіврозпаду 14,4 року) до 2059 року зросте у 40 разів порівняно з кількістю викинутого під час аварії, оскільки внесок ^{241}Pu у сумарну радіоактивність ТУЕ, що була накопичена у реакторі, складає близько 83 %.

Іонізуючі випромінювання є потужним імунодепресантом – чинником, який пригнічує захисні реакції організму. Чи впливають низькі дози хронічного опромінення на імунітет рослин, тварин, людини? Досвід радіобіології свідчить, що цей ефект не має порога. І певне зростання захворюваності сільськогосподарських рослин і тварин у зонах радіаційного впливу аварії, а також і населення по країні в цілому в післяаварійний

Тема: "ПРОЦЕСИ ПЕРЕНОСУ РАДІОНУКЛІДІВ ПРИ...

період може бути пов'язане не тільки з наслідками опромінення у рік аварії, але й з дією радіації у даний час саме у такому аспекті.

При вирішенні п'ятого завдання було встановлено, що найбільш ефективними прийомами мінімізації надходження радіонуклідів у рослини на бідних кислих ґрунтах північно-західної частини України, яка у найбільшій мірі була піддана забрудненню, є вапнування і внесення підвищених рівнів фосфорно-калійних добрив. Завдяки їх здійсненню потоки надходження радіонуклідів у рослини зменшуються в 2–6 разів. Але ці заходи ускладнили серйозну місцеву проблему, оскільки виявилось, що під впливом вапнування і добрив зменшується надходження в рослини не тільки радіоактивних, але й інших елементів, зокрема багатьох мікроелементів, з якими кальцій вапна і фосфор добрив утворюють важкорозчинні комплекси. Це призводить до зниження вмісту в рослинах, а відповідно кормах і продуктах харчування, в організмі продуктивних тварин і людини багатьох біологічно важливих мікроелементів, зокрема йоду, фтору, кобальту, цинку, міді, марганцю.

Полісся належить до біогеохімічної провінції, де в ґрунтах і рослинах традиційно не вистачає перерахованих мікроелементів, що призводить до специфічних ензоотичних захворювань тварин і людини – гіпомікроелементозів. Названі радіозахисні заходи, що погіршують кормові та харчові якості продукції, посилюють цей дефіцит та загострюють ситуацію зі станом здоров'я тварин і населення.

Проте у порівнянні з 1991 роком обсяги вапнування ґрунтів у даний час зменшилися у 15–20 разів, а внесення мінеральних добрив – у 5–10 разів, що привело нібито до вирішення проблеми загострення дефіциту мікроелементів. Але більш гостро постала проблема радіонуклідного забруднення продукції.

Певні проблеми виникають при довгостроковому прогнозуванні поведінки радіонуклідів у біогеоценозах. Незважаючи на те, що основні шляхи міграції радіонуклідів трофічними ланцюгами достатньо добре вивчені залежно від типу ґрунту, форми радіонуклідного забруднення ґрунту, щільності забруднення, біологічних особливостей рослин, погоднокліматичних умов, швидкість руху радіонуклідів та їх кількість, що надходить на цій первинній і найбільш відповідальній ланці, може розрізнятися у багато разів. Тому важливим напрямом досліджень стає моделювання можливих радіоекологічних ситуацій в окремих ценотичних угрупованнях. Такі методи моделювання руху радіонуклідів дають можливість прогнозувати рівні їх накопичення у будь-якій ланці трофічного ланцюга,

в т. ч. у продукції рослинництва, кормовиробництва, тваринництва, продуктах харчування людини, що є дуже важливим у плані розробки та реалізації захисних заходів і реабілітації забруднених радіонуклідами територій, а також системи ведення окремих галузей виробництва в умовах радіоактивного забруднення.

Слід визнати, що точність прогнозування за допомогою всіх існуючих методів і підходів не можна вважати достатньо високою. Серед об'єктивних причин цього основними є погодні умови року, клімату. Зокрема, в залежності від кількості атмосферних опадів протягом вегетаційного періоду і температури коефіцієнти переходу радіонуклідів з ґрунту в рослини можуть суттєво змінюватися. Саме тому точність прогнозу поведінки радіонуклідів в агроценозах, як і в інших угрупованнях, у значній мірі визначається точністю погодно-кліматичного прогнозу.

Останнє завдання об'єднує радіоекологію з радіаційною медициною, точніше з окремим спеціальним її розділом – радіаційною гігієною, головним завданням якої є забезпечення радіаційної безпеки населення. Оцінка доз внутрішнього опромінення людини, яке сьогодні на забруднених територіях досягає 90 % загальної дози, обов'язково передбачає одержання інформації про перехід радіонуклідів трофічними ланцюгами з продуктами харчування до людини. У кінцевому підсумку захист людини від дії іонізуючої радіації є основним завданням радіоекології та у значній мірі окремого її напрямку – сільськогосподарської радіоекології. Саме від реалізації радіозахисних заходів у сільському господарстві залежить виробництво продуктів харчування з мінімальним вмістом радіоактивних речовин. Це означає, що на сільське господарство фактично покладається відповідальність за радіаційну безпеку країни.

У цілому є всі підстави вважати вирішення завдань, які постали перед сучасною радіоекологією, важливими та актуальними проблемами екології.

Очищення повітря від радіоактивних забруднень

Значна рухомість повітря і менша порівняно з водою густина обумовлюють особливості його фільтрації. Ці особливості позначаються як на виборі фільтрів з різними принципами дії, так і на виборі фільтруючих матеріалів. За ступенем ефективності очищення від радіоактивного забруднення фільтруючі матеріали можна розташувати в такій послідовності: скловолокно, тканина, неткані волокнисті з металевих волокон, синтетичні

90

Тема: "ПРОЦЕСИ ПЕРЕНОСУ РАДІОНУКЛІДІВ ПРИ..."

й природні. Для збільшення ефективності використовується електромагнітне поле.

У засобах індивідуального захисту для фільтрації особливо високодисперсних аерозолів широко використовуються фільтри Петрянова. У них застосовуються волокнисті матеріали, які складаються з тонких ниток товщиною від десятих часток до декількох мікрометрів. Волокна виготовляються з перхлорвінілу, ацетилцелюлози, поліакрилатів, фторполімерів та інших матеріалів. Волокна у вигляді шару товщиною в 1 мм і більше наносяться на підкладку (наприклад, марлю).

Для очищення повітря в ході промислової експлуатації АЕС використовуються припливні, циркулярні й витяжні вентиляційні системи, при цьому здійснюється ступеневе очищення через різні фільтруючі системи.

Лекція 9

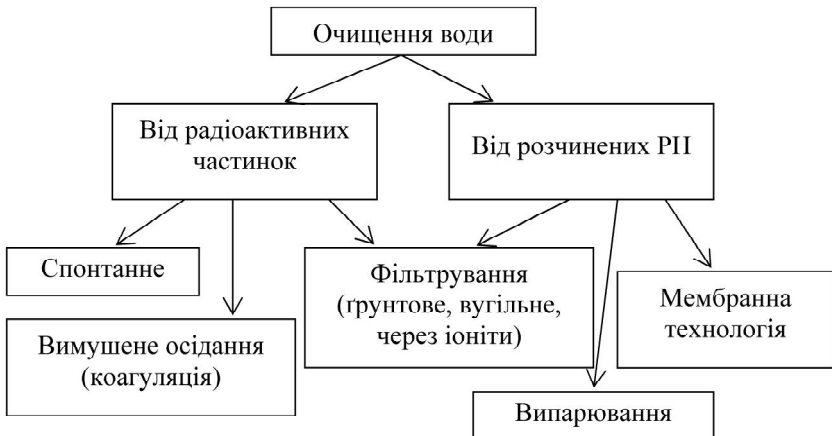
Тема: "ПЕРЕНЕСЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ТА СТУПІНЬ РАДІАЦІЙНОЇ НЕБЕЗПЕКИ"

План

1. Радіоактивність води.
2. Способи очищення води.
3. Радіаційний контроль.
4. Вимоги норм радіаційної безпеки.

Радіоактивність води

Вода відіграє надзвичайно важливу роль у життєдіяльності всіх живих організмів, тому що переносить мінеральні речовини, у тому числі РН. Унаслідок цього якість природних вод – один з основних чинників нормальної життєдіяльності людини. Рівень вмісту РН і хімічних сполук природних вод визначаються кліматичними умовами і геологічною



Способи очищення води

Тема: "ПЕРЕНОСЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ.."

будовою місцевості, а природна радіоактивність вод – присутністю таких природних РН: ^{40}K , $^{234}, ^{235}, ^{238}\text{U}$, $^{224}, ^{226}, ^{228}\text{Ra}$, ^{232}Th , $^{220}, ^{222}\text{Rn}$, ^{210}Po , ^{210}Pb .

Концентрація урану, торію і радію особливо велика в підземних водах.

Радіоактивність річкової води зумовлена в основному калієм, вміст якого залежить як від хімічної сполуки порід, що омиваються цими водами, так і від ряду кліматичних чинників.

У південних річках з високим рівнем мінералізації вміст урану в середньому складає $5 \cdot 10^{-5} \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$, тоді як у північних річках з відносно низькою мінералізацією концентрація урану знаходиться у межах від $2 \cdot 10^{-8}$ до $2 \cdot 10^{-7} \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$, тобто у 250...2500 разів менше.

Радіоактивність озерних вод тісно пов'язана з хімічним складом води їхніх приток і підземних вод.

Концентрація РН у дощовій воді невисока, виняток становлять ^3H і ^7Be , концентрація яких може досягати десятків пікокурі на літр.

Природна радіоактивність річкової води в середньому складає $5 \cdot 10^{-11} \text{ Кі} \cdot \text{л}^{-1}$ ($1,85 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1}$).

Згідно з ДР-97 допустимий рівень вмісту РН ^{90}Sr і ^{137}Cs в питній воді складає $2 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1}$.

Середній вміст солей у водах Світового океану відповідає близько $35 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$. Вміст калію в мінеральній складовій морської води складає $1 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$. Крім ^{40}K у морській воді міститься велика кількість інших РН, вплив яких на сумарну активність морської води досить різний.

Способи очищення води

Більша частина РР, що знаходяться у воді, у вигляді твердих радіоактивних частинок міцно утримується на частинках ґрунту або пилу і не розчиняється, решта РН у вигляді аніонів і катіонів переходить у розчин.

Технологічну схему очищення води можна показати як сукупність різних способів (див. рисунок).

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

Коагулювання – це розчинення у воді спеціальних речовин – коагулянтів, які в результаті гідролізу утворюють розсіпчастий пластівчастий відстій. Як коагулянти застосовують солі алюмінію $Al_2(SO_4)_3$ або солі заліза $FeSO_4$, коагулянти у всьому об'ємі води утворюють пластівці, які при осадженні на дні відстійника захоплюють радіоактивні частинки. Після відстоювання заражена вода прояснюється і значною мірою дезактивується. Спосіб очищення води коагулюванням може застосовуватися як операція, що передує фільтруванню. *Фільтрацією* називають очищення рідкого або газового середовища шляхом осадження домішок на поверхні фільтра.

Як фільтр може бути використаний кварцовий пісок, дроблений антрацит, різні сорбенти та іоніти.

Сорбенти застосовуються для добування РН з водних і газових середовищ (реакція поглинання). Як сорбенти звичайно використовуються пористі порошки на основі мінеральних речовин і вугільних матеріалів. До мінеральних належать глинясті сорбенти (бетоніти, каолін, цеоліт).

Сорбенти, дія яких ґрунтується на іонному обміні, називаються іонітами. Іоніти здатні поглинати з розчину позитивні або негативні іони РН в обмін на еквівалентну кількість іонів одного і того ж знака (реакція заміщення), у результаті РН, що містяться у воді, утворюють нерозчинні сполуки з іонітами і тим самим звільняють від них заражену воду. Як іоніти використовуються іонітообмінні смоли, сульфовугілля, целюлоза.

Випарювання (перегонка) – це випар води, концентрування радіоактивних продуктів до утворення твердої маси. У результаті отримуємо чисту воду і концентрований відстій радіоактивних забруднень, який потім видаляється в процесі дезактивації ємності. Випарювання забезпечує високе очищення води (99,9 %), однак цей спосіб потребує часу.

Фільтрація за допомогою сорбентів і випарювання дозволяє позбутися як радіоактивних частинок, особливо високодисперсних, так і розчинних РН. За допомогою іонітових фільтрів і мембранної технології видаляються розчинні РН.

Радіаційний контроль – це радіаційний контроль за дотриманням норм радіаційної безпеки та основних санітарних правил, одержання інформації про рівень опромінення людей, ступінь забруднення продуктів харчування, а також про стан радіаційної обстановки на підприємствах і в навколишньому середовищі.

Тема: "ПЕРЕНЕСЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ..."

Радіаційний контроль здійснюють на всіх підприємствах, які використовують джерела іонізуючого випромінювання.

Найбільших обсягів і значення набуває радіаційний контроль навколишнього середовища при випаданні радіоактивних продуктів ядерного поділу (наприклад, при аваріях на радіаційно небезпечних об'єктах).

У цьому випадку здійснюється експресний радіометричний контроль, на основі якого складається карта радіаційної обстановки на обстежуваній території і виявляються забруднені зони, які потребують особливо ретельного щоденного контролю.

Для оцінки радіаційної обстановки потрібні прилади, які могли б реєструвати величину випромінюваних РР.

Вимоги норм радіаційної безпеки

Перші безпечні межі опромінення людей були визначені на початку ХХ ст. Оскільки в цей час променевих уражень зазнавала головним чином шкіра, то було запропоновано прийняти за безпечну десятю частину дози, яка викликала еритему (почервоніння) шкіри за 30 діб.

У 1934 році МКРЗ установила толерантну (таку, що не завдає шкоди організму) дозу – 0,2 Р на добу. У 1936 році ця доза була зменшена – 0,1 Р за добу.

У міру накопичення даних про віддалені наслідки впливів на людину термін толерантної дози був замінений виразом "гранично-допустима доза" (ГДД), а її величина встановлена в розмірі 0,05 Р за добу або 18 Р на рік.

У 1958 році МКРЗ прийняла гіпотезу безпорогової лінійної залежності "доза–ефект", за якою будь-які незначні дози опромінення можуть викликати небажані генетичні наслідки, причому ймовірність таких наслідків прямо пропорційна дозі. Для фахівців, що мають справу з ІВ, доза визначена 50 мЗв на рік.

Нині серед учених немає єдиної думки з питання про біологічні наслідки малих доз опромінення.

Деякі вчені вважають, що залежність "доза–ефект" має лінійний характер (гіпотеза безпорогової залежності). Інші вважають, що шкідливі ефекти опромінення проявляються починаючи з певного порога. Треті вважають, що малі дози опромінення корисні.

Слід зазначити, що немає безперечних доказів на користь будь-якої точки зору. Тим більше, що вплив малих доз опромінення практично досконало ще не вивчено. У цьому випадку доцільно розглядати більш раціональну гіпотезу про лінійну залежність "доза–ефект" і для людей,

що безпосередньо працюють з ІВ, дозу опромінення за рік прийняти такою, що дорівнює 20 мЗв , а для іншого населення – $1 \text{ мЗв} \cdot \text{рік}^{-1}$.

"Норми радіаційної безпеки України" (НРБУ–97) введені в дію з 1 січня 1998 р. Ці норми розроблені відповідно до основних положень Конституції та Законів України "Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення", "Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку", "Про поводження з радіоактивними відходами". У цих документах з урахуванням вітчизняного досвіду використовуються основні рекомендації МКРЗ у сфері нормування.

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

Дозові межі, встановлені НРБУ, не враховують:

дозу, яку одержують при медичному обстеженні або лікуванні;

дозу опромінення від природних джерел випромінювання;

дозу, що пов'язана з аварійним опроміненням населення;

дозу опромінення від техногенно-підсилених джерел природного походження.

У НРБУ проведена чітка різниця між дозовими межами для різних категорій населення, яке зазнає опромінення:

категорія А – персонал, що безпосередньо працює з ІВ;

категорія Б – обмежена частина населення (люди, які безпосередньо не працюють з ІВ, але за умовами проживання або розміщення робочих місць можуть зазнавати опромінення);

категорія В – населення.

Визначено три групи органів тіла людини, опромінення яких викликає різні наслідки:

1 – все тіло, червоний кістковий мозок, гонади;

2 – м'язи, щитовидна залоза, жирова тканина, внутрішні органи;

3 – кісткова тканина, шкіряний покрив, кисті, передпліччя, щиколотки і стопи.

В Україні згідно з нормами радіаційної безпеки НРБУ–97 установлені межі доз опромінення (див. таблицю).

Отже, для персоналу ефективна доза за період трудової діяльності (50 років) складає $50 \cdot 20 = 1000 \text{ мЗв}$ (1 Зв), а ефективна доза впродовж життя для населення (70 років) складає 70 мЗв . Цей рівень відповідає концепції безпечного проживання.

Тема: "ПЕРЕНЕСЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ..."

Дозові межі опромінення, мЗв · рік⁻¹

Межі доз	Категорії опромінованих осіб		
	A ¹⁻³	B ¹	B ¹
Ефективної	20	2	1
Еквівалентної дози зовнішнього опромінення:			
для кришталика ока;	150	15	15
для шкіри;	500	50	50
для кистей і стоп	500	50	

¹Розподіл дози опромінення протягом календарного року не регламентується.

²Для жінок дітородного віку (до 45 років) і для вагітних жінок діють такі обмеження: до вступу спеціальних нормативів для вагітних жінок на виробництві (категорії А, Б) установлені допустимі рівні у 20 разів нижчі, ніж для відповідних рівнів категорії А; для жінок дітородного віку, які віднесені до категорії А, вводиться додаткове обмеження опромінення: середня еквівалентна доза зовнішнього локального опромінення (зародка і плоду) за кожні два місяці не повинна перевищувати 1 мЗв. При цьому за весь період вагітності ця доза не повинна перевищувати 2 мЗв, а межа річного надходження для вагітних установлюється на рівні 1/20 допустимого надходження для категорії А.

³У середньому за кожні наступні 5 років, але не більше 50 мЗв за окремий рік.

Співвідношення доз опромінення з небезпечними і допустимими рівнями опромінення людини:

100 мЗв – допустиме разове аварійне опромінення населення категорії Б;

250 мЗв – допустиме разове аварійне опромінення персоналу (категорія А), при цьому відсутні явні ефекти ураження;

750 мЗв – величина одноразової дози, за якої не виникає серйозних відхилень у стані здоров'я, це нижчий рівень розвитку легкого ступеня променевої хвороби. Ця доза визнана МКРЗ і національними комісіями радіаційної безпеки та є тим порогом, вище якого виникають не стохастичні ефекти опромінення;

4,5 Зв – величина середньої смертельної дози (50 % виживання, тобто гине 50 % опромінених);

6 Зв – мінімальна абсолютно смертельна доза, характеризує граничні можливості захисних механізмів організму;

10 Зв – 100%-на летальність серед опромінених.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Основні цілі та завдання радіаційної безпеки.
2. Роль радіації у виникненні життя на Землі.
3. Сутність теорії абіогенного синтезу.
4. Перелічити природні джерела опромінення.
5. Глобальні випадання при використанні та випробовуваннях ядерної зброї.
6. Що таке озонові "діри" в атмосфері.
7. Антропогенні зміни радіоактивного фону.
8. Основні системні й позасистемні одиниці фізичних характеристик радіаційного випромінювання.
9. Характеристики іонізуючих випромінювань.
10. Особливості взаємодії різних видів фотонного і корпускулярного опромінювання з речовинами.
11. Послідовність дії іонізуючого опромінювання на біологічні об'єкти.
12. Зв'язок між рівнем гострого опромінювання і реакцією організму.
13. Вплив часу опромінювання на радіаційне ураження організму.
14. Соматичні та генетичні наслідки радіаційного ураження.
15. Склад і доза первинного та вторинного космічного випромінювання.
16. Радіоактивні ряди та дози внутрішнього та зовнішнього опромінення.
17. Джерела технологічно підвищеного природного радіаційного фону.
18. Ядерні вибухи у військових і мирних цілях та вплив глобальних випадань радіонуклідів на радіаційний фон.
19. Основні типи ядерних реакторів, що використовуються у світі.
20. Атомні електростанції України та їх вплив на екологічну ситуацію.
21. Чорнобильська аварія, її короткочасні й довгочасні наслідки.
22. Іонізація та збудження, іонізаційний потенціал.
23. Вільнорадикальний стан атомів та молекул.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

24. Чим відрізняються α -, β -, γ -випромінювання та механізм їх виникнення і поширення.
25. Рентгенівське та синхротронне випромінювання.
26. Нейтрони, їхні фізичні властивості.
27. Що таке коефіцієнт радіаційного ризику?
28. Назвіть ефекти, які виникають при взаємодії радіації з речовиною.
29. Радіаційні пошкодження. Приклади прямої та непрямої дії випромінювання.
30. Радіаційна хімія води.
31. Вільнорадикальний процес в опромінених живих системах.
32. Дія радіації на нуклеїнові кислоти.
33. Пошкодження нуклеотидів, одно- та двониткові розриви.
34. Дія радіації на білки, ліпіди. Пероксидне окиснення ліпідів.
35. Генні та хромосомні мутації.
36. Дозові залежності радіобіологічних ефектів.
37. Кисневий ефект у радіаційно-хімічних реакціях.
38. Коефіцієнт кисневого посилення.
39. Лінійне передавання енергії та відносна біологічна ефективність опромінення.
40. Роль кисню у живих клітинах.
41. Сублетальні та летальні пошкодження клітин.
42. Які ви знаєте прямі та непрямі ефекти опромінення клітин?
43. Модифікація радіобіологічних ефектів.
44. Принцип дії радіопротекторів та радіосенсибілізаторів.
45. Репарація клітин від променевого ураження.
46. Радіочутливість різних тканин організму.
47. Сформулюйте правило Бергон'є та Трибондо.
48. Як відрізняється стійкість до опромінення різних органів та систем організму?
49. Загальна схема формування відповіді тваринного організму на опромінення.
50. Радіаційні синдроми у ссавців.
51. Кістковомозковий та гастроінтестинальний синдроми.
52. Вплив опромінення на клітини крові й тканини кровотворних органів.

53. Захист від загибелі при різних синдромах.
54. Системна відповідь організму на опромінення.
55. Вплив іонізуючих випромінювань на плід людини й тварин.
56. Види пізніх ефектів опромінення.
57. Вплив опромінення на процеси старіння, реакції поведінки, стресову реакцію організму.
58. Стійкість тварин до хронічного опромінення.
59. Вплив різних біологічних та фізичних факторів на реакції ссавців на опромінення.
60. Вплив опромінення на процеси регенерації.
61. Радіаційний канцерогенез.
62. Радіостійкість вірусів і бактеріофагів.
63. Радіостійкість бактерій, грибів та рослин.
64. Радіостійкість тварин.
65. Зв'язок між розмірами геному й радіочутливістю видів.
66. Радіостійкість видів і філогенез.
67. Радіочутливість рослин.
68. Критичні органи вищих рослин.
69. Радіостійкість насіння та різних систем рослин.
70. Хронічне опромінення рослин.
71. Види радіоактивних відходів, методи і засоби їх переробки і захоронення.
72. Вплив метеорологічних факторів на поширення радіонуклідів в атмосфері.
73. Особливості переміщення радіонуклідів у прісноводних водоймищах, берегових зонах і Світовому океані.
74. Міграція радіонуклідів у ґрунтах. Засоби дезактивації ґрунтів.
75. Перенесення та динаміка у підземних водах.
76. Надбережні зони та шельфи.
77. Біогеохімічний розподіл радіонуклідів. Перенесення радіонуклідів у напівзамкнених морях.
78. Захоронення радіоактивних відходів на глибинах океану.
79. Захоронення радіоактивних відходів та радіаційна безпека.
80. Принципи підходу до нормування рівнів опромінення.
81. Концепція прийнятного ризику при нормуванні рівня опромінення.
82. Основні положення Норм радіаційної безпеки.
83. Міжнародні угоди в галузі радіаційної безпеки.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 84. Санітарні правила роботи з радіоактивними речовинами.
 - 85. Методи і засоби дозиметричного контролю.
 - 86. Назвіть основні біодозиметричні методи.
 - 87. Засоби ліквідації радіаційних аварій різного ступеня.
 - 88. Законодавчі акти України в галузі радіаційної безпеки.
-

ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ СЛОВНИК

Аберації – хромосомні аномалії, зокрема під впливом радіації.

Авторадіографія (або радіографія) – спосіб вивчення розподілу радіоактивних речовин у досліджуваному об'єкті шляхом накладання на нього чутливих до радіоактивних випромінювань фотоматеріалів (плівки, фотопаперу, фотоскла). Включає у себе макро- та мікроавторадіографію.

Альфа-розпад – тип спонтанного радіоактивного перетворення важких атомних ядер, що полягає у викиданні α -частинки з ядра. Альфа-розпад властивий 25 природним радіоактивним ізотопам та близько 100 штучним ядрам з дефіцитом нейтронів. Альфа-розпад зазвичай супроводжується γ -випромінюванням.

Альфа-частинки (α) – це ядра атомів гелію, що має заряд +2.

Активність радіонуклідів (A) – число розпадів радіоактивних ядер за одиницю часу. Одиниця активності в системі СІ – бекерель (Бк) – відповідає одному розпаду радіоактивного ізотопу протягом секунди. Кюрі (Ки) – позасистемна одиниця активності радіонуклідів, $1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10}$ актів ділення протягом секунди. 1 Ки відповідає приблизно активність 1 г радію.

Ангіографія – рентгенографічні дослідження кровоносних судин.

Анігіляція – процес перетворення пари електрон–позитрон у пару гамма-квантів; утворення квантів потужного випромінювання при зіткненні античастинок.

Античастинка – це частинка-двійник іншої елементарної частинки, що має таку ж масу і спин, але відрізняється від неї знаком.

Апоптоз – програмована клітинна загибель, енергетично залежний, генетично контрольований процес, який запускається специфічними сигналами і позбавляє організм від ослаблених, непотрібних або пошкоджених клітин. Щодня близько 5 % клітин організму підлягають апоптозу, а їх місце займають нові клітини. У процесі апоптозу клітина зникає безслідно протягом 15...120 хв. Апоптоз – це біохімічно специфічний тип загибелі клітини, який характеризується активацією нелізосомних ендогенних ендонуклеаз, які розщеплюють ядерну ДНК на маленькі

фрагменти. Морфологічно апоптоз виявляється загибеллю одиничних, безладно розташованих клітин, що супроводжується формуванням округлих, оточених мембраною тілець ("апоптотичні тільця"), які тут же фагоцитуються навколишніми клітинами. Це енергозалежний процес, за допомогою якого видаляються небажані та дефектні клітини організму. Він відіграє велику роль у морфогенезі та є механізмом постійного контролю розмірів органів. При зниженні апоптозу відбувається накопичення клітин, наприклад пухлинне зростання. При збільшенні апоптозу спостерігається прогресивне зменшення кількості клітин у тканині, наприклад атрофія. Апоптоз – це генетично контрольована смерть клітин. Виявлено гени, які кодують речовини, необхідні для регулювання апоптозу. Апоптоз може регулюватися зовнішніми чинниками (наприклад, іонізуюча радіація) й автоматичними механізмами.

Атом (грец. неподільний; термін введений у науку давньогрецькими вченими Демокрітом і Левккіпом) – мікроскопічна елементарна і певною мірою невичерпна частинка хімічного елемента, що є носієм властивостей цього елемента. Атом вивчає наука "ядерна фізика".

Атомне ядро – центральна частина атома, де зосереджена основна його маса. Маса ядра в 4000 разів більша від маси електронів. Діаметр ядра більше ніж у 100 тисяч разів менший за діаметр атома.

Безпека радіаційна – заходи, спрямовані на запобігання ураженню населення від іонізуючого опромінення. Річна норма опромінення в Україні встановлена для професіоналів (група А) 5 рентген (5 бер); для населення, яке проживає поблизу АЕС (група Б), – 0,5 бер.

Бекерель – активність нукліду в радіоактивному джерелі (А), позначається "Бк", міжнародне позначення "Bq". Бекерель дорівнює одному розпаду за секунду.

Бер – енергія будь-якого виду випромінювання, що поглинається 1 г тканини, при якій спостерігається той же біологічний ефект, що і при поглиненій дозі в 1 рад фотонного випромінювання або в 1 рентген гамма-променів; біологічний еквівалент рентгена, позасистемна одиниця еквівалентної дози опромінення людини іонізуючим випромінюванням.

Бета-розпад – тип спонтанного радіоактивного перетворення нестабільних атомних ядер. *Електронний β -розпад* полягає у викиданні з ядра електрона, який утворюється внаслідок перетворення нейтрона на протон. *Позитронний β -розпад* полягає у викиданні з ядра позитрона, що виникає внаслідок перетворення протона на нейтрон. Бета-розпаду

зазнають 20 природних і понад 1000 штучних радіоактивних ізотопів. Ці речовини можуть бути джерелом електронів і γ -випромінювання.

Бета-частинка (β) – потік негативно заряджених прискорених електронів ядерного походження, що випромінюються ядром радіоактивних елементів при їх розпаді або античастинок електронів (позитронів, які позитивно заряджені). Швидкість їх руху може досягати швидкості світла. Проникна здатність бета-частинок менша, ніж у гамма-променів, але іонізуюча дія у сотні разів більша. Їхній пробіг у повітрі складає декілька метрів. Тонкий одяг здатний зупинити потік бета-радіації, а щоб одержати опромінення джерело бета-радіації необхідно помістити усередину організму.

Відносна біологічна ефективність (ВБЕ) випромінювання – відношення поглинутої дози стандартного випромінювання, що викликає певний біологічний ефект, до поглинутої дози радіації, що вивчається, яка дає такий же ефект, наприклад загибель 50 % клітин або піддослідних тварин. Це коефіцієнт, який характеризує відносну ефективність дії радіації з різними значеннями ЛПЕ щодо певного біологічного ефекту.

Внутрішнє (інкорпороване) іонізуюче опромінення – опромінення, що утворюється внаслідок проникнення та накопичення радіоактивних ізотопів усередині організму.

Гальмівне електромагнітне випромінювання – це електромагнітне випромінювання, що генерується під час гальмування зарядженої частинки в електричному полі.

Гамма-випромінювання (γ) – короткохвильове електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі $10^{-8} \dots 10^{-10}$ м і енергією більше 250 KeV, а також електромагнітне випромінювання радіонуклідів (незалежно від енергії), що виникає при розпаді радіоактивних ядер та елементарних частинок і при взаємодії швидких заряджених частинок з речовиною.

Генетична дія іонізуючої радіації – пошкодження спадкового механізму клітини, що передається її потомству.

Генетичний ефект – здатність іонізуючого випромінювання діяти не тільки на даний живий організм, але і на його потомство, тобто змінювати спадковість.

Генетично значима еквівалентна доза (ГЗД) – доза радіації, яка викликає ті чи інші спадкові ураження у потомства опроміненого організму (те, що і вихідна доза, отримана ним).

Глобальне радіаційне забруднення – радіаційне забруднення поверхні землі та Світового океану, що утворилося за рахунок радіоактивних випадань при масовому випробуванні атомної зброї, аварій на великих радіаційних об'єктах, наприклад на Чорнобильській, Фукусіма-1 та інших АЕС.

Гормезис радіаційний – стимуляція росту й розвитку організмів рослин і тварин за умови їх опромінення в малих дозах (це за умови малих доз опромінення можуть індукуватися ніби позитивні біологічні процеси і здійснюватися стимулююча дія на організм, зростати швидкість поділу клітин, подовжуватися тривалість життя біологічного об'єкта). Поняття "радіаційний гормезис" було введено в науку у 80-і роки XX століття і трактувалося так: великі дози радіації діють на організм негативно, малі – позитивно. Але із часом ці погляди розділилися на діаметрально протилежні. Сьогодні вважається, що не існує таких малих доз радіації, які не можуть бути шкідливими, що до іонізуючої радіації не може бути адаптації.

Гостре опромінення – опромінення, що здійснюється протягом короткого проміжку часу, за який не встигає змінитися фізіологічний стан організму або клітини.

Гостре фракційне опромінення – кількаразове гостре опромінення відповідною дозою, при якому досягається накопичення дози. Якщо дози опромінення однакові, то мова йде про *еквівалентне фракційне опромінення*, а коли ці порції дози різні – *нееквівалентне*.

Гранична доза – гранична індивідуальна еквівалентна доза за рік, яка при рівномірному впливу протягом 70 років не викличе в стані здоров'я людини несприятливих змін.

Граничне річне надходження (ГРН) – це таке надходження радіації в організм протягом року, яке за 70 років створить у критичному органі організму еквівалентну дозу, що дорівнює граничній дозі (ГД).

Гранично-допустиме надходження – це таке надходження радіоактивних речовин в організм протягом року, яке за 50 років створить у критичному органі еквівалентну дозу, що дорівнює 1 ГДК.

Грей – одиниця поглинутої дози радіації будь-якого виду, яка передана опроміненій речовині масою 1 кг, позначається "Гр", міжнародне позначення – "Gy".

Густина потоку – характеризує рівень радіоактивної забрудненості поверхні, вимірюється в частинках, що випускаються за 1 хвилину з 1 см² поверхні.

Дезактивація – видалення радіоактивних речовин з окремих територій місцевості, споруд, засобів транспорту, одягу, продовольства, води, тіла тварин і людини та інших предметів, будь-якої поверхні чи середовища або зниження рівня забруднення фізичними, хімічними засобами.

Дейтерій (латин. Deuterium – другий) – важкий водень, стабільний ізотоп водню з масовим числом 2. Ядро атома дейтерію складається з протона, нейтрона. Коли дейтерій з'єднується з киснем, він утворює важку воду.

Дейтрони (грец. deuterios – другий) – ядра дейтерію, що складається з одного протона та одного нейтрона – ізотопу водню з масовим числом 2.

Детерміністичні ефекти (соматичні) – це зміни в органічних системах при опроміненні великими дозами, по відношенню до яких є поріг. Вони підрозділяються на гострі, підгострі та хронічні.

Джерело іонізуючого випромінювання (ДІВ) – об'єкт у будь-якому агрегатному стані, який містить радіоактивні речовини, чи технічний пристрій, що випускає або за визначених умов може випускати іонізуюче випромінювання, на які поширюється дія санітарних норм і правил.

Доза іонізуючої радіації, яку систематично одержує людина ($D_{\text{заг}}$ – загальна доза), визначається за формулою $D_{\text{заг}} = D_{\text{зовн}} + D_{\text{внутр}} + D_{\text{інгал}}$, де $D_{\text{зовн}}$ – зовнішня доза, яка формується випромінюванням природних радіоактивних елементів, космічним випромінюванням, випромінюванням штучних радіоактивних ізотопів, які потрапляють у навколишнє середовище в результаті атомних вибухів, роботи та аварій на підприємствах атомної енергетики, випромінювання рентгенівських апаратів та інших джерел, які опромінюють людину; $D_{\text{внутр}}$ – це доза опромінення, яку людина одержує внаслідок надходження всередину організму з продуктами харчування, водою як природних, так і штучних радіоактивних ізотопів; $D_{\text{інгал}}$ – доза інгаляційного опромінення, яка формується за радіоактивних речовин, що потрапляють в організм через органи дихання з повітрям у вигляді найдрібніших радіоактивних пилинок. Отже, це частка дози внутрішнього опромінення, але утворюється вона специфічним шляхом і не залежить від вмісту радіоактивних ізотопів у продуктах харчування та воді.

Доза випромінювання – величина, що використовується для оцінки дії іонізуючого випромінювання на різні речовини і живі організми.

Доза еквівалентна (D_e) – параметр, що характеризує оцінку впливу різних видів випромінювання на організм людини.

Доза експозиції – кількість енергії рентгенівського або гамма-випромінювання, поглинутої одиницею маси повітря.

Доза коммитментна – очікувана доза опромінення, застосовується в радіаційному захисті, гігієні та зоогігієні.

Доза поглинання (D_n) – кількість енергії будь-якого виду випромінювання, поглинута одиницею маси опроміненої біологічної речовини, вимірюється в греях ($1\text{Гр} = 1\text{ Дж/кг}$). Застосовується і позасистемна одиниця – рад ($1\text{ рад} = 0,01\text{ Гр} = 0,01\text{ Дж/кг}$).

Дозовий поріг – межа дозового навантаження, у разі перевищення якої проявляється ефект дії радіації.

Дозиметрія іонізуючого випромінювання – 1. галузь прикладної ядерної фізики і радіобіології, де розглядаються фізичні величини, що характеризують дію іонізуючої радіації на об'єкти живої і неживої природи, властивості іонізуючого випромінювання, хімічні взаємодії випромінювання з речовиною, а також методи і прилади вимірювання цих величин; 2. сукупність методів вимірювання дози іонізуючої радіації.

Допустима доза – сумарна доза радіації, яку одержує людина протягом 5 тижнів.

Елімінація радіаційна – усунення радіаційного ураження клітин, тканин, органів.

Ефект Петко – сильний радіаційний ефект дуже малих доз радіації за умови їх тривалої дії. Ефект Петко пов'язаний з ураженням радіацією мембран.

Ефект "свідка" – це контакт клітин, які не опромінені, з клітинами, які були піддані опроміненню. З ефектом "свідка" пов'язаний цитотоксичний ефект, а також поняття радіоміметики.

Забруднення радіаційне – наявність радіоактивних речовин у кількостях, що перевищують затверджені Міністерством охорони здоров'я України нормативні величини в матеріалах чи на їх поверхні, на поверхні тіла людини або в іншому місці, де вони небажані або можуть зашкодити.

Закон Бергон'с–Трибонто – у 1906 році французькі біологи встановили, що радіочутливість має пряму залежність від проліферативної активності.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) – засоби, що перешкоджають надходженню радіонуклідів до організму тварин і людини.

Збуджений стан – це такий стан атомів чи молекул, коли вони мають енергію більшу, ніж в основному стані; це високий енергетичний

стан атома чи молекули при проходженні через речовину іонізуючого випромінювання, що збуджує їх, переводячи до такого стану.

Зіверт – еквівалентна доза будь-якого опромінювання (зовнішнього, інкорпорованого в системі CI), поглинена 1 кг біологічної тканини, утворює такий же біологічний ефект, як і поглинена доза в 1 Гр фотонного випромінювання (H), позначається "Зв", міжнародне позначення – "Sv". Зіверт являє собою одиницю поглиненої дози, помножену на коефіцієнт, що враховує неоднакову радіоактивну небезпеку для організму різних видів іонізуючого випромінювання. 1 Зв = 100 бер.

Знезараження – комплексні заходи зниження забруднення, зокрема і радіонуклідного. Знезараження включає у себе механічну і фізико-хімічну дезактивації, дегазацію, дезінфекцію, дезінсекцію, дератизацію, санітарну обробку.

Зовнішнє опромінення – джерело опромінення зовні організму, що впливає на певний організм через шкіру, системи органів травлення та дихання.

Зона аварії – територія, на якій рівні опромінення населення або персоналу, обумовлені радіаційною чи радіаційно-ядерною аварією, перевищують або можуть перевищити встановлені НРБУ–97 межі дози опромінення.

Зона контрольована (у межах даного документа) – будь-яка підпорядкована адміністрації установи територія, на якій передбачений посилений дозиметричний контроль. Розміри контрольованої зони встановлюються адміністрацією установи за результатами радіаційного контролю з урахуванням усіх можливих варіантів обстановки, що зустрічається на практиці.

Зона спостереження (у межах даного документа) – територія за межами санітарно-захисної зони, на яку за нормальної експлуатації джерела іонізуючого випромінювання може поширюватися радіаційний вплив.

Зона санітарно-захисна (у межах даного документа) – будь-яка територія навколо джерела іонізуючого випромінювання за межами місця чи зони роботи персоналу категорії А, де рівень опромінення людини в умовах нормальної експлуатації джерела іонізуючого випромінювання може перевищити квоту граничної дози для категорії В.

Ізотопи (topos – місце) – це атоми одного елемента, які мають різну масу, але однаковий електричний заряд атомних ядер, тобто різну кількість нейтронів при однаковій кількості протонів. Отже, ізотопи – це хімічні елементи з однаковими хімічними властивостями, але різною

атомною масою. Вони в періодичній системі елементів знаходяться під одним номером.

Інкорпороване опромінення – джерело опромінення, яке з повітрям, водою, їжею потрапило в середину організму та опромінює його. Деякі поглинуті радіонукліди в організмі розподіляються рівномірно (трійтій, вуглець, залізо, полоній), деякі накопичуються в кістках (радій, фосфор, стронцій), деякі – в м'язах (калій, рубідій, цезій), йод накопичується в щитовидній залозі, а в печінці, нирках, селезінці накопичуються рутеній, полоній, ніобій.

Іонізація – це перетворення нейтральних атомів чи молекул на частинки, які несуть позитивний або негативний заряд; це ендотермічний процес утворення іонів з нейтральних атомів. Атом, що втратив електрон, стає іоном з позитивним зарядом.

Іонізуюча здатність – це кількість пар іонів, що утворюються частинкою в одиниці об'єму, маси середовища або на одиницю довжини шляху.

Іонізуюче випромінювання – будь-яке випромінювання, яке здатне прямо або опосередковано іонізувати навколишнє середовище. Усі види іонізуючого випромінювання відзначаються високою енергією і викликають зміни в біологічній структурі живої клітини, що можуть призвести до її загибелі.

Іонізуюча здатність – це кількість пар іонів, що утворюються частинкою в одиниці об'єму, маси середовища або на одиницю довжини шляху.

Канцерогени – радіаційні або хімічні реагенти, під впливом яких виникає трансформація клітин.

Кисневий ефект – зміна біологічної дії радіації у залежності від наявності та кількості кисню, зумовлена взаємодією кисню з вільними радикалами, які виникають у результаті опромінення. При зниженні концентрації кисню в клітинах під час опромінення зменшується ефект променевого впливу. Кисневий ефект проявляється на різних рівнях організації біологічних систем.

Клітинна радіобіологія – галузь науки, що вивчає вплив іонізуючого випромінювання на клітинні процеси (поділ, етапи клітинного циклу, диференціація, регуляція онтогенезу клітин, міжклітинні взаємодії, біогенез субклітинних структур, трансдукція сигналів, генерація клітинних потоків).

Коефіцієнт поглинання (μ) – ослаблення потоку заряджених частинок під час проходження крізь шар речовини. Та частина енергії, яка відповідає ослабленню потоку, поглинається даною речовиною. Механізми взаємодії заряджених частинок з поглинальним середовищем наступні: пружне розсіювання, непружне розсіювання, втрати на утворення гальмівного випромінювання, ядерні реакції.

Коефіцієнт якості (коефіцієнт якості шкоди) – коефіцієнт, який показує, у скільки разів радіаційна небезпека даного виду випромінювання вища, ніж рентгенівського, при однаковій поглинутій дозі в тканинах організму. Чим більший цей коефіцієнт, тим небезпечніша доза випромінювання.

Комптонівський ефект – це явище, коли фотони при зіткненні з речовиною виявляють корпускулярні властивості.

Комптонівське розсіювання – процес, при якому відбувається пружне (жорстке) зіткнення між падаючим фотоном випромінювання і вибитим електроном атома з передачею останньому лише частини енергії фотона. Енергію, що залишилася, несе другий фотон, який утворюється в результаті цієї взаємодії. Напрямок руху вторинного фотона відрізняється від первинного, тому цей процес називається розсіюванням фотона на електроні.

Контроль дозиметричний – вимір потужностей доз випромінювання в місцях життєдіяльності людини, визначення еквівалентних та ефективних, очікуваних і нагромаджуваних, індивідуальних і колективних доз опромінення від різних ДДВ, які співвідносять з установленими нормативними і контрольними рівнями.

Корпускулярне випромінювання – потік елементарних частинок з масою спокою, відмінною від нуля, що утворюються при радіоактивному розпаді, ядерних перетвореннях або генеруються на прискорювачах. Це альфа-, бета-частки, нейтрони, протони та ін.

Крива Брега – зображення процесу проникнення частинок углиб речовини: наростає кількість взаємодій випромінювання з атомами й молекулами, зростає число іонізацій, досягається максимум (пік Брега), а далі досить швидко зменшується до нуля.

Критична група (у межах даного документа) – група осіб населення, однорідна за одним чи декількома ознаками (статтю, віком, соціальними чи професійними умовами, місцем проживання, раціоном харчування), що піддається найбільшому радіаційному впливу за даним шляхом опромінення від даного джерела випромінювання.

Критична маса – мінімальна маса радіоактивної речовини, в якій можливе проходження самопідтримувальної ланцюгової реакції. Критична маса речовини, в якій спостерігається розпад, певною мірою залежить від геометричного об'єму речовини, густини і кількості побічних домішок, що можуть поглинати нейтрони. Критична маса у формі кулі є найменшою, оскільки куля має найменше відношення площі поверхні до об'єму.

Кумуляційний ефект – здатність малих доз радіації накопичуватися в організмі.

Лейкопенія (leukos – білий, penia – бідність) – зменшення кількості лейкоцитів нижче 4 тисяч в 1 мм^3 крові внаслідок променевого ураження.

Лінійна передача (втрата) енергії (ЛПЕ, ЛВЕ L) – енергія, яку втрачає заряджена частинка або фотон електромагнітного випромінювання на одиницю довжини пробігу в речовині. Вона перш за все залежить від енергії і заряду. Ця залежність різко зростає за умови зниження швидкості частинки, тому в кінці пробігу віддача енергії будь-якої зарядженої частинки є максимальною. У системі СІ одиницею ЛПЕ є джоуль на метр (Дж/м).

Лінійна густина радіації – кількість пар іонів, що утворюються за одиницю пробігу (1 мкм) іонізуючої частки.

Люмінесценція – свічення речовин, непов'язане з тепловим випромінюванням (холодне свічення). Виникає внаслідок опромінення речовини іонізуючими променями, світлом, проходження крізь неї електричного струму.

МАГАТЕ – Міжурядова організація з питань мирного використання ядерної енергії.

Магнітно-резонансна томографія (МРТ) – це складний високоінформативний неінвазивний діагностичний метод. Така томографія заснована на явищі ядерно-магнітного резонансу. Суть методу полягає в тому, що сигнали, які генеруються в тілі людини ядрами атомів водню при дії радіочастотними імпульсами в магнітному полі, приймаються у вигляді ехокамери сигналів і використовуються для створення зображень внутрішніх органів у будь-якій площині. Аналіз цих зображень допомагає встановити правильний діагноз і призначити лікування. Рентгівське або інші види потенційно небезпечного іонізуючого випромінювання в МРТ не використовуються. Впроваджується у медичній світовій практиці з 1980 року, а в Україні з 1990 року.

Мала доза радіації – є декілька визначень, наприклад: доза опромінення і поглинання до 0,5 Гр; доза радіації, за дії якої не спостерігається ураження; доза, що на два-три порядки нижча від LD_{100} ; доза, що не перевищує природного фону тощо.

Міра радіочутливості – доза, що обумовлює загибель 50 % та більше опромінених об'єктів.

МКРЗ – міжнародна комісія з радіаційного захисту.

Модифікатори – це фактори, що обумовлюють модифікацію. Поділяють на фізичні (температура, освітлення, тиск, вологість, радіація тощо), хімічні (рН, осмотичний тиск, розчинність, склад тощо), біологічні (активність проліферації, гормони, ферменти, гормезис, імунна система тощо). Модифікатори поділяють на профілактичні, пострадіаційні, терапевтичні. Модифікація (латин. – зміна, видозміна) біологічна – видозміна, перетворення, поява нових зворотних або незворотних ознак, властивостей; якісно відмінні стани під впливом радіації; зміна ознак чи властивостей організму, які не передаються за спадковістю; неспадкові зміни біологічної системи, обумовлені зміною умов довкілля та зовнішніми факторами, наприклад іонізуюче опромінення. Визначають декілька рівнів модифікації: субклітинний, клітинний, тканинний, органний, організмений. Модифікації можуть мати зворотний характер (наприклад, загар шкіри). Якщо модифікації корисні, то їх називають "адаптація", а якщо шкідливі, то вони можуть ліквідуватися внаслідок природного відбору. Модифікація пов'язана з пластичністю біологічної системи.

Моноенергетичне випромінювання – іонізуюче випромінювання, яке складається з одного виду кінетичної енергії, з фотонів однакової енергії або часток одного виду з різними рівнями енергії. Це зміна ознаки чи властивості організму, яка не передається нащадкам.

Мультигенеративний канцерогенез – у опромінених батьків потомство, яке не опромінювалося, має специфічні та неспецифічні трансформації, характерні для канцерогенезу.

М'яке космічне випромінювання – складова космічного іонізуючого випромінювання, що поглинається шарами свинцю 8...10 см, заліза – 15...20 см.

Народження пар – процес взаємодії γ -фотонів з речовиною, при якому з квантів поля виникає пара електрон–позитрон.

Нейтрино (італ. Neutrino, зменшене від нейтрона) – стабільно елементарна незаряджена частинка (ν) зі спіном, маса дорівнює нулю.

Нейтрон (латин. neutron – ні той, ні інший) – електрично нейтральна елементарна частинка (n) атома всіх елементів за винятком водню з масою спокою 1,00898.

Нейтронोगрафія – вивчення структури ядра атома за допомогою нейтронів; вивчення конденсованих середовищ нейтронними методами.

Некогерентне розсіювання – так називається ефект Комптона.

Немоноенергетичне випромінювання – випромінювання, що складається з фотонів різних енергій або частинок одного виду різних кінетичних енергій.

Неспрямоване випромінювання – розсіяне (без визначеного напрямку) іонізуюче випромінювання.

НІЛВ – низькоінтенсивне лазерне випромінювання.

Норми радіаційного ураження – розрізняють такі: разові, сумарні, гранично-допустимі, напівлегальні, критичні, летальні.

Нукліди (грец. ядро) – вид атомів, що характеризується певним масовим числом, атомним номером і енергетичним станом та має тривалість життя, достатню для дослідження; це загальна назва атомів, які мають в ядрі однакову кількість протонів і різну кількість нейтронів, тому вони мають однаковий заряд і займають одну клітину в системі елементів Д.І. Менделєєва. Нукліди розрізняють стабільні і радіоактивні. Радіонукліди поділяють на коротко-, середньо- та довгоживучі. Тривалість життя радіонуклідів достатня для їх дослідження. Нукліди одного елемента називають ізотопами. Відомо понад 1400 нуклідів.

Нуклони – це спільна назва протонів і нейтронів.

Оже-електрони – це ті електрони, які вилетіли з верхніх орбіт за межі атома. Їх іонізуюча здатність реалізується в безпосередній близькості до місця вильоту.

Парадокс радіобіологічний – це невідповідність між малими кількостями поглинутої енергії іонізуючого випромінювання і крайнім рівнем реакції біологічного об'єкта (аж до летального). Так, для людини летальна поглинута доза одноразового опромінення всього тіла гамма-випромінюванням дорівнює 6 Гр (600 рад). Уся ця доза енергії, перетворена в тепло, може нагріти тіло лише на 0,0014 °С. Радіаційний парадокс обумовлюється тим, що опосередкована (побічна) дія радіації на організм значно більша, ніж її пряма дія. Під опосередкованою (побічною) дією розуміють зміни молекул, викликані іонізацією речовини і наступними фізичними і хімічними реакціями. При цьому іонізуюча енергія

перетворюється в хімічну, а остання, руйнуючи великі органічні молекули (наприклад, ДНК), створює біологічний ефект (у тому числі токсичний некроз клітини з наступним навантаженням на внутрішні органи організму тварин).

Період напіврозпаду ($T_{1/2}$) – час, протягом якого число радіоактивних атомів ізотопу зменшується вдвічі, тобто час, протягом якого радіоактивність зменшується у два рази.

Паливна касета – конструкція з таблеток урану і корпусу, що збирає (утримує) їх разом. Товщина цього корпусу 10...20 см і довжина – декілька метрів.

Позитрон (латин. *positivus* – позитивний, трон – скорочений вираз "електрон", позначається " e^+ ") – античастинка електрона. Позитрони стабільні, але в речовині через анігіляцію з електронами існують дуже короткий час. Позитрони утворюються в процесах народження пар e^+e^- гамма-квантами, при розпаді мюзонів тощо.

Прискорювач – пристрій для одержання заряджених частинок (електронів, протонів, атомних ядер, іонів з підвищеними енергіями), в якому використовуються електричні та магнітні поля, що впливають на швидкість частинок. Розрізняють прискорювачі *лінійні* (в яких траєкторії частинок близькі до прямої лінії) та *циклічні* (в яких траєкторії частинок близькі до кола або спіралі).

Проліферація (латин. *proles* – потомство, *fero* – несу) – розростання тканини організму шляхом новоутворення і розмноження клітин.

Пролонговане опромінення (D_{prol}) – це такий спосіб радіаційного впливу, при якому об'єкт отримує дозу за час, що значно перевищує тривалість гострого опромінення, і під час опромінення об'єкт може істотно змінюватися. Пролонговане опромінення може бути безперервним і фракційним.

Променева хвороба – захворювання людини і тварин, що виникає внаслідок дії різних видів іонізуючої радіації та характеризується симптомокомплексом. Він залежить від виду опромінення, його дози, розподілення дози в організмі, локалізації джерела опромінення. *Променева хвороба* – це загальне захворювання, що виникає після одноразового чи багаторазового опромінення.

Проникна здатність – довжина пробігу частинки в речовині до її повного зникнення.

Проникна радіація – проникнення радіації до організму та її уражаюча дія, що виникає при опроміненні.

Протон (*p*) (грец. *protos* – перший) – стабільна елементарна частка зі *спіном* (*обертання*) і масою в 1836 електронних мас, належить до баріонів. Це ядро легкого ізотопу атома водню (*протію*). Разом з нейтронами протон утворює всі атомні ядра і визначає фізичні та хімічні властивості елементів.

Повна колективна ефективна еквівалентна доза – колективна ефективна еквівалентна доза, яку одержать покоління людей від якогонебудь джерела радіації за весь час його подальшого існування.

Пружний співудар – це фотоелектричний процес передавання енергії.

Рад – одиниця поглинутої дози; відповідає поглинутій енергії 100 ерг на 1 кг речовини ($1 \text{ Рад} = 100 \text{ ерг/г} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/кг} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр} = 1 \text{ сГр}$; $\text{Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 104 \text{ ерг/г} = 100 \text{ рад}$). Доза в 1 рад означає, що у кожномуграмі опроміненої речовини поглинено до 100 ерг енергії.

Радіаційна активність зразка – число розпадів за секунду в даному радіоактивному зразку, одиниця виміру – бекерель (Бк).

Радіаційна біохімія – наука, що вивчає зміни в обміні речовин, які викликані появою в метаболічних системах клітин продуктів радіаційно-хімічних перетворень.

Радіаційна біофізика – наука, що вивчає первинні процеси передавання енергії іонізуючого випромінювання атомам і молекулам речовини, що супроводжується збудженням станів у живій клітині, з чого починається будь-яке радіобіологічне явище.

Радіаційна ботаніка (*радіобіологія рослин*) – наука, що вивчає вплив радіації на все розмаїття рослин.

Радіаційна вірусологія – галузь науки, що вивчає вплив радіації на структуру бактеріофагів і вірусів та їхні властивості (вірулентність, життєвий цикл тощо).

Радіаційна гематологія – галузь науки, що вивчає вплив радіації на кров, формені елементи, кровотворення (*мієлопоез*) тощо.

Радіаційна генетика – наука, що вивчає механізм спадкових змін (мутації) організмів у результаті опромінення, механізм їх збереження або елімінації (латин. *eliminatio* – винесення, виключення, видалення), припинення, поширення в геномі популяції тощо.

Радіаційна екологія (*радіоекологія*) – розділ екології, що вивчає накопичення, міграцію, кругообіг радіонуклідів у біосфері, земній корі, Світовому океані, континентальних водах, ґрунті, повітрі, окремих природних аренах і ландшафтах та вплив радіації на довкілля, вплив іонізуючого

випромінювання, зумовленого наявністю радіоактивних речовин у довкіллі, на біогеоценози.

Радіаційна імунологія – галузь науки, що вивчає вплив радіації на специфічні процеси імунітету, гуморального захисту та узагальнює результати імунологічних досліджень.

Радіаційна мембранологія – галузь науки, що вивчає зміни в структурі й функції мембран під впливом іонізуючого опромінення (транспорт речовин, сприйняття сигналів, підтримання мембранного біоелектричного потенціалу, регуляторні процеси тощо).

Радіаційна молекулярна біологія – наука, що вивчає вплив іонізуючого випромінювання на процеси, в яких беруть участь біологічні макромолекули (реплікація ДНК, транскрипція, трансляція, біосинтез білкових молекул, біогенез клітинних структур тощо).

Радіаційна онкологія – галузь науки, яка вивчає вплив радіації на злоякісне перетворення клітин, розробляє можливості використання радіації для блокування росту злоякісних клітин тощо.

Радіаційна популяційна генетика – галузь науки, що вивчає механізм реалізації спадкових змін, індукованих радіацією, у популяціях.

Радіаційна селекція – галузь науки, близька до радіобіології рослин та радіаційної генетики, вивчає методи одержання вихідного матеріалу для селекції культурних рослин шляхом дії радіації на спадкові зміни.

Радіаційна хімія – наука, що досліджує властивості хімічних форм, які виникають унаслідок взаємодії іонізуючих випромінювань з речовинами, та особливості їх хімічних перетворень. Ці процеси впливають на функціональну здатність різних систем клітини.

Радіаційна цитогенетика – галузь науки, що вивчає механізм радіаційно-індукованих перетворень цитогенетичних структур.

Радіаційне захоплення – захоплення ядром атома нейтрона з наступним випромінюванням γ -квантів. Цей процес обумовлює перетворення ядер.

Радіація – виділення елементарних частинок чи електромагнітних хвиль під час поділу атомів.

Радіоактивне забруднення біосфери – потрапляння радіоактивних ізотопів до складу живих організмів і у середовище їх життя (атмосферу, гідросферу, ґрунт), що відбувається в результаті ядерних вибухів, аварій на АЕС, викидів у довкілля радіоактивних відходів, розробки радіоактивних руд, у результаті використання радіоактивних речовин у військовій та науковій діяльності.

Радіоактивні аерозолі – аерозолі з радіоактивною дисперсійною фазою. Природні радіоактивні аерозолі містять у собі радіоактивні ізотопи калію, полонію, торію, урану тощо. Штучні радіоактивні аерозолі утворюються, наприклад, при атомних вибухах. Вони містять уламки поділу ядра і різні радіоактивні ізотопи.

Радіоактивні води – природні води, які містять підвищену кількість радіоактивних речовин. У підземних водах найчастіше присутні ізотопи радію-226, урану-238, радону-222. Радіоактивні води використовуються в лікувальних цілях і як пошукова ознака радіоактивних елементів.

Радіоактивні відходи (РАВ) – продукти, які утворюються при роботах з радіоактивними речовинами і містять радіоактивні ізотопи вище норми радіоактивної безпеки. Для профілактики шкідливого впливу на організм людини і оточуючого середовища тверді та рідкі радіоактивні відходи після відповідної обробки захоронують у спеціальних збірниках у підземних сховищах.

Радіоактивні елементи – хімічні елементи, всі ізотопи яких є радіоактивними. У періодичній таблиці елементів ці елементи починаються з технецію-98.

Радіоактивні препарати – у медичній практиці це речовини, що містять радіоактивні ізотопи і застосовуються для медико-біологічних досліджень, діагностики і лікування.

Радіоактивні речовини (РР) – це речовини, до складу яких входять радіоактивні ізотопи; речовини, які здатні випромінювати енергію методом радіоактивного розщеплення.

Радіоактивність (від латин. *radio* – "випромінюю", *radius* – "промінь" і *activus* – "дієвий") – явище спонтанного перетворення нестійкого ізотопу хімічного елемента в інший ізотоп (зазвичай іншого елемента) (радіоактивний розпад) шляхом випромінювання гамма-квантів, елементарних частинок або ядерних фрагментів.

Радіоактивний аналіз – метод визначення якісного і кількісного складу речовин, який базується на вимірюванні енергії випромінювання радіоактивних ядер ізотопів, що утворюються під впливом потоку нейтронів, заряджених часток (протонів) тощо або гамма-квантів.

Радіоактивний розпад – перетворення ядер, що супроводжується електромагнітним випромінюванням – гамма-квантів (гамма-фотонів).

Радіобіологія – наука, яка вивчає дію іонізуючого випромінювання на живі організми та їх угруповання. Це наука про дію всіх видів

іонізуючого випромінювання на організми та їх сукупності. Радіобіологія займається пошуками різних заходів і засобів захисту організму від випромінювання та методів і шляхів його післярадіаційного відновлення від ураження.

Радіобезпека – комплекс заходів, що забезпечують безпеку роботи з радіоактивними речовинами та іншими джерелами іонізуючого випромінювання. В Україні діють нормативи та принципи радіаційної безпеки.

Радіодекомпоратори – це речовини, що прискорюють виведення радіонуклідів з організму через травний тракт, нирки, органи дихання і шкіру.

Радіометрія – розділ радіофізики, що вивчає способи вимірювання променистої енергії і радіації.

Радіопротекція – зниження вражаючої дії іонізуючого опромінення, або підвищення стійкості до опромінення за допомогою фізичних (низька температура, вологість, освітленість, тиск), хімічних (агрегатний стан, зв'язування вільних радикалів, хімічна взаємодія), біологічних (стан нервової, імунної, ферментної систем, інтенсивність обміну речовин) радіопротекторів.

Радіочутливість – чутливість організмів до дії іонізуючого опромінення.

Радіаційна аварія – незапланована подія на будь-якому об'єкті з радіаційною чи радіаційно-ядерною технологією, при якій відбувається втрата контролю над джерелом випромінювання і реальне (або потенційне) опромінення людей.

Радіаційні втрати – втрати енергії заряджених частинок на утворення гальмівного рентгенівського випромінювання.

Радикали – уламки молекул, що можуть існувати самостійно лише короткі проміжки часу. Вони вступають у зв'язки з якою-небудь іншою молекулою або іншими радикалами.

Реакція надчутливості (РНЧ) рослин – загибель клітин, ініційована розпізнаванням ними патогену. Це призводить до невротизації тканини у місці локалізації патогену та обмеження зони його колонізації. Проявляється РНЧ у прискореній загибелі інфікованих клітин – це тип захисту рослин від фітопатогенних мікроорганізмів. Іонізуюче випромінювання застосовується для дослідження основних етапів розвитку реакції надчутливості у залежності від дозових та часових характеристик.

Рекомбінація електронів – повернення електронів на свої місця.

Рентген (Р) – доза рентгенівського або гамма-випромінювання, під дією якого в 1 см³ сухого повітря за нормальних умов утворюються іони, що несуть одну електростатичну одиницю кількості електрики кожного знака; доза фотонного випромінювання, при якій корпускулярна емісія, яка виникає в 1 см³ повітря, утворює іони, що несуть 1 СІСЕ кількості електрики кожного знака ($1\text{Р} = 2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг). Отже, доза в 1 Р відповідає утворенню 2 млрд пар іонів в 1 см³ повітря.

Рентгенівське випромінювання – електромагнітне випромінювання, складене з гальмівного та характеристичного випромінювання; випромінювання, що утворюється при гальмуванні швидких електронів в електричному полі ядра атомів речовини або у зв'язку з перебудовою електронних оболонок атомів при іонізації і збудженні атомів і молекул. При різних переходах атомів і молекул зі збудженого стану до стану спокою може здійснюватися випромінювання світла (інфрачервоні, ультрафіолетові промені).

Репарація (латин. герарго – відновлюю, знов одержую) – це властивість клітинами всіх організмів здійснювати процес відновлення природної структури ДНК, ушкодженої при нормальному біосинтезі ДНК у клітині або в результаті впливу фізичних чи хімічних факторів. Здійснюється репарація під впливом спеціальних ферментів клітини. Підтвердження наявності репарації вперше були одержані в 60-х роках ХХ ст. на одноклітинних організмах, які підлягали іонізуючому опроміненню. В ушкодженій клітині розрізняють два типи ушкодження: *потенційно летальне* та *сублетальне*. Потенційно летальні ушкодження – це такі, що можуть викликати загибель клітини, але за певних умов клітини можуть бути і відновлені. Під сублетальними ушкодженнями розуміють такі типи, які самі по собі ще не приводять до загибелі клітини, але при наступних її ушкодженнях можуть спричинити загибель клітини. Тому репарацію розрізняють двох типів, що здійснюються за умови потенційно летального і сублетального ушкоджень.

Референтний вік – це інтервал часу між моментом надходження радіонуклідів до організму та віком 70 років.

Рідкі радіоактивні відходи – розчин неорганічних речовин, органічні рідини (масла, розчинники).

Розсіяне випромінювання – випромінювання, яке не має певного напрямку розповсюдження.

Сенсибілізатор – конкретний фактор, що підвищує чутливість біологічної системи до його дії, наприклад чутливість до радіації підвищують кисень, залізо, ртуть тощо. Сенсибілізатори поділяють на фізичні, хімічні та біологічні.

Сенсибілізація (латин. sensibilis – чутливий) – процес, внаслідок якого підвищується чутливість тваринного організму до дії різних чинників.

Світловий удар – періодичне короткочасне опромінення рослин сильним світлом.

Сільськогосподарська радіологія – галузь науки, що розробляє й обґрунтовує агрохімічні, агротехнічні та інші заходи для запобігання накопиченню радіоактивних речовин у ґрунті, рослинах, кормах, продуктах харчування та потраплянню їх в організм людини.

Сила дози – доза іонізуючої радіації випромінювання або поглинання речовиною за одиницю часу. Одиниці вимірювання мР/год, Зв/год.

Синдром радіаційного ураження – ушкодження окремих клітин, тканин, складних інтегрованих систем організму прямою дією іонізуючого опромінення та ряду побічних процесів, які супроводжуються зниженням властивих для них фізіологічних функцій. Розрізняють синдром I, II, III рівнів. Синдром I рівня спричинений інактивацією клітин кровотворної тканини кісткового мозку (кістковомозковий) та меристеми у рослин. Синдром II рівня спричинений ушкодженням клітин епітелію травного тракту (гастроінтестинальний). Синдром III рівня розвивається внаслідок ушкодження клітин центральної нервової системи (синдром ЦНС).

Соматичні ефекти радіації – пошкодження, що проявляються протягом життя організму, але не передаються потомству.

Соматичний канцерогенез – трансформація соматичних клітин, які розмножуються мітотичним поділом.

Спін (англ. spin – крутитися, обертання) – власний момент імпульсу, кількості руху мікрочастинок, що має квантову природу і не пов'язаний з рухом частинки як цілого.

Стала розпаду – характерна величина для даного ізотопу, що вказує на частину або частку радіоактивних атомів, які розпадаються за одиницю часу.

Стохастичні (ймовірні) ефекти – ефекти, які не пов'язані з дозовим порогом; випадкові, ймовірні ефекти, обумовлені малими дозами, які певною мірою пов'язані з теорією мішені; ті радіобіологічні реакції, які не мають дозового порога (аберації хромосом, формування точкових му-

тацій, втрата проліферативної активності у результаті опромінення, що супроводжуються патологічними процесами в клітині та організмі). Для прояву стохастичних ефектів іноді потрібні досить тривалі проміжки часу після опромінення.

Сублетальні uszkodження – це такі типи uszkodжень, які самі по собі ще не призводять до загибелі клітини, але при наступних їх uszkodженнях можуть обумовити загибель клітин.

СУЗ – система управління захистом. Головним чином складається з нейтронопоглинаючих стрижнів.

Сцинтиляція – мерехтіння, світлові ефекти, короточасні спалахи світла, що виникають під час проходження окремої зарядженої мікрочастинки крізь деякі речовини, називають *сцинтиляторами*, або *фосфорами*.

ТВЗ – тепловидільний збір, що включає паливну касету і її кріплення. Знаходиться в активній зоні реактора.

Тверді радіоактивні відходи – вироби, деталі машин та механізмів, матеріали, біологічні об'єкти, відпрацьовані радіоактивні джерела.

Тератогенна дія радіації – дія іонізуючої радіації на ембріон у період вагітності, що обумовлює появу потворностей в онтогенезі та в наступних поколіннях.

Термалізація – зниження енергії активованих електронів при іонізації за рахунок їх співудару з атомами і молекулами.

Термоядерне паливо – ізотопи, які використовують для одержання вибуху в результаті реакції синтезу їх атомних ядер. Як термоядерне паливо застосовують ізотопи водню – дейтерій і тритій.

Толерантна доза опромінення – доза, що дорівнює 1/100 порогової еритемної дози. Вона експериментально не обґрунтовувалася, а визначена із суто логічних міркувань Д. Матшеллерем (США) у 1925 році.

Трек – слід у формі скупчення іонів, який залишають заряджені частинки високої енергії у речовині; відбиток зарядженої частинки у речовині, однак це не траєкторія, а певний об'єм речовини, яка підлягає радіаційно-хімічним перетворенням після проходження частинки.

Тритій (латин. tritium – третій) – у вільному вигляді це радіоактивний газ, ізоотп водню з масовим числом 3. Ядро тритію складається з протона і двох нейтронів. Період напіврозпаду 12,26 років.

Ультрафіолетове випромінювання – найбільш короткохвильова частина спектра сонячного світла (довжиною хвилі 400×10^{-9} м).

Українське ядерне товариство – створене у квітні 1993 року товариство, діяльність якого спрямована на роботу з молоддю, студентами, учнями, громадськістю; веде інформативну та видавничу роботу через засоби масової інформації; займається встановленням міжнародних зв'язків та вирішенням екологічних проблем тощо.

Уражаючі радіоактивні продукти – це альфа-, бета-частинки і гамма-випромінювання.

Ураження комбіноване при ядерному вибуху – одночасне ураження ударною хвилею, світловим випромінюванням і проникною радіацією. Кожна зі складових комбінованого ураження ускладнює і підсилює наслідки ураження.

Уран – радіоактивний метал сріблястого кольору з голубуватим відтінком, має високу хімічну активність. У природі зустрічається лише у вигляді сполук. Вміст урану в рудах не перевищує 1 %. Як ядерне паливо використовується уран-238. До основних ізотопів урану належать уран-333, уран-234, уран-235, уран-239.

Фактор зміщення дози (ФЗД) – використовується для визначення захисної дії радіопротектора, що розраховується діленням напівлетальної дози захищеного організму на напівлетальну дозу для незахищеного організму.

Фактор розподілу дози – зміни біологічної ефективності опромінення, зумовлені нерівномірним розподілом по тканинах організму поглинутих радіонуклідів.

Ферміони (від прізвища фізика *Енріко Фермі*) – спільна назва для протонів, електронів, нейтронів, нейтрино.

Фотоэффект – випромінювання електронів речовиною під дією світла.

Фотон – елементарна частинка, квант електромагнітного випромінювання (у вузькому розумінні – світло).

Фотоелектрони – електрони, які виникають унаслідок фотоелектричного ефекту, при цьому добуваються з орбіт атома.

Фотоелектричне поглинання – процес, при якому енергія падаючого фотона повністю поглинається атомом, з якого внаслідок цього процесу вилітає електрон з енергією, що відрізняється від енергії падаючого фотона за значенням енергії зв'язку. За умови фотонів порядку атомних енергій зв'язку фотоэффект є головним механізмом поглинання γ -випромінювання атомами.

Фотосинтетично активна радіація (ФАР) – мінімальна кількість сонячної радіації, за якої починає здійснюватися фотосинтез, складає біля 0,17 МДж.

Характеристичне випромінювання – фотонне випромінювання з дискретним спектром, яке виникає при зміні енергетичного стану атома.

Шар повного поглинання – товщина будь-якої речовини, що вдвічі забезпечує захист від проникної радіації.

Швидкі ядра – генеровані потоки ядер за допомогою прискорювачів практично всіх хімічних елементів.

Штучне джерело іонізуючого випромінювання – джерело випромінювання, створене людиною: ядерні вибухи, реактори АЕС, прискорювачі заряджених частинок, рентгенівські апарати, апарати засобів зв'язку високої напруги тощо.

Ядерна зброя – зброя, дія якої заснована на використанні енергії, яка вивільняється під час ядерних реакцій. Належить до зброї масового ураження. Поняття "ядерна зброя" містить у собі: власне ядерні заряди (бойові частини ракет і торпед, бомб, артилерійські снаряди тощо), засоби їх доставки до цілі (ракети, літаки, торпеди, артилерійські гармати тощо), засоби керування.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. **Авотин, Ю. П.** Практикум по радиоактивности [Текст] / Ю. П. Авотин. – М. : Энергоатомиздат, 1974. – 72 с.
2. **Аглинцев, К. К.** Дозиметрия ионизирующего излучения [Текст] / К. К. Аглинцев. – М. : Наука, 1988. – 120 с.
3. **Алексахин, Р. М.** Сельскохозяйственная радиоэкология [Текст] / Р. М. Алексахин [и др.]. – М. : Экология, 1992. – 400 с.
4. **Алексахин, Р. М.** Ядерная энергия и биосфера [Текст] / Р. М. Алексахин. – М. : Энергоиздат, 1982. – 216 с.
5. Атлас. Україна. Радіоактивне забруднення. – К. : МНС України, 2002. – 46 с.
6. Биофизика [Текст] / П. Г. Костюк [и др.]. – К. : Наука, 1988. – 376 с.
7. **Гродзинський, Д. М.** Радіобіологія [Текст] / Д. М. Гродзинський. – К. : Либідь, 2001. – 448 с.
8. **Гудков, І. М.** Сільськогосподарська радіоекологія [Текст] / І. М. Гудков, М. М. Вінничук. – Житомир : ДАУ, 2003. – 472 с.
9. **Гудков, І. М.** Особливості формування поглинутих доз та віддалені радіобіологічні ефекти у сільськогосподарських рослин на забруднених радіонуклідами територіях [Текст] / І. М. Гудков, Д. М. Гродзинський // Вісник ДААУ. – 2001. – № 1. – С. 8–11.
10. **Гудков, І. М.** Радіаційне ураження рослин в зоні впливу аварії на Чорнобильській АЕС [Текст] / І. М. Гудков, Д. М. Гродзинський // Вісник аграрної науки. – 2001. – Спецвипуск. Квітень. – С. 43–47.
11. **Гусев, Н. Г.** Радиационные выбросы в биосфере [Текст] / Н. Г. Гусев, В. А. Беляев. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
12. **Давиденко, В. М.** Радіобіологія [Текст] / В. М. Давиденко. – Миколаїв : Вид-во МДАУ, 2011. – 248 с.
13. EKOSVIT. Новости и интересные факты в мире экологии [Электронный ресурс] . – Режим доступа: <http://ekosvit.nepopsa.com/radioekologija>.
14. **Жербин, Е. А.** Радиация, молекулы, клетки [Текст] / Е. А. Жербин, В. Е. Комар. – М. : Наука, 1984. – 87 с.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

15. Збірник матеріалів II Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://eco.com.ua/sites/eco.com.ua>.

16. **Іванов, Є. А.** Радіоекологічні дослідження [Текст] / Є. А. Іванов. – Л.: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2004. – 149 с.

17. **Іванов, Є. А.** Радіоекологічні дослідження [Електронний ресурс] : навч. посіб. – Л. : Вид. центр ЛМУ ім. Івана Франка, 2004. – 149 с. – Режим доступу : <http://www.franko.lviv.ua>.

18. Изучение свойств клеток крови крыс при действии ионизирующего излучения на фоне введения предполагаемых радиопротекторов [Текст] / А. В. Паранич, Г. М. Дубинская, В. С. Почерняева, В. П. Мищенко, А. Г. Трохименко // Биофизика. – 1996. – Т. 41, № 3. – С. 773.

19. **Кічно, В. О.** Основи радіобіології та радіоекології [Текст] / В. О. Кічно, С. В. Поліщук, І. М. Гудков. – К. : Хай-Тек-Прес, 2008. – 320 с.

20. **Клековкин, Г. В.** Радиоэкология [Текст] / Г. В. Клековкин. – Ижевск : Изд-во Удмурдского университета, 2004. – 258 с.

21. **Козлов, В. Ф.** Справочник по радиационной безопасности [Текст] / В. Ф. Козлов. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 352 с.

22. **Константинов, М. П.** Радіаційна безпека [Текст] : навч. посіб. / М. П. Константинов, О. А. Журбенко. – Суми : Університетська книга, 2003. – 152 с.

23. **Корзун, В. Н.** Радиация. Защита населения [Текст] / В. Н. Корзун, С. И. Недоуров. – К. : Наукова думка, 1995. – 112 с.

24. **Кутлахмедов, Ю. О.** Основи радіоекології [Текст] / Ю. О. Кутлахмедов, В. І. Корогодін, В. К. Кольтовер. – К. : Вища школа, 2003. – 316 с.

25. **Маврищев, В. В.** Радиоэкология и радиационная безопасность [Текст] : пособие для студ. вузов / В. В. Маврищев, А. Э. Высоцкий, Н. Г. Соловьева. – Минск : ТетраСистем, 2010. – 208 с.

26. МАИК "Наука/INTERPERIODICA". Радиационная биология. Радиоэкология [Электронный ресурс] . – Режим доступа : <http://www.maik.ru>.

27. **Маликович, В. Ф.** Основы радиационной безопасности [Текст] / В. Ф. Маликович, А. М. Панченко. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.

28. **Маргулис, У. Я.** Атомная энергия и радиационная безопасность [Текст] / У. Я. Маргулис. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 224 с.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

29. **Моисеев, А. А.** Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене [Текст] / А. А. Моисеев, В. И. Иванов. – М. : Энергия, 1980. – 252 с.
30. **Моссэ, И. Б.** Радиация и наследственность [Текст] / И. Б. Моссэ. – Минск : Университетское, 1990. – 205 с.
31. Некоторые патогенетические механизмы g-радиооблучения. Обзор [Текст] / О. И. Цебржинский, А. Ф. Киселев, Г. В. Грищенко, Т. Н. Зінченко, А. А. Руденко, А. Г. Трохименко, Б. О. Шаталин // Різдвяні біологічні читання: Наукові праці 7-х біологічних читань. – Миколаїв, 2008. – С. 17–26.
32. **Панин, В. Ф.** Экология для инженера [Текст] / В. Ф. Панин, А. И. Сечин, В. Д. Федосова. – М.: Издательский дом "Ноосфера", 2001. – 284 с.
33. **Паранич, А. В.** Компенсаторные изменения в системе АО гомеостаза при дробном облучении крыс с общей экспозиционной дозой 300 Р [Текст] / А. В. Паранич, А. Г. Трохименко // Тези 2 з'їзду радіобіологів України (з міжнародною участю). – Дніпропетровськ, 1995. – С. 125.
34. **Паранич, А. В.** О влиянии слабого СВЧ-излучения на содержание жирорастворимых витаминов А и Е в тканях крыс [Текст] / А. В. Паранич, Л. А. Чайкина, А. Г. Трохименко // Биофизика. – 1996. – Т. 41, № 2. – С. 517–519.
35. Промислова екологія [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://eco.com.ua>.
36. Пути миграции радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля [Текст] : [пер. с англ.] / Л. Дж. Апплби, Л. Девелл, Ю. К. Мишра [и др.] ; под ред. Ф. Уорнера и Р. Харрисона. – М. : Мир, 1999. – 512 с.
37. Радиационная гигиена [Текст] ; под ред. Ф. Г. Кроткова. – М. : Медицина, 1963. – 207 с.
38. Радиационная медицина [Текст] ; под ред. А. И. Бурназина и А. В. Лебединского. – М. : Мир, 1963. – 257 с.
39. Радиационные эффекты в физике, химии, биологии [Текст]. – М. : Мир, 1965. – 76 с.
40. Радиация. Дозы, эффекты, риск [Текст] : [пер. с англ.]. – М. : Мир, 1988. – 79 с.
41. Радіоекологія річок [Текст] / О. І. Мережко [та ін.]. – К. : Б. д., 1991. – 112 с.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

42. **Сауков, А. А.** Радиоактивные элементы Земли [Текст] / А. А. Сауков. – М. : Гос. изд-во литературы в области атомной науки и техники, 1961. – 160 с.
43. **Титаева, Н. Я.** Ядерная геохимия [Текст] : учебник / Н. Я. Титаева. – М. : Изд-во МГУ, 2000. – 336 с.
44. **Трохименко, Г. Г.** Рівень радіаційного забруднення агроєкосистем Миколаївської області [Текст] / Г. Г. Трохименко // Проблеми екології та енергосбереження : матеріали 4-й міжнарод. науч.-техн. конф. – Николаев : НУК, 2005. – С. 96–97.
45. Химик. Сайт о химии. Радиоэкология [электронный ресурс] . – Режим доступа : <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/3806.html>.
46. Цитогенетическая биодозиметрия у лиц Чернобыльского контингента [Текст] / Н. А. Мазник, В. А. Винников, М. М. Суханская, В. А. Теплая // Проблеми радіаційної генетики на рубежі століть : Міжнарод. конф. Москва. 20–24 листопада 2000 р. – С. 293.
47. Чорнобильська катастрофа [Текст] ; ред. В. Г. Барьяхтар. – К. : Наук. думка, 1996. – 515 с.
48. **Эстулин, И. В.** Радиоактивное излучение [Текст] / И. В. Эстулин. – М. : Наука, 1962. – 63 с.
49. Ядерная энциклопедия. – М. : Благотворительный фонд Ярошинской, 1996. – 656 с.
50. **Ярмоненко, С. П.** Радиобиология человека и животных [Текст] / С. П. Ярмоненко, А. А. Вайнсон. – М. : Высшая школа, 2004. – 550 с.
-