

Волинський національний університет імені Лесі Українки
Факультет хімії та екології
Кафедра екології та охорони навколишнього середовища

Музиченко Оксана

РАДІОЕКОЛОГІЯ

Конспект лекцій

Луцьк – 2023

УДК 504.75
М 89

Рекомендовано до друку науково-методичною радою Волинського національного університету імені Лесі Українки (протокол №2 від 25 жовтня 2023 р.).

Рецензенти:

Гулай О.І., д.п.н., професор кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету;

Цьось О.О., к.с.-г.н., доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища Волинського національного університету імені Лесі Українки.

М 89 Музиченко О.

Радіоекологія. Конспект лекцій для студентів спеціальності 101 Екологія. Луцьк: Вид-во Вежа, 2023. 109 с.

В конспекті лекцій висвітлено основні поняття, проблеми та питання сучасної радіоекології. Розглянуті характерні особливості різних джерел радіації, закономірності біологічної дії іонізуючого випромінювання на живі організми; радіоекологічні аспекти дозиметрії, особливості розповсюдження і міграції радіонуклідів у водних та наземних екосистемах, ґрунті, атмосфері, рослинних і тваринних організмах, розробка контрзаходів в умовах радіоекологічних аномалій техногенного походження.

ЗМІСТ

Зміст.....	3
Передмова.....	4
Визначення радіоекології як науки.....	5
Історія радіоекологічних досліджень.....	6
Будова атома. поняття радіоактивності. Одиниці радіоактивності.....	9
Типи іонізуючих випромінювань.....	11
Дози радіаційного опромінення та одиниці їх вимірювання.....	13
Методи визначення радіоактивності	16
Природні джерела випромінювання.....	17
Антропогенні зміни радіоактивного фону Землі.....	22
Атомна енергетика.....	28
Ядерний паливний цикл.....	30
Характеристика ядерних реакторів типу ВВЕР та РВПК.....	33
Міжнародна шкала подій на АЕС.....	35
Чорнобильська та Фукусімська катастрофи.....	38
Надходження радіонуклідів у зовнішнє середовище. Закономірності поведження радіоактивних речовин у біосфері.....	42
Повітряний шлях надходження радіонуклідів.....	44
Міграція радіонуклідів у гідроекосистемах.....	47
Міграція радіонуклідів у лісових екосистемах.....	50
Міграція ¹³⁷ Cs в основні лісоутворюючі породи.....	56
Міграція радіонуклідів у недеревну продукцію.....	57
Радіоактивне забруднення рослин.....	59
Міграція радіонуклідів у лучних екосистемах.....	62
Радіочутливість організмів.....	65
Надходження радіонуклідів в організм.....	67
Метаболізм радіонуклідів в організмі.....	69
Нагромадження радіонуклідів в органах і тканинах.....	73
Видалення радіонуклідів з організму.....	74
Особливості метаболізму і токсична дія на організм радіонуклідів йоду, цезію та стронцію.....	75
Біологічна дія іонізуючої радіації.....	78
Генетичні зміни в організмі під впливом іонізуючих випромінювань.....	84
Протирадіаційний біологічний захист.....	85
Поділ забрудненої території України на радіоекологічні зони.....	91
Нормування радіаційного впливу на організм людини.....	92
Основи радіозахисного харчування.....	95
Словник термінів.....	101
Література.....	109

ПЕРЕДМОВА

Серед питань, які становлять науковий інтерес, особливо гострим і важливим є питання про дію радіації на людину та навколишнє середовище. Відкриття В. Рентгеном у 1895 р. рентгенівських променів, А. Беккерелем у 1896 р. природної радіоактивності сприяло виникненню ряду наук, що вивчають як теоретичні, так і практичні питання застосування людством ядерної енергії.

Інтенсивний розвиток ядерних технологій викликав потребу у виокремленні наукового напрямку – радіоекології, одним з основних завдань якої є дослідження закономірностей міграції радіонуклідів у сфері виробництва, особливості надходження радіоактивних речовин до організму людини й розробка заходів, спрямованих на зниження вмісту радіонуклідів у продуктах рослинного і тваринного походження.

Застосування атомної енергетики у діяльності людини призводить до утворення великої кількості радіоактивних нуклідів, які можуть включатися в біологічні ланцюги міграції. Тому питання захисту від іонізуючих випромінювань стають однією з найважливіших проблем.

Після катастрофи на ЧАЕС постала гостра необхідність у рекомендаціях для довгострокової роботи і життєдіяльності населення на забруднених територіях. Ця катастрофа загострила увагу вчених на необхідності дослідження біологічного впливу іонізуючого випромінювання на живі організми, їх популяції та біоценози. Такі рекомендації спроможні розробити та впровадити у виробництва фахівці з відповідною радіобіологічною і радіоекологічною підготовкою. А тому знання з радіоекології необхідні не лише екологам, але і фахівцям, які працюють в аграрному секторі і лісовому господарстві.

Таким чином, існує нагальна необхідність ретельного вивчення різних джерел надходження радіоактивних речовин у навколишнє середовище з метою зменшення їх потоків; слідкування за їх міграцією трофічними ланцюгами з ціллю обмеження доступу до людини; дослідження дії їх іонізуючих випромінювань на живі організми і в першу чергу на людину з метою зменшення можливого негативного впливу.

Ознайомлення з проблемами радіаційного забруднення у навколишньому середовищі дає можливість майбутнім екологам вміти оцінювати радіаційну ситуацію місцевості та її загальний екологічний стан.

Конспект лекцій ознайомлює з основними поняттями радіоекології, типами та шляхами забруднення біосфери радіонуклідами, а також методами захисту від впливу іонізуючих випромінювань. Розглядаються методи знешкодження радіаційних відходів, засобів їх поховання.

Конспект лекцій підготовлений з використанням матеріалів окремих розділів з відомих підручників і посібників Ю.А. Кутлахмедова, В.А. Батлука, Д.М. Гродзинського, В.П. Краснова, І.М. Гудкова з співавт., М.О. Клименко з співавт., О.Г. Лялюка, О.О. Орлова, В.Г. Барьяхтар та ін.

ВИЗНАЧЕННЯ РАДІОЕКОЛОГІЇ ЯК НАУКИ

Радіоекологія (походить від лат. «*radius*» – промінь, гр. «*oikos*» – дім та гр. «*logos*» – слово, вчення) – міждисциплінарна наука, що вивчає розподіл, міграцію, кругообіг радіонуклідів у біосфері, дію іонізуючого випромінювання на біогеоценози і популяції організмів. Термін «радіоекологія» вперше було використано у наукових працях в 1956 р. у США (Е.Р. Odum) в Росії (О.М. Кузін, О.О. Передельський).

Будь-яка самостійна наукова дисципліна має чітко визначений об'єкт досліджень. В екології таким об'єктом вважається взаємодія живих організмів та їхніх угруповань із рештою компонентів довкілля. Виходячи з такого розуміння об'єктом досліджень у радіоекології є відповідна реакція екосистем на дію іонізуючого випромінювання.

Об'єктом радіоекології як науки – є вивчення середовищі, механізмів міграції їх у різних частинах геосфери (атмосфері, літосфері й гідросфері) та біосфери через флору та фауну до людини.

Предметом радіоекології як науки є показники, які характеризують розповсюдження радіонуклідів у довкіллі, кількісно і якісно оцінюють міграцію радіонуклідів по ланцюгам живлення із прогнозуванням наслідків їх надходження до людини. Радіоекологія є експериментальною наукою, а це означає, що жодне твердження в радіоекології не може бути прийнято, якщо відсутня можливість експериментального підтвердження даної гіпотези, ідеї, теорії, здогадки, припущення і так далі.

Головне завдання радіоекології полягає в розробці комплексу природоохоронних заходів, спрямованих на зниження надходження радіонуклідів по харчових ланцюжках до раціону людини з метою максимально можливого зменшення негативної дії радіонуклідів на її організм.

Радіоекологія є комплексною дисципліною, що має тісні зв'язки з рядом інших дисциплін, а саме:

Радіобіологією, яка вивчає дію іонізуючого випромінювання на біологічні об'єкти.

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

Радіаційною біохімією, яка вивчає радіаційно-хімічні пошкодження біологічно важливих молекул.

Радіаційною хімією, яка вивчає хімічні взаємодії між активними молекулярними формами, а також реакції цих форм з молекулами.

Радіаційною цитологією, яка вивчає патологію опроміненої клітини у всіх напрямках і тісно переплітається з радіаційною біохімією.

Радіаційною біоценологією. Внаслідок дії іонізуючої радіації на угруповання, або біоценози, можуть відбуватися зміни в їхньому видовому складі через зниження конкурентоспроможності доміnantних видів або

посилення життєвих позицій недомінантних,

Радіаційною гігієною, яка вивчає вплив як внутрішнього так і зовнішнього іонізуючого випромінювання на здоров'я людини з метою розробки заходів протирадіаційного захисту від опромінення.

Радіаційною токсикологією, яка вивчає шляхи надходження радіоізотопів в організм, їх розподіл, кінетику, обмін, виведення з організму та біологічну дію.

ІСТОРІЯ РАДІОЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Виникнення радіоекології як науки пов'язано з трьома великими відомими відкриттями: 25 березня 1895 р. німецький фізик, професор Вищої сільськогосподарської школи в Хоенхаймі, а пізніше ректор Мюнхенського університету Вільгельм Конрад Рентген, відкрив невідомі промені (X-промені як їх тоді називали). В. Рентген був першим фізиком, який 10 грудня 1901 р. отримав за дане відкриття Нобелівську премію.

26 лютого 1896 року професор фізики Паризького музею історії А. Беккерель, фахівець в галузі люмінесценції, відкрив природну радіоактивність солей урану. Був також нагороджений Нобелівською премією.

1898 р. відкрито і виділено декілька радіоактивних елементів (полоній, радій) Марія Складовською та П'єром Кюрі (подружжя). П'єр Кюрі – французький фізик, член французької Академії Наук. Марія Складовська-Кюрі також французький фізик і хімік. Крім того ними було встановлено, що радіоактивний розпад не залежить від зовнішніх умов. Нагороджені Нобелівською премією. Через 32 роки після батьків, їх дочка Ірен з чоловіком Фредеріком Жоліо-Кюрі відкрили штучну радіоактивність. Нагороджені Нобелівською премією.

Головним об'єктом радіоекологічних досліджень кінця XIX ст. була будова атома урану, радію, плутонію, цезію тощо. На жаль, учені-першовідкривачі зіткнулися першими із небезпечною дією іонізуючого випромінювання, а саме – з його руйнівним впливом на тканини людини. Анрі Беккерель зазнав опіку шкіри, коли пробірку з радієм поклав до кишені, а Марія Складовська-Кюрі померла від злякисного захворювання крові, оскільки не раз працювала з радіоактивними матеріалами.

В історії радіоекології розрізняють три основні етапи розвитку цієї науки.

Перший етап розпочався відразу ж після відкриття у 1895 р. рентгенівських променів, який започаткував дослідження дії іонізуючого випромінювання, в тому числі і на біологічні об'єкти. Вважають, що народження радіобіології відбулось в 1899 р., коли була опублікована перша наукова праця Ф. Шаудину – відомого німецького вченого, який дослідив реакцію декількох видів найпростіших організмів на дію іонізуючого випромінювання.

Нові промені були не тільки невидимі, а також невідчутні. Але міф про їх нешкідливість швидко розвіявся. Виявилось, що результатами впливу іонізуючого випромінювання можуть бути опіки шкіри, променеві виразки,

випадіння волосся.

Загальною реакцією клітини на опромінення виявилось припинення клітинного поділу. Факти, що накопились на той час, стали фундаментом для поступового формування певних закономірностей, перша із яких і була сформульована в 1906 р.

Це фундаментальний закон (правило) радіобіології *І. Бергоньє – Л. Трибондо* (французькі біологи) – чим активніше проліферують (розростання тканин організму тільки шляхом новоутворення і розмноження клітин) клітини, тим вони є більш радіочутливі. Тобто чим більша здатність клітин до розмноження (поділу) і слабше виражена їх морфологія і функції (або диференціація) тим вони є більш радіочутливими.

Було відкрито мутагенну дію іонізуючого випромінювання - виникнення спадкових змін – *мутацій*. Термін мутації походить від лат. «*mutati*» – зміна, це стійка зміна генетичного апарату, що виникає раптово і передається нащадкам.

Це відкриття було зроблене в 1925-1927 рр. радянськими вченими Г.А. Надсенем і Г.С. Філіповим в експериментах на дріжджах, а пізніше Г. Меллером (США) на мушці дрозофілі. Майже водночас Л. Стадлером було виявлено радіаційний мутагенез і в рослин.

Зокрема було виявлено, що іонізуюче випромінювання не тільки пошкоджує спадковий механізм клітини, а також викликає в ньому необоротні зміни – мутації. Саме мутагенна дія та пригнічення проліферації і лягли в основу поділу радіобіології на дві галузі практичного її застосування – це променева терапія та радіаційна селекція.

Поступовий розвиток дозиметрії сприяв становленню кількісних принципів радіобіології, метою яких було пов'язати біологічний ефект з дозою опромінення.

В цей час було висунуто ряд теорій «мішені», «точкового тепла», «унікальних» та «масових» структур клітини та інші. По суті вся історія радіобіології являє собою ряд послідовних спроб науково пояснити існування радіобіологічного парадоксу.

Така перша спроба і була зроблена фізиком Ф. Дессауером в 1922-1923 рр., який запропонував теорію «точкового тепла». Дана теорія пояснювала пошкодження клітини при іонізації (і точковим перегрівом) в деякому чутливому об'ємі, що становить невелику частину клітини.

Згадана теорія пізніше була розвинена радянськими вченими Н.В. Тимофєєвим-Ресовським, К. Циммером та іншими, що пізніше було сформульовано, як «теорію мішені». Єдиної теорії радіобіологічних ефектів на сьогодні ще не існує.

Наступний період в розвитку радіобіології пов'язаний з відкриттям пострадіаційного відновлення і відкриття молекулярних механізмів такого відновлення – репарації ДНК (від лат. «*reparatio*» – відновлення).

Репарація – це процес повного або часткового відновлення природної структури ДНК, пошкодженої при γ -опроміненні або хімічними агентами, який властивий клітинам всіх організмів.

Було встановлено, що формування кінцевого радіобіологічного ефекту –

це є поєднання процесів, що ведуть до пошкоджень і одночасних відновлювальних актів, що протидіють негативним змінам в організмі.

Тривав перший етап розвитку радіоекології з 1896 р. по 1945 р. В 1945 р. США скинули дві атомні бомби над містами Хіросіма та Нагасакі. Помітний вклад в розвиток радіоекології в перший період зробили Е. Марден, І.В. Курчатов, А.П. Виноградов і В.І. Баранов, які вивчали вміст природних радіонуклідів в навколишньому середовищі.

Другий етап розвитку радіоекології припадає на роки масових випробувань ядерної і термоядерної зброї на Землі та становлення ядерної енергетики.

Цей період характеризується значним забрудненням біосфери Землі радіонуклідами, що утворилися при застосуванні, випробуванні ядерної зброї, а також внаслідок аварій на підприємствах повного ядерного циклу (ППЯЦ). Наприклад, аварії на Уралі м. Киштим 29 вересня 1957 р. і на заводі Уіндскейлі, США, 1957 р.

Перед радіоекологією постали нові завдання, а саме:

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

Другий етап тривав впродовж 1945-1986 років.

Третій етап у розвитку радіоекології розпочався після катастрофи на Чорнобильській АЕС (26 квітня 1986 р.). Для вирішення проблем, що виникли в результаті аварії на Чорнобильській АЕС, накопичений радіобіологією досвід значною мірою виявився непридатним, адже, як виявилось, загрозою для здоров'я та життя людей може бути не лише короткотривале опромінення в великих дозах, а також і тривале опромінення при відносно малій потужності дози. В Україні в 1986 р. були створені Український НДІ сільськогосподарської радіології і Український науковий центр радіаційної медицини та була розширена сітка наукових лабораторій, в яких стали проводитись численні радіоекологічні дослідження.

Становлення радіобіології в Україні не відставало від світового рівня. Так, іще в 1896 р. І.Р. Тарханов і О.О.Кулябко виявили, що внаслідок опромінення іонізуючою радіацією заплідненої ікри міноги припиняється розвиток зародків.

Протягом 1896-1917 рр. в Україні створено мережу рентгенодіагностичних кабінетів і з'явилося багато наукових публікацій, присвячених проблемам радіології й радіобіології. З 1910 р. в Одесі почала працювати радіологічна лабораторія, що досліджувала природну

радіоактивність, біологічну дію іонізуючих випромінювань, займалася проблемами радіотерапії пухлин, дозиметрії.

Можливість зміни біологічної активності опромінення під впливом хімічних речовин уперше було доведено К. Кельнером (1935), якому належить відкриття кисневого ефекту (зменшення променевого ураження в разі зниження концентрації кисню в середовищі). Пізніше було синтезовано радіопротектори – хімічні сполуки, що застосовуються для захисту біологічних об'єктів від дії іонізуючих випромінювань. Для досліджень у цій галузі особливо важливу роль відіграли праці З. Бака, який визначив, що найефективнішими радіопротекторами є речовини, що містять сульфогідрильні групи.

Хоча дію малих доз опромінення вивчали ще до настання ери атомної зброї (досліди М. Мальдінея й К. Тувінена (1898), Г. Молінія, який установив явище радіотропізму, Я. Стоклаза, котрий звернув увагу на можливу роль радіоактивності калію, виявлення явища радіостимуляції, або гормезису), все ж саме загроза використання нової зброї була рушієм прогресу в радіобіології.

В Україні радіобіологічні дослідження охоплюють майже всі аспекти дії іонізуючих випромінювань на біологічні системи. Всебічне вивчення дії нейтронів на тваринний організм було започатковане О.О. Городецьким, С.Ю. Чеботарьовим, Б.Р. Киричинським. Радіопротектори нового класу запропонував В. А Барабой. У Києві сформувалася школа радіобіологів рослин, у працях яких було виявлено нові закономірності дії іонізуючої радіації на живі клітини, зокрема, встановлено активну реакцію клітинних популяцій твірних тканин на опромінення (І.М. Гудков), обґрунтовано нові радіобіологічні технології (А.А. Булах), досліджено механізми радіосенсибілізації клітин (О.П. Дмитрієв) та розвинені нові ідеї в галузі радіоекології (Ю.О. Кутлахмедов).

Після аварії на Чорнобильській АЕС 1986 р. особливої актуальності набули дослідження біологічної дії малих доз опромінення, канцерогенний вплив яких вивчають Я.І. Серкіз, Л.Б. Пінчук. Над проблемами запобігання захворюванням, що спричинені дією випромінювань від радіонуклідів, котрі потрапили в довкілля, працює Національний центр радіаційної медицини. Проблеми морської радіоекології досліджував Г.Г. Полікарпов.

БУДОВА АТОМА. ПОНЯТТЯ РАДІОАКТИВНОСТІ. ОДИНИЦІ РАДІОАКТИВНОСТІ

Атом – найменша частина хімічного елемента, яка зберігає всі його властивості, його розміри 10^{-8} см, складається з позитивно зарядженого ядра і негативно заряджених електронів, що рухаються у вигляді електронної хмари по електронним орбіталям. Атом в цілому електронейтральний.

Електрон – стійка елементарна частинка з масою спокою, що дорівнює 0,000548 атомної одиниці маси (а.о.м.) або $9,1 \times 10^{-28}$ г. Електрон несе один елементарний негативний заряд електрики, рівний $1,6 \times 10^{-19}$ Кл, який в ядерній фізиці прийнято за одиницю. Електрони переміщаються по еліптичних орбітах, утворюючи електронну оболонку атома у вигляді хмарки, вони групуються на

тій чи іншій електронній орбіті в залежності від енергії.

Ядро атомів складаються з позитивно заряджених частинок – протонів, і нейтральних в електричному відношенні частинок – нейтронів, які в цілому називаються нуклонами. Вони знаходяться в постійному русі і між ними діють внутрішньоядерні сили тяжіння.

Число протонів в ядрі дорівнює порядковому номеру елемента в періодичній системі Д.І. Менделєєва і позначається в лівому нижньому кутку символу елемента буквою Z , а сумарне число протонів і нейтронів – в лівому верхньому кутку і позначається буквою M , воно відповідає атомній масі хімічного елемента. наприклад: ${}_{92}^{235}\text{U}$.

Протон (p) – стійка елементарна частинка з масою спокою рівною 1,00758 а.о.м. ($1,6725 \times 10^{-24}$ г), приблизно в 1840 разів більше маси спокою електрона, має один елементарний заряд, рівний заряду електрона.

Нейтрон (n) – електрично нейтральна частинка, маса спокою якої дорівнює масі спокою протона (1 а.е.м). Внаслідок своєї електричної нейтральності нейтрон не відхиляється під впливом магнітного поля, не відштовхується атомним ядром, має велику проникаючу здатність і біологічну ефективність.

Таким чином, атоми хімічних елементів електронейтральні. При передачі електронам ззовні додаткової енергії вони можуть переходити з одного енергетичного рівня (орбіти) на інший або навіть залишати межі даного атома. Атоми, що володіють надлишком енергії, називають збудженими. Перехід електронів з зовнішніх орбіт на внутрішні супроводжується *рентгенівським випромінюванням*. При сильних електричних впливах електрони вириваються з атома, видаляються за його межі, а атом перетворюється в позитивний іон, а атом, який приєднав один або кілька електронів – в негативний.

Процес утворення іонів з нейтральних атомів називається *іонізацією*. У природі більшість хімічних елементів складається з суміші атомів з різною кількістю нейтронів, але з постійним числом протонів – такі атоми називаються *ізотопами*. Атоми хімічного елемента з однаковим масовим числом, але ядра яких знаходяться в різному енергетичному стані, називаються *ізотопами (нуклідами)* (з грец. «*isos*» – однаковий, «*topos*» – місце). Ядра всіх ізоотопів хімічних елементів прийнято називати *нуклідами*. Наприклад: елемент уран складається з ізоотопів ${}^{238}\text{U}$ – 98,5% та ${}^{235}\text{U}$ – 1,5%.

Ізотопи поділяються на 2 групи: стабільні і радіоактивні. *Радіонукліди* – це радіоактивні атоми з даним масовим числом (сумарним числом протонів і нейтронів) і атомним номером або з даним енергетичним станом атомного ядра (для ізомерів).

Радіоактивність – перетворення атомних ядер одних хімічних елементів в ядра інших хімічних елементів з виділенням енергії у вигляді електромагнітного випромінювання (γ і рентгенівське випромінювання) і корпускулярних частинок (α -, β -, нейтронне, позитронне випромінювання).

Радіоактивні випромінювання, що відбуваються в природі без зовнішнього впливу, називаються *природною радіоактивністю*, а в штучно отриманих під впливом α -, нейтронного випромінювань речовинах (через

ядерні реакції) – *штучною або наведеною радіоактивністю*.

ТИПИ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

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 випромінювань. 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.

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

Усі види іонізуючих випромінювань можна розділити на дві групи – корпускулярні і електромагнітні (хвильові, фотонні).

Корпускулярні іонізуючі випромінювання – це елементарні та інші частинки матерії, маса спокою яких відмінна від нуля. До них належать α -частинки, β -частинки (електрони та позитрони), протони, нейтрони та інші елементарні частинки.

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

Корпускулярне випромінювання, що являє собою потоки незаряджених частинок (нейтрони й інші елементарні частинки), називають *непрямим іонізуючим випромінюванням*.

До електромагнітних іонізуючих випромінювань належать γ - та рентгенівське випромінювання, короткохвильові ультрафіолетові та деякі інші випромінювання.

За своїми фізичними властивостями всі ізотопи поділяють на дві групи: стабільні і такі, що розпадаються, або радіоактивні. Радіоактивним ізотопам притаманні внутрішньоядерні перетворення, внаслідок яких відбувається вихід корпускулярних частинок променів, здатних іонізувати речовину.

Найважливішими в гігієнічному відношенні характеристиками будь-яких іонізуючих випромінювань є їх *проникна здатність* (здатність проникати через різні товщі матеріалів), *енергія та щільність іонізації* (здатність іонізувати атоми і молекули речовини, у якій вони поширюються).

α -частинки являють собою потік позитивно заряджених частинок, що мають масове число 4 і заряд, який дорівнює 2. За своєю фізичною природою – це ядра атома гелію. Нині відомо близько 40 природних і понад 200 штучних α -активних ядер, тобто ядер, здатних до α -розпаду. α -розпад характерний для важких елементів (урану, торію, плутонію та ін.).

Внаслідок α -розпаду початкове ядро перетворюється в нове ядро з атомним номером на 2 одиниці і масовим числом на 4 одиниці менше початкового.

Для **α -променів** (за енергії 4 MeV) проникна здатність (довжина пробігу) становить: у повітрі – 2,5 см, у біологічній тканині – 0,03 мм, в алюмінії – 0,016 мм. Ці промені легко затримуються навіть тонким шаром паперу. Тому в разі зовнішнього опромінення α -промені суттєвої біологічної загрози для людини не становлять. Однак ця загроза значно зростає у випадках так званої інкорпорації, тобто проникнення α -частинок в організм з вдихуванням повітрям, перорально, парентерально та іншими шляхами. У таких випадках дія α -променів особливо згубна, оскільки притаманна їм щільність іонізації в декілька тисяч разів більша ніж у β -частинок і γ -променів. Під час проходження шляху в повітрі довжиною в 1 см α -частинки утворюють до 100000 пар іонів.

β -частинки можуть мати негативний (електронний $-\beta$ -розпад) або позитивний ($+\beta$ -розпад) заряд. Вони у 7300 разів легші за α -частинки і мають проникну здатність значно вищу, ніж α -частинки. Довжина пробігу β -частинок у повітрі може сягати декількох метрів, у воді – 2,6 мм, алюмінії – 9,7 мм. Однак щільність іонізації менша, ніж в α -частинок у сотні тисяч разів – під час проходження 1 см повітряного середовища вони створюють лише 50-150 пар іонів. При електронному β -розпаді відбувається перетворення нейтрона в протон, заряд ядра і його порядковий номер збільшуються на одиницю.

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

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

До корпускулярних іонізуючих випромінювань відносяться і π -мезони (π^- , π^+ , π^0) – елементарні частинки з енергією 25-100 MeV та масою, що майже у 300 разів перевищує масу електронів.

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

Одним із поширених видів електромагнітного випромінювання, яке теж справляє іонізуючий ефект, є рентгенівське, яке отримують у спеціальних рентгенівських трубках, де відбувається утворення їх під впливом енергії електронів з розжареного катода, котрі потрапляють на анод. Рентгенівським променям притаманна висока проникність (чим менша довжина хвилі, яка

залежить від напруги, що подається на трубку, тим більша проникна здатність).

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

Таким чином, проникаюча 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 проникаюча здатність.

ДОЗИ РАДІАЦІЙНОГО ОПРОМІНЕННЯ ТА ОДИНИЦІ ЇХ ВИМІРЮВАННЯ

Кількісною характеристикою радіоактивної речовини є її *активність*, тобто кількість ядерних перетворень за секунду. Як одиницю активності γ -випромінювання часто використовують міліграм-еквівалент радію, тобто кількість міліграмів будь-якого джерела γ -випромінювання, яка створює той самий ефект іонізації, що й 1 мг радію.

Важливою характеристикою радіонукліда є *швидкість його розпаду*. Кількісним показником цієї характеристики є період напіврозпаду радіонукліда – $\frac{1}{2} T$, тобто час, протягом якого розпадається половина всіх атомів даного елемента. Ця величина є сталою для кожного радіонукліда і коливається в дуже широких межах: від часток секунди до декількох мільярдів років. Ця величина є сталою для кожного радіонукліда і коливається в дуже широких межах: від часток секунди до декількох мільярдів років.

Дозою називають кількість енергії, що передається тканинам унаслідок впливу іонізуючого випромінювання. Виділяють такі види доз: поглинута, еквівалентна та ефективна.

Експозиційна доза (рентгенівського та γ -випромінювань) – це кількісна характеристика випромінювання, яка ґрунтується на здатності випромінювань іонізувати повітря. За одиницю експозиційної дози в СІ прийнято таку дозу, при якій у 1 кг сухого повітря утворюються іони, що несуть заряд у 1 Кл електрики кожного знаку – Кл/кг. У практиці ще широко використовується позасистемна одиниця експозиційної дози – *рентген (R)*. 1 R утворює в 1 см³ сухого повітря за нормальних фізичних умов $2,08 \cdot 10^9$ пар іонів: $1 R = 2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг, $1 \text{ Кл/кг} = 3876 R$. Одиницею виміру потужності (кількість енергії за одиницю часу) експозиційної дози прийнято 1 А на 1 кг (А/кг). Позасистемна одиниця – рентген у 1 с (R/с; $1 R/с = 2,58 \cdot 10^{-4}$ А/кг) (табл. 1).

Потужність дози, визначену у певній точці, називають *радіаційним фоном*. Потужність дози, визначену на відстані 1 м від поверхні зараженого

об'єкта, називають *рівнем радіації*.

Рівень радіації характеризує інтенсивність випромінювання (як правило, γ -випромінювання). Це доза, яка створюється за одиницю часу і характеризує швидкість накопичення дози. Вимірюється в рентгенах за годину (Р/год). Чим більший рівень радіації (фон), тим менше часу повинні знаходитись на забрудненій території люди, щоб отримана ними доза опромінення не перевищувала допустиму.

Поглинена доза, D – це енергія іонізуючого випромінювання, яка поглинена тканинами організму, що опромінюється, в перерахунку на одиницю маси. У СІ одиницею поглиненої дози є *грей (Гр)*: $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$.

Позасистемна одиниця поглиненої дози – рад (ерг/г): $1 \text{ рад (ерг/г)} = 0,01 \text{ Гр} = 1 \text{ сГр (сантигрей)}$.

Еквівалентна доза, H – це поглинена доза, помножена на радіаційний зважувачий фактор випромінювання, який враховує здатність певного виду випромінювань пошкоджувати тканини організму. Іншими словами, еквівалентна доза така поглинена доза будь-якого випромінювання, яка при опроміненні зумовлює такий же біологічний ефект, як 1 Гр поглинутої дози рентгенівського чи γ -випромінювання (Дж/кг): $0,01 \text{ Зв} = 1 \text{ бер (біологічний еквівалент рентгена)}$.

Радіаційний зважувачий фактор випромінювання є найбільшим для α -випромінювання і дорівнює 20. Радіаційний зважувачий фактор для β - та γ -випромінювання становить 1.

Ефективна доза, E – величина, що використовується для визначення міри ризику наслідків опромінення тіла людини й окремих його органів і тканин з урахуванням їхньої радіочутливості. Вона являє собою суму значень еквівалентних доз опромінення окремих органів і тканин, помножених на відповідні вагові коефіцієнти.

В системі СІ одиницею активності є (Бк) – одиниця активності нуклідів у радіоактивному джерелі (одиниця кількості радіоактивної речовини). Один бекерель відповідає одному розпаду за секунду для будь-якого радіонукліда. Позасистемною одиницею активності є кюрі (Ки), яка названа в честь Марії Кюрі.

Кюрі (Ki) – це така кількість радіоактивних речовин, в якій відбувається 37 млрд. розпадів ядер атомів за секунду: $1 \text{ кюрі (Ки)} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ розп/с}$. Похідними цієї одиниці є мілікюрі = 0,001 кюрі та мікрокюрі = 0,000001 кюрі.

Активність радіоактивної речовини не характеризує іонізуючої дії на організм. Така дія характеризується дозою випромінювання (опромінення).

Для дозиметричної характеристики ефекту дії іонізуючого випромінювання на довкілля (повітря) і біологічні об'єкти використовують різні одиниці випромінювання: рентген, грей, бер, зіверт та інші дані про які наведено в табл. 1.

Як позасистемні одиниці (рентген, кюрі), так і одиниці системи СІ (бекерель, грей, зіверт) є епонімічними (утвореними від імені вчених) на згадку про найвидатніших дослідників.

Луї Гарольд Грей – лауреат премії імені Рентгена, іменем якого названо

одиницю вимірювання кількості іонізуючого випромінювання – фізик, що цілком присвятив себе радіобіології для того, щоби встановити кількісні зв'язки між фізичними й біологічними ефектами іонізуючого випромінювання. Також його ім'ям названо найбільшу англійську лабораторію, яка є загальноновизнаним науково-дослідним центром у галузі радіаційної екології.

Таблиця 1

Основні дозиметричні одиниці та їх співвідношення

Фізична величина	Одиниці вимірювання		Співвідношення між одиницями	
	у системі СІ	позасистемні	Системи СІ й позасистемна	Позасистемна і системи СІ
Активність, A	Бекерель (Бк) 1 Бк=1розпад/с	Кюрі, (Ки)	1 Бк=2,7×10 ¹¹ Ки	Ки=3,7×10 ¹⁰ Бк
Питома активність, A_m	Бекерель на кілограм, Бк/кг	Кюрі на грам, Ки/г	1 Ки/г=3,7×10 ⁻¹¹ Бк/кг	1 Бк/кг=2,7×10 ⁻¹⁴ Ки/г
Експозиційна доза випромінювання	Кулон/кг (Кл/кг)	Рентген (Р)	1 Кл/кг = 3876 Р	1 Р = 2,58×10 ⁻⁴ Кл/кг
Потужність експозиційної дози	Ампер на кілограм, А/кг	Рентген за секунду, Р/с	1 А/кг=3879 Р/с	1 Р/с=2,58×10 ⁻⁴ Кл/кг
Поглинена доза, D	Грей (Гр) 1 Гр = 1 Дж/кг	Рад	1 Гр=100 рад	1 Рад = 0,01 Гр
Потужність поглиненої дози, D	Грей за секунду (Гр/с)	Рад за секунду (рад/с)	1 Гр/с = 100 рад/с	1 рад/с = 0,01 Гр/с
Еквівалентна доза, H	Зіверт (Зв)	Біологічний еквівалент раду, (бер)	1 Зв = 100 бер	1 бер = 0,01 Зв
Потужність еквівалентної дози, H	Зіверт за секунду (Зв/с)	Бер за секунду (бер/с)	1 Зв/с = 100 бер/с	1 бер/с = 0,01 Зв/с
Ефективна доза, E	Зіверт, Зв	Біологічний еквівалент раду, бер	1 Зв = 100 бер	1 бер = 0,01 Зв
Щільність забруднення, b	Кюрі на 1 квадратний кілометр, Ки/км ²		Ки/км ² =3,7×10 ⁴ Бк/м ²	

Шведський дослідник *Рольф Максиміліан Зіверт* відомий як найбільший дослідник у галузі дозиметрії й радіаційної безпеки. З його ініціативи, зокрема, створена мережа станцій спостереження за радіоактивним забрудненням навколишнього середовища.

Ступінь забруднення радіоактивними речовинами характеризується *щільністю забруднення*, яка вимірюється кількістю радіоактивних розпадів атомів за одиницю часу на одиниці поверхні, в одиниці маси і об'єму. Вимірюється в Ки/км² або Бк/км².

Прилади для вимірювання дози чи потужності дози іонізуючих випромінювань називаються дозиметрами, чи рентгенометрами. Рентгенометри

служать для вимірювання дози чи потужності дози випромінювання, оцінки ефективності захисних засобів, контрольованих об'єктів або зон, для вимірювання доз опромінення персоналу або населення. Дозиметри за призначенням розподіляються на рентгенометри, мікрорентгенометри (дозиметри контролю й індивідуальні дозиметри).

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ РАДІОАКТИВНОСТІ

У радіоекології використовують різноманітні методи визначення радіоактивності: фізичні, хімічні, фотохімічні, біологічні та математичні. Найчастіше застосовують фізичні методи, в яких використовують іонізуючу зміну електричних та інших властивостей твердих і рідких середовищ, теплову дію випромінювань.

Для виявлення іонізуючих випромінювань частіше застосовують такі методи: іонізаційний, сцинтиляційний, фотографічний, колориметричний, хімічний, нейтронно-активаційний, біологічний, розрахунковий.

1. Іонізуючий метод ґрунтується на вдатності випромінювань іонізувати будь-яке середовище, через яке вони проходять. Вимірюючи іонізуючий струм, одержують уявлення про інтенсивність проникаючих випромінювань.

2. Сцинтиляційний (люмінесцентний) метод ґрунтується на реєстрації спалахів світла, які виникають у сцинтиляторі під дією іонізуючих випромінювань.

3. Фотографічний метод ґрунтується на здатності випромінювань викликати фотоліз $AgBr$. При проявленні експонованої фотоплівки срібло відновлюється до вигляду металу й випадає в емульсії плівки як чорна речовина. Інтенсивність почорніння пропорційна поглинутій енергії випромінювання.

4. Колориметричний метод ґрунтується на вимірюванні кількості тепла, яке виділяється в детекторі при поглинанні іонізуючих випромінювань. Вся енергія випромінювань, яка поглинається речовиною, зрештою перетворюється на теплову. Теплоутворення прямо пропорційне інтенсивності випромінювань.

5. Хімічний метод ґрунтується на вимірюванні виходу радіаційно-хімічних реакцій, які відбуваються під впливом іонізуючих випромінювань у рідких чи твердих системах, котрі змінюють своє забарвлення внаслідок окисних або відновних реакцій. Забарвлення відповідає ступеню іонізації. Метод використовують при реєстрації значних рівнів радіації.

6. Нейтронно-активізаційний метод пов'язаний з вимірюванням наведеної радіоактивності. Цей метод зручний для оцінки доз у аварійних ситуаціях, коли спостерігається короткочасне опромінення великими потоками нейтронів.

7. Біологічний метод ґрунтується на здатності випромінювань викликати біологічні ефекти. Величину дози оцінюють за рівнем летальності тварин, ступенем лейкопенії, кількістю хромосомних аберацій, зміною забарвлення шкіри, випаданням волосся, появою в сечі дезоксицитидину тощо. Ці методи не дуже точні і не такі чутливі, як фізичні.

8. Розрахунковий метод передбачає визначення дози випромінювання шляхом математичних розрахунків. Цей метод застосовується для оцінки дози від інкорпорованих радіонуклідів, тобто тих, що потрапили до організму.

ПРИРОДНІ ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ

Протягом усієї історії розвитку біосфери на живі організми нашої планети постійно діяли іонізуючі випромінювання, бо наявність їхніх полів – невід’ємна властивість довкілля. Академік В. І. Вернадський наголошував, що життя на Землі виходить із двох джерел енергії – сонячного світла та енергії атомного розпаду.

До природних джерел іонізуючих випромінювань належать: поширені в природі *радіоактивні елементи й ізотопи*, ядра яких у процесі радіоактивного розпаду випромінюють заряджені частинки та фотони високої енергії; *космічні промені*, що проникають крізь товщу атмосфери до поверхні Землі; *ультрафіолетові промені*, які є складовою світлового випромінювання Сонця.

Природна радіоактивність. За звичайних умов будь-який організм найбільшу дозу опромінення одержує від природних джерел іонізуючих випромінювань, насамперед від природних радіоактивних елементів.

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

Виділяють три групи радіонуклідів, що містяться в земній корі:

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

– радіонукліди, походження яких не пов’язане з важкими радіоактивними елементами, – *поодинокі природні радіонукліди*;

– *радіонукліди, що входять до радіоактивних родин.*

Космогенні радіонукліди виникають внаслідок ядерних реакцій між ядрами елементів земного походження й частинками космічних променів – це ^3H , ^{14}C , ^{22}Na , ^{32}P , ^{33}P , ^{35}S , ^{36}Cl . Найбільше цих природних радіонуклідів міститься в атмосфері й верхніх шарах земної кори. Найбільше значення як можливі дозоутворювачі мають тритій та радіовуглець.

Швидкості утворення та розпаду космогенних радіонуклідів зрівноважені. Тому їх вміст у атмосфері підтримується постійним.

В останнє півстоліття спостерігається відхилення концентрації радіовуглецю від рівноважної кількості: Це зумовлено потраплянням в атмосферу вуглекислого газу внаслідок спалювання вугілля, нафти й газу, вміст ^{14}C в яких через радіоактивний розпад у край понижений.

Оскільки і вуглець, і водень належать до основних елементів, що входять до складу будь-яких органічних речовин, а водень є складовою молекули води, то в клітинах завжди містяться також їх радіоактивні ізотопи ^3H і ^{14}C . Із цим пов’язане внутрішнє опромінення клітин β -частинками, які виникають під час радіоактивного розпаду ядер зазначених радіонуклідів.

До **поодиноких природних радіонуклідів** належить досить багато радіоізоотопів різних хімічних елементів із масовими числами від 40 до 190. Це ^{40}K , ^{87}Rb , ^{138}La , ^{190}Pt та ін. Більшість елементів із такими масовими числами мають по кілька ізоотопів, і деякі з них є радіоактивними. Періоди напіврозпаду поодиноких радіонуклідів дуже великі, бо інакше за час існування Землі вони мали б практично повністю розпастися.

Найбільше значення як джерело іонізуючого випромінювання має калій. Питома радіоактивність природного калію доволі висока, а вміст його в будь-яких живих клітинах завжди дуже значний, оскільки він належить до макроелементів. Роль радіоактивності інших поодиноких радіонуклідів порівняно з калієм менш істотна, бо й вміст їх у клітинах незначний.

Родини важких природних радіоактивних елементів.

Важкі природні радіоактивні елементи відрізняються від поодиноких радіонуклідів тим, що вони пов'язані між собою як продукти послідовних радіоактивних перетворень у трьох групах елементів, що дістали назву радіоактивних сімейств. Практичне значення в природі мають три радіоактивні сімейства: урану-радію, родоначальником якого є ^{238}U , актиноурану ^{235}U , що розпочинається від цього ізоотопу урану, й торію, родоначальником якого є радіонуклід ^{232}Th .

В даний час відомі 3 природні радіоактивні родини:

1. Урана-радію – $^{235}_{92}\text{U}$ $^{226}_{88}\text{U}$, які через 8 α - і 6 β -розпадів перетворюються в стабільний ізоотоп свинцю – $^{208}_{82}\text{Pb}$.
2. Торія – ^{232}Th , який через 6 α - і 4 β -розпадів перетворюється в стабільний ізоотоп свинцю.
3. Актинія-урану – $^{235}_{92}\text{U}$ та $^{235}_{89}\text{Ac}$, які в результаті 7 α - і 4 β -розпадів також перетворюються в стабільний ізоотоп свинцю.

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

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

Уран дуже поширений у земній корі й міститься в будь-яких породах і

грунтах. Цей елемент входить до складу мінералів і утворює рудні родовища. В місцях неглибокого залягання рудних тіл урану вміст членів його сімейства в довкіллі підвищений. Наприклад, пегматитові жили в гранітах, яким властива підвищена концентрація урановмісних мінералів, надають місцевостям, де ці жили розташовані близько до поверхні, характеру *уранових провінцій*.

Масова частка урану в природних матеріалах коливається в межах 10^{-7} - $10^{-20}\%$. Значні концентрації урану характерні для кислих магматичних порід. Дуже високий вміст урану властивий фосфорним рудам, а отже й фосфорним добривам. Тому внаслідок тривалого застосування таких добрив збільшується концентрація радіоактивних ізотопів у орних землях, а відтак, поступово зростає нагромадження деяких радіоактивних ізотопів із сімейства ^{238}U в продукції рослинництва.

Торій також утворює рудні родовища, найчастіше пов'язані з пегматитовими жилами в гранітах.

Радій ^{226}Ra виявляється в будь-яких гірських породах, грунтах і природних водах. За своїми хімічними властивостями радій подібний до кальцію, й тому подібна їхня поведінка в грунтах і участь в мінеральному живленні рослин. Це зумовлює наявність радію в продуктах харчування людини.

У ґрунтових водах вміст радію варіює в дуже широких межах. За певних умов відбувається збагачення води цим радіонуклідом і продуктами його розпаду – радоном. Таким радоновим водам властиві лікувальні властивості. Радон і торон дифундують із ґрунту в атмосферу.

Найвагомішим із природних джерел радіації є радон – ^{220}Rn , невидимий, який не має смаку і запаху, важкий газ (у 7,5 рази важчий за повітря) радон. Згідно з оцінкою НКДАР при ООН, радон разом із своїми дочірніми продуктами радіоактивного розпаду відповідає приблизно за 3/4 річної індивідуальної ефективної еквівалентної дози опромінення, яку населення одержує від земних джерел радіації, і приблизно за половину такої дози від усіх природних джерел радіації. Більшу частину цієї дози людина отримує від радіонуклідів, які надходять у її організм разом із вдихуванним повітрям, особливо у непровітрюваних приміщеннях.

Радон і торон дифундують із ґрунту в атмосферу. Навесні, внаслідок розморожування шару ґрунту, часом спостерігається вихід у атмосферу значних активностей радону, який нагромадився за зиму. Основну частину дози опромінення від радону людина одержує, перебуваючи в закритому, непровітрюваному приміщенні. У зонах із помірним кліматом концентрація радону в закритих приміщеннях у середньому приблизно у 8 разів вища, ніж у атмосферному повітрі.

Радон надходить в середину приміщень у результаті просочування його через фундамент, підлогу з ґрунту або (рідше) вивільняючись із матеріалів, які було використано для складання конструкцій будинку.

Найпоширеніші будівельні матеріали – дерево, цегла та бетон – виділяють незначну кількість радону. Набагато вищу відносну радіоактивність мають граніт та пемза, які теж використовують у будівництві.

Ще одне джерело надходження радону в житлові приміщення. Це вода й природний газ. Концентрація радону в звичайній воді надзвичайно низька, але вода з деяких джерел, особливо з глибоких колодязів чи артезіанських свердловин, містить дуже багато радону.

Головну небезпеку становить не питна вода, навіть при високому вмісті у ній радону. При кип'ятінні ж води чи приготуванні гарячих страв радон значною мірою видаляється і тому надходить в організм переважно з некип'яченою водою. Та навіть і в цьому випадку він швидко виводиться із організму.

Набагато небезпечніше потрапляння водяної пари з високим вмістом радону в легені разом із вдиханням повітря. Найчастіше це буває у ванні, особливо під час прання білизни.

Розпад радіонукліда ^{222}Rn супроводжується появою низки короткотривалих ізотопів, які в ході радіоактивних перетворень випромінюють α - і β -частинки. Ці дочірні радіонукліди адсорбуються пиловими частинками, котрі в такий спосіб стають носіями радіоактивності й, потрапляючи під час дихання в організм, зумовлюють формування інгаляційної дози.

Уран, потрапивши з продуктами харчування в організм людини, відкладається в кістках. У кістязку дорослої людини міститься близько 25 мкг урану, що еквівалентно 0,3 Бк. Відповідно до цієї концентрації урану на кісткову тканину припадає доза порядку 10 мкГр.

Серед природних джерел опромінення виділяють керовану й некеровану компоненти, тобто ті, на які можна впливати, й ті, вплив яких обмежити неможливо.

Некерована компонента:

- внутрішнє β -опромінення (0,2 мЗв, 4,1%);
- космічне випромінювання (0,3 мЗв, 5,9%);
- природний γ -фон (0,15 мЗв, 3,1%).

Керована компонента:

- ^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{222}Rn у воді (0,17 мЗв, 3,5%);
- радіоактивність будівельних матеріалів (0,26 мЗв, 5,5%);
- ^{222}Rn у повітрі (3,8 мЗв, 77,9%).

Території, де близько до поверхні залягають збагачені важкими радіоактивними речовинами породи, рівень опромінення істотно перевищує середнє значення потужності дози, властивої нерадіоактивним провінціям. Такі території називають *природними радіоекологічними аномаліями*. Якщо підвищення потужності експозиційної дози на даній місцевості зумовлене потраплянням у довкілля техногенних радіоактивних речовин, тобто є наслідком радіонуклідного забруднення, це *штучні радіонуклідні аномалії*. Вони можуть виникати внаслідок аварій ядерних реакторів, у разі відкритих розробок уранових або торієвих родовищ, через розгерметизацію пунктів поховання радіоактивних відходів.

Природні радіоекологічні аномалії є в багатьох місцях земної кулі.

Наприклад, у Бадгастайні (Австрія) об'ємна активність води, що містить радон, сягає 111 Бк/л, У Гельсінкі (Фінляндія) об'ємна активність водних джерел, що містять радон, становить 629 Бк/л. Високі потужності поглинутої дози – до 5,5 мкГр/год характерні для радіоекологічної аномалії в Ірані (провінція Рамсар).

Велика радіоекологічна аномалія (площею 212 км²) є в Індії (штат Керала). Тут потужність еквівалентної дози в середньому становить 0,7 сЗв/рік, а в окремих частинах цієї провінції досягає 1,5 сЗв/рік. На території цієї аномалії мешкає більш як 500000 населення, тож є унікальна можливість досліджувати вплив підвищеного природного радіоактивного фону на людські популяції.

У гірничорудному басейні Франсвіль у Центральному Габоні (Західна Африка) розташовані «природні ядерні реактори». В урановій руді в таких «реакторах» масова частка ²³⁵U набагато менша, ніж звичайно, що пояснюють «вигоранням» цього ізотопу в процесі, аналогічному тому, котрий відбувається в штучних реакторах. У Бангомбу такий «природний реактор» залягає на глибині всього 12 м від поверхні, й це створило унікальні умови для біоти, що формувалася в безпосередній близькості до цього місця.

У середньому приблизно 2/3 ефективної еквівалентної дози опромінення, яку людина одержує від природних джерел радіації, надходить від радіоактивних речовин, що потрапили у організм із їжею, водою, повітрям.

Незначна частина цієї дози припадає на радіоактивні ізотопи типу ¹⁴C та тритію, які утворюються під впливом космічної радіації. Остання частина надходить від джерел земного походження. У середньому людина одержує близько 180 мкЗв на рік за рахунок ⁴⁰K, який засвоюється організмом разом із нерадіоактивними ізотопами калію, що потрібні для життєдіяльності організму. Проте значно більшу дозу внутрішнього опромінення людина одержує від нуклідів радіоактивного ряду ²³⁸U і меншою мірою – від радіонуклідів ряду ²³²Th.

Деякі із них, наприклад ²¹⁰Pb та ²¹⁰Po, надходять у організм із їжею. Вони концентруються у рибі, молюсках, тому люди, які їдять багато риби та інших продуктів моря, можуть одержати відносно високі дози опромінення.

Корінне населення Крайній Півночі харчується переважно м'ясом північного оленя (карібу), у якому обидва згадуваних вище радіонукліди містяться в досить високій концентрації. Особливо високий у ньому вміст ²¹⁰Po. Ці ізотопи потрапляють у організм оленів узимку, коли вони харчуються лишайниками, у яких накопичуються обидва ізотопи. Дози внутрішнього опромінення людини від ²¹⁰Po у цих випадках можуть у 35 разів перевищувати середній рівень.

Люди, які мешкають у Західній Австралії у місцях з підвищеним вмістом урану, отримують такі дози опромінення, які в 75 разів перевищують середній рівень, оскільки їдять переважно м'ясо овець та кенгуру.

Космічні промені. На всі земні об'єкти діють космічні промені – потоки заряджених частинок і атомних ядер, які безперервно надходять на Землю з космічного простору. Космічні промені поділяють на первинне космічне випромінювання, яке домінує на значних висотах у атмосфері (20-30 км над

рівнем моря), й вторинне, що властиве малим висотам.

Первинне космічне випромінювання складається переважно з протонів (92%), α -частинок (7%), нейтронів і швидких ядер легких елементів (1%). Середня енергія космічних променів дуже велика – близько 10 ГеВ.

Вторинне космічне випромінювання виникає внаслідок взаємодії первинних променів з атомами речовини атмосферної й тропосферної.

Інтенсивність космічних променів періодично й неперіодично коливається, що пов'язано зі змінами потужності магнітного поля Землі й сонячної активності.

Інтенсивність космічних променів біля поверхні Землі майже постійна, але її магнітне поле впливає на розподіл їх потоків: ближче до полюсів інтенсивність космічних променів дещо вища, ніж на екваторі. Крім того, інтенсивність космічних променів істотно залежить від висоти над рівнем моря (подвоюється з підняттям на 1500 м).

Більшість населення проживає на малих висотах над рівнем моря, де середньорічна індивідуальна ефективна доза від космічних променів становить 0,37 мЗв. У місцях, розташованих на значних висотах над рівнем моря, наприклад у Ла-Пасі (Болівія), Боготі (Колумбія), цей показник досягає значення 1 мЗв.

За підрахунками спеціального наукового комітету ООН, середня еквівалентна доза опромінення населення від природних джерел радіації становить 2,5-3,0 мЗв·рік⁻¹.

АНТРОПОГЕННІ ЗМІНИ РАДІОАКТИВНОГО ФОНУ ЗЕМЛІ

Останніми десятиліттями до природних джерел іонізуючих випромінювань додалися штучні, зумовлені людською діяльністю.

Використання іонізуючих випромінювань у медицині. Опромінення в медичних цілях зумовлює істотну складову дози, поглинутої людиною. Опромінення відбувається під час проведення рентгенодіагностики (загальна й стоматологічна рентгенографія), внаслідок вживання препаратів, до складу яких входять радіоактивні речовини, з метою діагностики, а також у ході радіаційної терапії при онкологічних та деяких інших захворюваннях.

У розвинених країнах щорічна рентгенодіагностика зумовлює до 5% загальної дози опромінення людини від застосування медичної техніки. При цьому рентгенодіагностика має масовий характер.

Щорічна середня доза опромінення, пов'язаного з методами медичного обстеження, становить 0,4-1 мЗв. Найчастіше здійснюється стоматологічна рентгенографія, з якою пов'язана середня індивідуальна доза 0,04 мЗв за одне обстеження. Проте найбільшою дозою опромінення супроводжується рентгенографія грудей та ротової порожнини.

В деяких випадках у діагностиці застосовують радіонукліди ¹³¹I, що також зумовлює певні дози опромінення. Проте цей метод не є масовим.

Незважаючи на те, що з медичним використанням джерел іонізуючої радіації пов'язане масове опромінення людей, відмова від рентгенодіагностики

була б помилкою: вчасне виявлення захворювання на ранніх стадіях його розвитку вможливило б ефективне лікування. Тому очікується подальше зростання дози опромінення в медичних цілях, у зв'язку з чим особливої актуальності набуває розробка способів зменшення негативних впливів іонізуючої радіації на людину.

Наслідки випробувань ядерної зброї. За період з 1945 по 1980 р. здійснено більш як 400 ядерних вибухів у атмосфері. Найінтенсивніше випробування ядерної зброї проводилися в 1957-1958 й 1961-1962 рр. (здійснено 128 вибухів атомних бомб, серед яких були дуже потужні, й 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 радіонуклідів, що виникають внаслідок поділу урану, а також у ядерних реакціях за участю нейтронів.

Найбільшу небезпеку для сучасного та прийдешніх поколінь становлять радіоактивні ізотопи які мають великі періоди напіврозпаду ^{14}C (5730 років), ^{137}Cs (30 років), ^{90}Sr (≈ 30 років), ^3H (12 років). За рахунок цих радіонуклідів нагромаджується основна частка піввікової очікуваної дози, й найзначніша роль у цьому процесі належить ^{14}C .

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, що супроводжували випробування атомної зброї США.

Оскільки випадання радіонуклідів 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 мають плямистий характер.

Питома активність ґрунту, забрудненого радіонуклідами цезію та стронцію, на території Східної Європи становить одиниці й десятки Бк/кг. Середня річна індивідуальна доза, яка зумовлена проведенням випробувань атомної зброї, становить 0,01 мЗв.

Оскільки глобальні радіоактивні опади підвищують рівень опромінення людей на всій планеті, було досягнуто міжнародну угоду про часткову заборону випробувань ядерної зброї. Відповідний Договір у 1963 р. підписали СРСР, Великобританія та США. Відтоді випробування ядерної зброї в атмосфері здійснювали тільки Франція й Китай, проте потужність атомних бомб була значно меншою, ніж у попередні часи.

Сумарна активність па планеті, зумовлена випробувальними ядерними вибухами, оцінюється в $(4,44-5,92) \times 10^{17}$ Бк.

Радіоактивні матеріали нагромаджуються в місцях випробувань ядерної

зброї, які становлять джерело міграції радіонуклідів у біосферу.

На нашій планеті було створено декілька ядерних полігонів для підготовки та проведення випробувань ядерної зброї. П'ять ядерних держав світу – Великобританія, КНР, колишній СРСР, США й Франція – здійснювали ці випробування на п'яти основних полігонах світу: Невадському (США й Великобританія за контрактом), Лобнорському (КНР), Новоземельському й Семіпалатинському (СРСР) та на полігоні Тихоокеанського експериментального центру на коралових атолах у Полінезії (Франція).

США здійснювали експериментальні вибухи також на чотирьох групах островів у Тихому океані. Підводні, надводні та атмосферні вибухи було проведено в районі атола Джонстон (на південь від Гаванських островів), поблизу атолів Бікіні та Еніветок; серію вибухів здійснено в Аламогордо (штат Нью-Мексико) й у штаті Аляска.

У колишньому СРСР військові навчання із застосуванням ядерної зброї проводилися в районі м. Тоцька (Оренбурзька область).

Великобританія здійснювала підземні ядерні вибухи поблизу західного узбережжя й на півдні Австралії.

Франція для випробувань ядерної зброї використовувала полігони в Реггані й Ін-Екере в пустелі Сахара (Алжир), а також атол Муруроа в групі островів Туамоту (Французька Полінезія).

У 1998 р. випробування ядерної зброї розпочали Індія й Пакистан. Ядерною зброєю володіють також Ізраїль, КНДР. В даний час статус ядерних держав мають загалом 9 країн.

Колишній СРСР здійснив 715 вибухів, США – 1030, Великобританія – 43, Франція – 198, КНР – 43. Із цими вибухами пов'язане поширення радіоактивних речовин по всіх континентах планети, а території, відведені під ядерні полігони, втрачені для людства на дуже тривалий час.

Промислові процеси, що збільшують дозоутворювальну здатність природних радіонуклідів. Є чимало промислових процесів, які призводять до винесення на поверхню землі матеріалів, у яких концентрація природних радіоактивних елементів істотно перевищує середній рівень. До таких процесів належить, насамперед, видобування урану, разом з ним на поверхню піднімаються урановмісні породи, й після відокремлення збагаченої цим елементом фракції залишаються ураноносні матеріали у вигляді флотаційних «хвостів» або в териконах.

У разі виробництва та використання фосфорних добрив також відбувається концентрування природних радіоактивних елементів, бо фосфорити й апатити формувалися в процесі співосадження ортофосфатів із радієм, який внаслідок цього й міститься у фосфорних мінералах.

Виробництво електроенергії на теплових електростанціях також призводить до збільшення опромінення населення: вугілля, як і більшість природних матеріалів, містить природні радіоактивні речовини, котрі під час спалювання вугілля вивільняються й потрапляють у довкілля. Очікувана піввікова колективна доза від цього джерела опромінення становить 4 люд.-Зв на 1 ГВт рік виробленої електроенергії.

Зі спалюванням вугілля пов'язана ще одна радіаційна небезпека: крім тих природних радіоактивних речовин, що викидаються в атмосферу й потім потрапляють на поверхню ґрунтів, навколо електростанцій нагромаджується важкий попіл, що може переноситися повітряними потоками. Крім того, цей попіл використовують для виготовлення цементу й бетону, що збільшує радіоактивний фон у будівлях, споруджених із таких матеріалів.

Торфи також можуть містити природні радіоактивні речовини в підвищених концентраціях, що пов'язане з фільтрацією крізь торф'яні маси поверхневих і ґрунтових вод, забруднених радіоактивними елементами.

Геотермальна енергетика, роль якої з часом зростатиме, також є джерелом додаткового опромінення. Це зумовлено наявністю в геотермальних водах продуктів перетворень важких радіоактивних елементів, особливо радону, які потрапляють у повітря внаслідок виходу цих вод із глибоких геологічних шарів на поверхню.

Атомна енергетика. Виробництво електроенергії на атомних електростанціях супроводжується викидами радіонуклідів у довкілля навіть за умов нормального функціонування цих електростанцій.

Для забезпечення атомних електростанцій паливом здійснюється так званий *ядерний паливний цикл*: видобування й переробка уранової руди, виробництво ядерного палива, експлуатація ядерних реакторів, переробка відпрацьованого ядерного палива, транспортування радіоактивних відходів та їх поховання.

В разі видобування урану шахтним способом виникає велика маса радіоактивних газів (викидаються крізь вентиляційну систему) й рідин (витікають із кар'єрів). Безперечно, найбільшого впливу радіації, пов'язаної з ураном і продуктами його радіоактивних перетворень, зазнають працівники уранових шахт.

Експлуатація реакторів неодмінно супроводжується викиданням у довкілля радіонуклідів, які входять до продуктів поділу урану, а також виникають внаслідок ядерних реакцій, що здійснюються за участю потоків нейтронів. До цих активованих нейтронами довготривалих радіонуклідів належать ^{60}Co , ^{14}C , ^3H та деякі інші, які виявляються в зоні розташування атомних реакторів.

Переробляється лише незначна частина відпрацьованого ядерного палива. Решта ж зберігається в тимчасових сховищах (до ухвалення рішень щодо технології довготривалого зберігання радіоактивних матеріалів).

У разі переробки рідких радіоактивних відходів основні труднощі пов'язані з радіонуклідами ^3H , ^{14}C , ^{85}Kr , ^{129}I . 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.

До найнебезпечніших елементів, що потрапляють у довкілля в ході цих технологічних процесів, належать радон, ^{210}Po і ^{210}Pb . Уран і радіоактивні продукти його розпаду потрапляють у довкілля й у ході технологічних процесів підготовки мінеральної сировини для добування ядерного палива.

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.

Радіонукліди у народному господарстві і побуті використовуються:

- для одержання стійкої фарби на банкнотах застосовується ^{14}C ;
- 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 випромінювачем є годинники з циферблатом, що світиться. Вони дають річну дозу, яка перевищує в 4 рази ту, що виникає внаслідок викидів на АЕС. Зараз 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. Так, при перегляді одного хокейного матчу людина одержує опромінення 0,01 мкЗв. Якщо дивитися передачі протягом року щоденно по 3 години – 0,05 мЗв;
- рентгенівські апарати використовуються в аеропортах для перевірки багажу пасажирів;
- пожежні димові детектори містять радій або плутоній.
- підвищену радіоактивність мають фосфорні добрива, які містять радій і уран. Радіоактивними є також азотні і калієві мінеральні добрива.

Джерелом радіації є будівельні матеріали з природних порід. Потужність дози від граніту досягає 240-400 м/рад/рік, пемзи – 300, червоної цегли – 140-180, бетону – 180-240, вапняку – 40, алебастру – 30, дерева – 30 м/рад/рік.

У промисловості за допомогою радіонуклідів 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 радіоактивних речовин знаходить застосування в блокуючих пристроях. Джерело слабого випромінювання надягають як браслет або кільце на руку робітника. Коли рука наближається до небезпечної зони, випромінювання впливає на датчик, перетворюючи його в електричний сигнал, який подається на тиратрон і реле, що розриває ланцюг магнітного пускача, і обладнання зупиняється.

Використання радіонуклідів у ролі так званих мічених атомів дозволило вивчити нові закономірності і зробити важливі відкриття в біології, хімії металургії та інших галузях народного господарства.

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 PRO використовується рентгенівський лазер з ядерним накачуванням, різного роду прискорювачі елементарних частинок.

Внаслідок згорання вугілля в ТЕС або в житлових будинках відбувається радіоактивне забруднення навколишнього середовища. У вугіллі містяться природні радіонукліди: ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th в рівновазі з їх продуктами розпаду. При згоранні вугілля відбувається концентрація радіонуклідів у золі. Викид їх в атмосферу залежить від зольності вугілля і ефективності очисних фільтрів ТЕС. Фахівцями підраховано, що радіоактивні викиди ТЕС на порівнянних відстанях на 1-3 порядки більші, ніж від нормально працюючої АЕС. Вважається, що населення, яке проживає в районі ТЕС (у радіусі 20 км), одержує за рік додаткову середню індивідуальну дозу опромінення до 0,06 мЗв. Іонізуюче випромінювання знайшло широке застосування в сільському господарстві. На цей час склалися ряд напрямків використання радіоактивних речовин.

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 γ -опромінення ягід і фруктів, що швидко псуються. Це знижує їх зараженість мікроорганізмами, плісневими спорами і т.п.

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

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

6. Застосування радіаційних технологій у тваринництві і ветеринарії. Великі дози іонізуючого випромінювання згубно діють на мікрофлору, ця обставина використовується при консервації тваринницької продукції (досягається практично повна стерилізація продукції).

Таким чином, у сучасних умовах 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).

АТОМНА ЕНЕРГЕТИКА

У ядерної енергетики у світі досить неоднозначний статус. Екологи виступають проти, окремі країни на зразок Німеччини планують остаточно від неї відмовитися. Крім того, війна в Україні та окупація росією Запорізької АЕС показала, як подібні об'єкти можна використовувати для шантажу країни та цілого регіону. Проте в окремих країнах, зокрема в Україні, ядерні реактори виробляють вагомую частку електроенергії.

Перша АЕС була введена в дію в м. Обнінську під Москвою в 1954 р. і мала потужність всього 5000 кВт. За останніми даними, на атомних електростанціях у світі налічується 411 енергоблоків потужністю 368 тисяч 835 МВт. Вони виробляють трохи менше 10% усієї електроенергії (рис. 1).

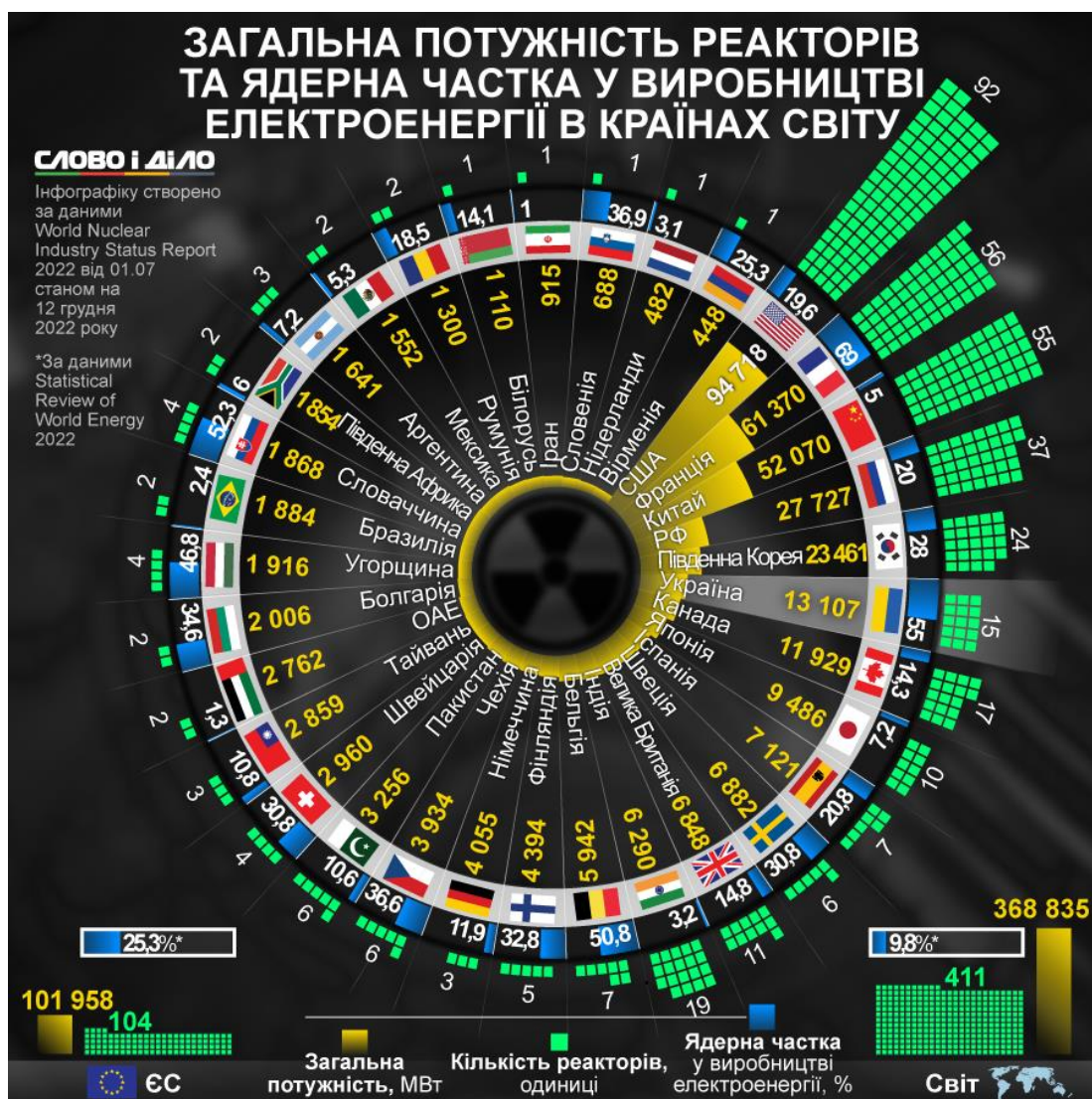


Рис. 1. Загальна потужність реакторів та ядерна частка у виробництві електроенергії у країнах світу

<https://www.slovoidilo.ua/2022/12/12/infografika/svit/yaderna-enerhetyka-yaku-chastku-vyrobnycztvi-elektroenerhiyi-zajmaye-krayinax-svitu>

У Євросоюзі нараховується 104 енергоблоків потужністю 101 тисяча 958 МВт. Частка ядерної енергетики у виробництві електроенергії перевищує 25%.

США посідають перше місце у світі за кількістю реакторів (92) та їхньою потужністю (94 тисячі 718 МВт). Але при цьому у виробництві електроенергії на ядерну енергетику припадає 19,6%.

У Франції саме ядерна енергетика займає провідну роль у виробництві електроенергії: вона становить 69% від загального виробництва – найвищий показник у світі. У країні 56 реакторів потужністю 61 тисяча 370 МВт.

У Китаї 55 реакторів загальною потужністю трохи більше 52 тисяч МВт. Але на їхню частку випадає лише 5% виробництва електроенергії.

Південна Корея замикає п'ятірку країн із загальної потужності ядерних реакторів – 23 тисячі 461 МВт. Ядерна частка у виробництві електроенергії становить 28%.

В Україні 15 реакторів загальною потужністю 13 тисяч 107 МВт. АЕС у нашій країні генерує 55% електроенергії.

У Словаччині на атомні станції припадає 52,3% усієї виробленої електроенергії (4 блоки потужністю 1 тисяча 868 МВт), у Бельгії – 50,8% (7 блоків потужністю 5 тисяч 942 МВт), в Угорщині – 46,8% (4 блоки потужністю 1 тисяча 916 МВт), у Словенії – 36,9% (один блок потужністю 688 МВт), у Чехії – 36,6% (6 блоків потужністю 3 тисячі 934 МВт).

Зараз в Україні діють 4 АЕС (Запорізька, Рівненська, Хмельницька та Південноукраїнська). В експлуатації на АЕС України 13 енергоблоків із встановленою потужністю – 11848 МВт. Протягом тривалого періоду атомна енергетика забезпечує істотну частину загального виробництва електроенергії в Україні (до 60%).

Запорізька (6 працюючих енергоблоків, загальна потужність 6000 МВт); Південноукраїнська (3 енергоблоки, 3000 МВт); Хмельницька (2 енергоблоки, 2000 МВт); Рівненська (4 енергоблоки, 2835 МВт). У грудні 2000 р. була закрита Чорнобильська АЕС.

На більшості АЕС нині використовуються реактори на теплових нейтронах, що працюють за одноконтурною або двоконтурною схемою, кожна з яких має певні переваги й недоліки. Реактори на теплових нейтронах за конструкцією поділяють на водо-водяні енергетичні реактори-ВВЕР (у іноземній літературі LWR і PWR) і урано-графітові каналні реактори – РВПК (реактор великої потужності каналний – у іноземній літературі BWR). Починають входити в експлуатацію й реактори на швидких нейтронах – БН (або відповідно LMFBR із трьохконтурною схемою тепловідводу). У Росії вже діють реактори БН-350 і БН-600, розробляються реактори БН-800 і БН-1600 (цифри вказують на потужність у мегаватах (ел.)). За кордоном також перебувають в експлуатації кілька подібних реакторів.

У процесі експлуатації АЕС з'явилася низка негативних моментів, одним із яких стала небезпека аварій і пожеж на них. Досвід експлуатації ядерних реакторів різних типів підтвердив, що кожна аварія, кожна пожежа на АЕС спричиняють серйозні наслідки.

ЯДЕРНИЙ ПАЛИВНИЙ ЦИКЛ

Ядерний паливний цикл – це вся послідовність виробничих процесів, що повторюються, починаючи від вибодування палива і кінчаючи позбавленням від радіоактивних відходів. Залежно від виду ядерного палива і конкретних умов ядерні паливні цикли можуть розрізнятися в деталях, але їх загальна принципова схема зберігається. Ядерний паливний цикл (ЯПЦ) включає такі стадії.

1. Видобуток уранової руди, подрібнення і видобування з неї урану.
2. Переробка сировини в ядерне паливо (збагачення урану, тобто підвищення відносного вмісту ^{235}U).
3. Виготовлення паливних елементів – ТВЕЛів.
4. Використання палива в ядерних реакторах.
5. Переробка відпрацьованого палива (регенерація) для наступного використання видобутих радіонуклідів.
6. Обробка і поховання радіоактивних відходів.
7. Транспортування радіоактивних матеріалів для забезпечення всіх цих стадій.

Видобування руди. Початкова стадія паливного циклу – гірничодобувне виробництво, тобто уранова копальня, де добувається уранова руда. Середній вміст урану в земній корі досить великий і розцінюється як $2,5 \cdot 10^{-4}\%$ по масі. Уранові руди відрізняються винятковою різноманітністю складу. В більшості випадків уран в рудах представлений не одним, а декількома мінеральними утвореннями. Відомо близько 200 уранових і урановмісних мінералів.

Добування уранової руди, також як і інших корисних копалини, здійснюється в основному або шахтним, або кар'єрним способом залежно від глибини залягання пластів. Останніми роками почали застосовуватися методи підземного вилуговування, що дозволяють виключити виїмку руди на поверхню і проводити витягання урану з руд прямо на місці їх залягання.

Переробка. Уранова руда, що добувається з землі, містить рудні мінерали і пусту породу. Подальше завдання полягає в тому, щоб руду переробити – відокремити корисні мінерали від пустої породи і отримати хімічні концентрати урану. Обов'язкові стадії при отриманні уранових хімічних концентратів – подрібнення початкової руди, вилуговування (переведення урану з руди в розчин). Дуже часто перед вилуговуванням руду збагачують – різними фізичними методами збільшують зміст урану. Переробка уранових руд проводиться на спецкомбінаті в м. Жовті Води.

Аффінаж. На всіх етапах переробки уранових руд відбувається певне очищення урану від супутніх йому домішок. Проте повного очищення досягти не вдається. Деякі концентрати містять всього 60 – 80%, інші 95 – 96% оксиду урану, а решта – різні домішки. Такий уран не придатний як ядерне паливо. Наступна обов'язкова стадія ядерного паливного циклу – аффінаж, на якому завершується очищення сполук урану від домішок і особливо від елементів, що володіють великим перетином захоплення нейтронів (гафній, бор, кадмій і так далі).

Збагачення урану. Сучасна ядерна енергетика з реакторами на теплових нейтронах базуються на низькозбагаченому (2-5%) урановому паливі. У реакторі на швидких нейтронах використовується уран з значно більшим змістом ^{235}U (до 93%). Отже перш ніж виготовляти паливо природний уран, що містить тільки 0,72% ^{235}U , необхідно збагатити отриманий концентрат, тобто розділити ізотопи ^{235}U і ^{238}U . Хімічні реакції дуже малочутливі до атомної маси реагуючих елементів. Тому вони не можуть бути використані для збагачення урану; необхідні фізичні методи розділення ізотопів. Основним промисловим методом виробництва збагаченого урану є газодифузійний. Також існує відцентровий метод, заснований на використанні високошвидкісних газових центрофуг.

Виготовлення палива. Збагачений уран служить початковою сировиною для виготовлення палива ядерних реакторів. Ядерне паливо застосовується в реакторах у вигляді металів, сплавів оксидів карбідів, нітриду і інших паливних композицій, яким додається певна конструкційна форма. Конструкційною основою ядерного палива в реакторі є тепловиділяючий елемент – ТВЕЛ.

Слід відзначити, що в Україні, як в багатьох інших країнах світу, немає повного (замкнутого) ядерно-паливного циклу. Проте окремі елементи його функціонують. До них відносяться: видобування, подрібнення і збагачення уранової руди (уранові рудники), використання ядерного палива (енергетичні та дослідницькі реактори), зберігання відпрацьованого палива (сховища), перевезення свіжого та відпрацьованого палива і радіоактивних відходів (спеціальні транспортні підприємства), зберігання радіоактивних відходів (пункти їх захоронення) та деякі інші.

Підприємства по видобуванню та переробці уранових руд знаходяться в Дніпропетровській, Кіровоградській та Миколаївській областях.

Крім того, що увесь цикл дуже дорогий і енергоємний, він ще і надзвичайно небезпечний для навколишнього середовища. На кожній стадії ядерного паливного циклу до навколишнього середовища потрапляють радіоактивні речовини.

Забруднення починається ще на стадії добування сировини, тобто на уранових рудниках. Опромінення населення, яке проживає поблизу уранових рудників і гідрометалургійних заводів, пов'язане з надходженням у навколишнє середовище газоподібних, рідких і твердих відходів, які утримують природні радіонукліди – переважно уран і дочірні продукти його розпаду. З рудників разом з вентиляційним повітрям в атмосферу викидається радон. Основним джерелом радіоактивного забруднення є відходи при переробці руди. При 0,2% вмісті урану в руді на кожні 200 т одержуваного урану (річна потреба АЕС потужністю 1 ГВт) утворюється 105 т відходів, що накопичуються у хвостосховищах. Спочатку вони вважалися безпечними, і американські будівельні фірми використовували їх як наповнювачі бетону, який використовували при будівництві будинків. Лише після того, як стало відомо, що радон є причиною раку легенів, була впроваджена програма знесення тисяч будинків.

Кількість радіоактивних відходів зростає на стадії збагачення урану. З

нього виготовляються спеціальні паливні елементи – ТВЕЛі. У реактор типу РБМК завантажуються близько 180 т, а у ВВЕР – 70 т таких ТВЕЛів, які внаслідок роботи реактора перетворюються на високорадіоактивні відходи.

Кожний реактор викидає у навколишнє середовище цілий ряд радіонуклідів із різними періодами напіврозпаду, більшість з яких розпадається швидко й тому має лише місцеве значення. Однак, деякі з них живуть досить довго й можуть поширюватися по всій земній кулі, а певна частина ізотопів залишається у навколишньому середовищі практично навіки. При цьому різні радіонукліди також поведуться по-різному: одні поширюються в навколишньому середовищі швидко, інші – надзвичайно повільно.

Атомна енергетика принципово відрізняється від енергетики на органічному паливі (кам'яне вугілля, нафта, торф, газ). В останній паливо тільки спалюється, а в атомній енергетиці одночасно зі спалюванням відбувається *напрацювання нового*. Продукти поділу, що утворюються в процесі роботи реактора, нікуди не зникають при радіоактивному розпаді, вони просто перетворюються в інші нукліди.

Так, протягом 5 років роботи тільки одного реактора (РБМК) на АЕС накопичується близько 300 т відпрацьованих, надзвичайно небезпечних високорадіоактивних ТВЕЛів. Відпрацьовані ТВЕЛі надзвичайно радіоактивні, їх не можна перевозити, тому вони поміщаються в спеціальні басейни на території АЕС, де знаходяться кілька років (як правило, 1-3 роки), поки їх радіоактивність не знизиться до такого рівня, щоб можна було (у спеціальних контейнерах, спеціальними поїздами) перевезти їх на завод по регенерації. Радіохімічний завод потужністю 1500 т · рік⁻¹ може переробляти паливо 50 ядерних реакторів потужністю 1 ГВт.

Схема переробки відходів на радіохімічному заводі включає.

1. Зберігання в рідкій формі для зниження залишкового тепловиділення.
2. Отвердіння витриманих рідких відходів і тимчасове зберігання в контрольованих умовах.
3. Остаточне поховання отверділих відходів у стабільних геологічних формаціях (глибоких гранітних або соляних шахтах).

При цьому всередині приміщень тривалий час необхідно підтримувати певні кліматичні умови (постійність температури, тиску і відносної вологості). Але і це не гарантує усунення міграції радіонуклідів через кілька тисяч років, тому що серед похованих відходів є довгоживучі радіонукліди з періодами напіврозпаду в мільйон і більше років. На такий тривалий період не можна забезпечити їх надійну ізоляцію.

Етап переробки радіоактивних відходів на радіохімічному заводі є найбільш радіаційно небезпечним у ядерному паливному циклі. Велика частина радіоактивних речовин, що надходить в атмосферу, розсіюється на незначних відстанях від заводу. У результаті вже в 20 км від радіохімічного підприємства доза зменшується в 10 разів. Однак деякі довгоживучі радіонукліди, у першу чергу ¹⁴C, ⁸⁵Kr, ³H, ¹²⁹I, спричиняють глобальне забруднення біосфери. Це зумовлено їх досить високим ступенем міграції, яка призводить до їх розсіювання на величезних відстанях за відносно короткий час. При цьому на

стадію переробки відпрацьованого палива припадає: для ^{14}C – 70-80%, для ^{85}Kr , ^3H , ^{129}I – більше 99% загальної кількості відповідних радіонуклідів, які надходять у біосферу з усіх етапів ядерного паливного циклу.

Для розпаду продуктів поділу у відходах до прийнятого рівня, порівняно з радіаційними характеристиками уранової руди, необхідно до 600 років. Найбільшу небезпеку серед продуктів поділу при витримуванні відходів упродовж 10-600 років являють собою ^{90}Sr і ^{137}Cs , а за умови тривалого терміну (1000 і більше років) – ^{99}Tc , ^{129}I , ^{93}Zr .

На цей час у глобальному масштабі рівень іонізуючого випромінювання від відходів атомної промисловості невисокий. Однак надалі з ростом кількості відпрацьованого палива можуть виникнути серйозні проблеми із забезпеченням повної локалізації та ізоляції радіоактивних відходів і охороною навколишнього середовища, тобто із знаходженням оптимальних варіантів поховання відходів.

Проблема утилізації радіоактивних відходів останнім часом набирає надзвичайно важливого значення у зв'язку з тим, що у всьому світі необхідно буде демонтувати близько 300 АЕС з причини закінчення технічного терміну їх експлуатації. Демонтаж станцій зумовлюватиме створення такої ж кількості радіоактивних речовин як за весь час їх експлуатації протягом 25-30 років.

Радіацією вражається все: будинки, апаратура, ємності, контейнери, машини, механізми, одяг обслуговуючого персоналу і ін. Існують два шляхи: АЕС демонтувати і десь поховати гори радіоактивних накопичень матеріалів або над ними спорудити саркофаги і обслуговувати сотні років.

Справа ускладнюється ще тим, що ніхто не може сказати, де потрібно надійно схоронити плутоній, який звільниться після скорочення ядерної зброї. А його накопичено в боєголовках «ядерних» держав тисячі тонн. Встановлено, що 400 грамів плутонію достатньо, щоб викликати смертельне захворювання – рак легенів у 10 млрд. людей.

ХАРАКТЕРИСТИКА ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ ТИПУ ВВЕР ТА РВПК

На більшості АЕС нині використовуються реактори на теплових нейтронах, що працюють за одно контурною або двоконтурною схемою, кожна з яких має певні переваги та недоліки. Реактори на теплових нейтронах за конструкцією поділяють на водо-водяні енергетичні реактори-ВВЕР (у іноземній літературі LWR і PWR), в яких як теплоносієм, так і сповільнювачем є легка вода, і реактори великої потужності ураново-графітові каналні реактори-РВПК, (у іноземній літературі BWR), де теплоносієм є легка вода, а сповільнювачем – графіт. Починають входити в експлуатацію й реактори на швидких нейтронах – БН (або відповідно LMFBR) із трьох контурною схемою тепловідводу (рис. 2).

Принципова відмінність двох перших типів реакторів полягає ще й в тому, що в реакторі типу ВВЕР теплоносій прокачується через всю активну зону, а тому весь корпус реактора перебуває під тиском, а в реакторах типу

РВПК теплоносії циркулює по робочих каналах і тільки вони перебувають під тиском. В зв'язку з цими особливостями, реактори першого типу прийнято називати корпусними, а реактори другого типу – канальними.

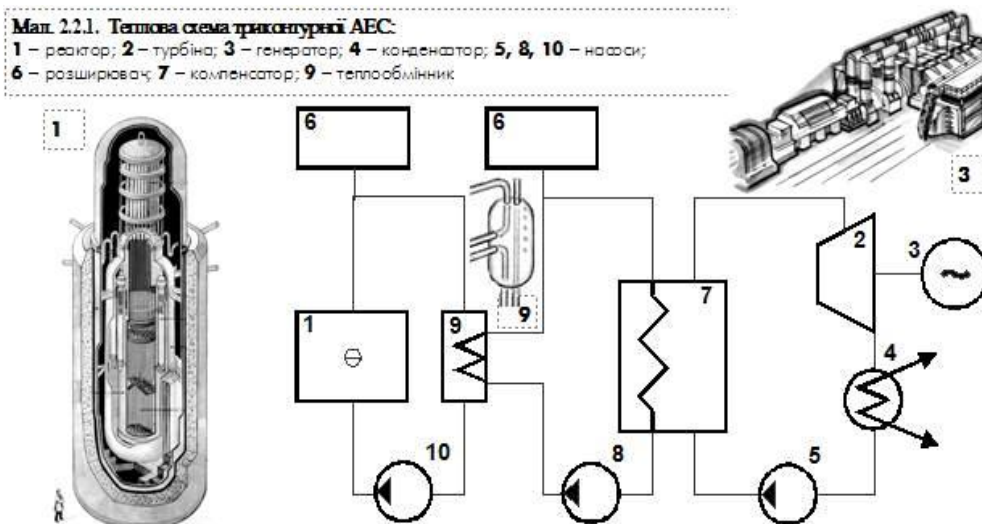


Рис. 2. Теплова схема триконтурної АЕС

На Чорнобильській АЕС використовувались реактори великої потужності канальні (РВПК-1000), де теплоносієм служить легка вода, а сповільнювачем – графіт. На одному з них (четвертому) і сталася аварія.

Ядерні реактори є генераторами величезної кількості штучних радіонуклідів, які за своїм походженням поділяються на продукти ядерного поділу, продукти наведеної активності та ізотопи трансуранових елементів.

Продукти ядерного поділу (ПЯП) виникають у процесі розщеплення ядер урану або плутонію під дією нейтронів. До них відносяться близько 200 радіоактивних ізотопів 35 хімічних елементів, що знаходяться в середині таблиці Д.І. Менделєєва – від цинку до гадолінію. Продукти ядерного поділу є, як правило, β - і γ -випромінювачами. Періоди їх напіврозпаду знаходяться в межах від кількох секунд до десятків років.

Продукти наведеної активності з'являються при опроміненні нейтронами елементів конструкції активної зони, теплоносія, що циркулює через неї. До ПНА відносяться близько 400 радіонуклідів, які як і ПЯП є, в основному, β - і γ -випромінювачами з періодами напіврозпаду від секунд до десятків і тисяч років.

Ізотопи трансуранових елементів виникають при опроміненні ^{238}U повільними нейтронами. До ІТЕ відносяться близько 60 радіонуклідів, які в переважній більшості є α -випромінювачами з великими періодами напіврозпаду (тисячі років).

Таким чином, під час роботи ядерного реактора в ньому утворюється близько 700 різних радіонуклідів.

Науковий комітет з дії атомної радіації Організації об'єднаних націй (НКДАР ООН) вважає, що головне значення в опроміненні людей мають тільки 8 радіонуклідів, вклад кожного з яких в ефективну еквівалентну дозу перевищує 1%. До них відносяться ^{14}C , ^{137}Cs , ^{95}Zr (цирконій), ^{106}Ru (рутений),

^{90}Sr , ^{144}Ce , ^3H , ^{131}I .

Кількісне накопичення та якісний склад конкретних радіонуклідів в активній зоні реактора залежить від тривалості його роботи, ступеня збагачення ядерного палива та часу витримки реактора після його зупинки. Вихід продуктів поділу з активної зони за її перегріву або розплавлення визначається ступенем їх леткості.

Так, інертні гази криптон (Kr) і ксенон (Xe), які киплять при температурі, нижчій від 0 °С, повністю випаровуються з палива.

Значною мірою можуть виділятися із палива йод (I), цезій (Cs) і телур (Te), що мають температуру плавлення, відповідно: 184, 669, 990°С.

Такі хімічні елементи, як Мо, Zr, Се і Рu, температура кипіння яких, відповідно: 4612, 4377, 3426, 3232°С, міцніше зв'язані з паливом (паливні нукліди) і можуть надходити в навколишнє середовище у вигляді тонко дисперсного пилу (паливних частинок). Таким чином, при аварії реактора радіоактивні викиди можуть складатись із двох компонентів:

– газоаерозольного, до складу якого входять леткі радіонукліди (радіоізотопи криптону, ксенону, йоду, цезію і телуру);

– паливного у вигляді дрібнодисперсного пилу, до складу якого входять радіонукліди з високою температурою кипіння (радіоізотопи молібдену, цирконію, церію, плутонію і, в значній мірі, стронцію).

Співвідношення цих компонентів залежить від ступеню перегрівання палива і механічного руйнування активної зони реактора.

При радіаційних аваріях на інших об'єктах ядерно-паливного циклу кількісний і якісний склад радіонуклідів, які потрапили у довкілля, супроводжується утворенням та накопиченням нових (дочірніх) радіонуклідів, а це приводить до відповідних змін радіонуклідного складу забруднення об'єктів навколишнього середовища.

Оскільки до складу аварійних викидів ядерних реакторів входять як недовговічні з періодом напіврозпаду менше 15 діб, так і довговічні з періодами напіврозпаду більше 15 діб, то з перебігом часу кількість недовговічних радіонуклідів буде зменшуватись більшою мірою, ніж довговічних. Тому з часом буде змінюватись і внесок кожного з них в сумарну дозу опромінення населення. Зазначені закономірні зміни за часом радіонуклідного складу аварійних викидів ядерних реакторів та створюваного ними зараження навколишнього середовища враховуються при розробці, плануванні та впровадженні відповідних заходів радіаційного захисту населення.

МІЖНАРОДНА ШКАЛА ПОДІЙ НА АЕС

Серед надзвичайних ситуацій особливе місце посідають аварії з викидом радіоактивних речовин.

Радіаційна аварія – це втрата управління джерелами іонізуючого випромінювання, яка спричинена несправністю устаткування, неправильними діями персоналу, стихійним лихом тощо, які призвели до опромінювання

людей вище за встановлені норми, або до радіоактивного забруднення навколишнього середовища.

Радіоактивне забруднення місцевості викликає необхідність термінової евакуації населення, промислових підприємств, проведення заходів з дезактивації, що потребують значних затрат, може призвести до численних жертв і захворювань серед населення.

На цей час аварії з викидом радіоактивних речовин можливі на всіх етапах (підприємствах) ядерного паливного циклу в науково-дослідних і проектних організаціях, що мають ядерні реактори, а також на об'єктах транспорту, де використовуються ядерні енергетичні установки.

Аналіз причин виникнення аварій виявив, що найбільша їх кількість спричинена:

1. розкраданням і втратами джерел випромінювання – 45%;
2. обривами та падіннями блоків джерел з місця установки – 29%;
3. несприятливими умовами використання (вібрація, агресивне середовище, перегрівання тощо), що призвели до руйнування захисту і випадання джерел іонізуючого випромінювання – 26%.

З метою систематизації радіаційних наслідків аварій на АЕС і формування єдиного підходу в їх класифікації в МАГАТЕ розроблені відповідні рекомендації. Ці рекомендації вводять шкалу аварій різного типу і подій на АЕС на підставі кількісної характеристики одного з основних параметрів аварії – значення радіоактивного викиду в навколишнє середовище. У ролі визначального радіонукліду виступає ^{131}I . Відповідно до запропонованої шкали розрізняють 8 типів аварій і подій на АЕС.

Відлік починається з нульового рівня, до якого відносяться події, що не мають істотного значення для безпеки. До 1-3 рівнів – події або інциденти незначної середньої і серйозної тяжкості, що не мають радіаційних наслідків для населення. Тобто без викиду радіоактивних речовин. події з 4 по 7 рівень – це аварії з викидами радіоактивних речовин у межах АЕС, з ризиком для навколишнього середовища, важкі і глобальні, тобто такі, що порушують територію більше, ніж однієї країни.

1957 р. Південний Урал – вибух сховища з високотоксичними відходами. Містилося 80 т відходів. Забруднено 235 тис. км² території. Забруднено 217 населених пунктів, 30 озер, 4 річки. (Викинута в довкілля активність – 20,0 МКі).

1957 р. Англія, 6 рівень. Загорання графіту на заводі з виробництва ^{239}Pu з ^{238}U (Активність 0,033 МКі).

1979 р. США, 5 рівень. Зрив запобіжної мембрани першого контуру теплоносія 2-го блоку. Викид 40 тис. тонн забрудненої води, 10% радіоактивних продуктів потрапило в атмосферу. (Активність 0,043 МКі).

1986 р. Чорнобиль, 7 рівень. Вибух і пожежа 4-го блоку. (Активність 50 МКі). Несумісна з усіма попередніми.

Слід зазначити, що за цією шкалою події оцінюються тільки з точки зору радіаційної безпеки. А події, не пов'язані з радіаційною безпекою, класифікуються як такі, що знаходяться поза даною шкалою.

За період 1971-1981 рр. у 14 країнах світу сталися 151 аварія з різною інтенсивністю викидів радіоактивних продуктів і з різними наслідками. Щорічно у світі відбувається в середньому 45 пожеж на АЕС. Тільки в США за 10 років сталося 169 аварій, різних за масштабом. Особливі умови радіоактивного забруднення і дезактивації виникають при аваріях на атомних підводних човнах і космічних об'єктах. Так, після аварії радянського підводного човна «Комсомолец» у червні 1989 р. біля північного узбережжя Норвегії над територією цієї країни в пробах аерозолів були знайдені радіонукліди ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{131}I , ^{140}Ba . У разі аварії на космічних об'єктах радіоактивні продукти розсіюються на величезній території.

Усього ж за час існування атомної енергетики зареєстровано понад 900 подій на АЕС різної складності з різними наслідками, аварій з викидом радіоактивних речовин зафіксовано більше 300.

Аварії на АЕС залишаються значним чинником виникнення надзвичайних ситуацій. Практично ймовірність катастрофічних аварій на АЕС складає один випадок на 10 років.

Особливості аварій на АЕС.

Радіоактивне забруднення біосфери в результаті аварій на АЕС відрізняється від характеру забруднень при ядерному вибуху за цілим рядом показників.

1. Радіонуклідний склад викидів.
2. Тривалість викидів радіонуклідів у навколишнє середовище.
3. Розмір і конфігурація зони зараження.
4. Глобальний характер.

Радіонуклідний склад викидів. Ланцюгова реакція при ядерному вибуху і в ядерному реакторі протікає за різними законами. Ядерний вибух характеризується надвисокою швидкістю реакції і утворенням спалаху нейтронів величезної активності. Крім того, після вибуху залишаються продукти поділу, серед них більшість короткоживучих. Пояснюється це тим, що радіоактивних речовин при ядерному вибуху викидаються в момент їх утворення.

Ядерна реакція в реакторі має істотні особливості. Ядерним паливом для АЕС є ^{238}U малозбагачений ^{235}U (в 1 т оксиду ^{238}U знаходиться 20 кг ^{235}U). При роботі реактора в процесі поділу ядер урану під впливом нейтронів у їх активній зоні накопичуються *продукти ядерного поділу*, які становлять до 200 осколкових радіонуклідів більше 30 хімічних елементів, що знаходяться в середині таблиці Менделєєва – від германію (Ge) з атомним номером 32 до європію (Eu) з номером 63, а також нукліди наведеної активності – цезію (Cs) і нептунію (Np), які є β - і γ -випромінювачами, а також трансуранові α -активні елементи – плутоній (Pu), америцій (Am).

Кількість і радіонуклідний склад ПЯП залежить від часу роботи реактора. Чим більша його тривалість, тим більша кількість ядер урану ділиться, тим більше накопичується ПЯП. Так, частка активності, викинутої реактором четвертого блоку ЧАЕС, що працював менше 3 років, складала: ^{131}I – 20%, ^{137}Cs – 13%, ^{134}Cs – 10%, ^{90}Sr – 4%, тоді як більшість інших – від 2 до 5%. За

офіційними даними (заниженими), в атмосферу було викинуто 63 кг надзвичайно високорадіоактивних продуктів (до 6 травня). Протягом ядерного вибуху в Хіросімі в атмосферу було викинуто 740 г таких радіоактивних речовин.

Припускають, що при вибуху на ЧАЕС за межі станції було викинуто менше 4% палива. Решта – близько 170 т – змішалася з розплавленим від високих температур будівельним матеріалом. Лава розійшлася по десятках приміщень, затекла в утворені порожнини, проникла в трубопроводи та ін.

Отже, склад аварійного викиду ПЯП дещо відрізняється від складу продуктів ядерного вибуху, і, чим більше часу працюватиме ядерний реактор, тим більше в ньому накопичуватиметься радіонуклідів (за масою), при цьому в складі ПЯП у відсотковому відношенні буде більше довгоживучих радіонуклідів.

Тривалість викидів радіонуклідів у навколишнє середовище. Викид радіонуклідів відбувається не одномоментно, як при ядерному вибуху, а триває до моменту повної герметизації зруйнованого реактора.

ЧОРНОБИЛЬСЬКА ТА ФУКУСІМСЬКА КАТАСТРОФИ

26 квітня 1986 р. на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС) сталася аварія, яка за масштабами викиду з довкілля радіоактивних речовин не має аналогів 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, котрий повністю розгерметизувався, у зв'язку з чим розпочалося виділення радіоактивних речовин у довкілля. Утворився струмінь, який піднімався на висоту до 1,5 км й виносив із кори реактора оксиди, карбіди й атомарні форми продуктів поділу урану й радіоактивних ізотопів, що виникли під впливом нейтронів. У струмені були й аерозольні частинки, в яких також містилися радіоактивні речовини. Струмінь із реактора, що мав дуже високу температуру, діяв як своєрідна термохімічна колонка, в котрій відбувалося певне розділення різних радіонуклідів. Із цього радіоактивного струменя вітром відшматовувалися з різних висот маси радіоактивних речовин, які у вигляді радіоактивних хмар 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 радіонуклідів 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 I, 12-30% ^{134}Cs , ^{137}Cs , 3-4 % менш летких

радіонуклідів (^{95}Zr , ^{99}Mo , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{103}Ru , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{154}Eu , ^{155}Eu та ін.) від їх вмісту в реакторі на момент аварії.

Хід ліквідації наслідків аварії можна умовно поділити на три етапи:

– гострий, до моменту повної локалізації викидів радіонуклідів з реактора. Для ЧАЕС він тривав з 26 квітня по 14 листопада 1986 р., тобто до моменту створення саркофага;

– етап ліквідації явних наслідків аварії. У цей час проводяться основні дезактиваційні заходи. Для ЧАЕС він тривав з 1987 по 1990 рік;

– етап довгострокових планових заходів щодо зменшення впливу негативних причин на життєдіяльність потерпілих людей і наступних поколінь. Для ЧАЕС він триває з 1991 р.

Для ЧАЕС перший етап за інтенсивністю викидів радіонуклідів можна умовно розділити на три періоди. У перший період, який тривав добу, миттєвий стрибок потужності призвів до викиду 25% усієї активності.

Другий період тривалістю 5 діб характеризувався зниженням майже в 6 разів викидів активності, горінням графіту, виділенням летких продуктів поділу. У результаті поступового розігріву палива відбулося підвищення температури до $+1800^{\circ}\text{C}$.

Протягом наступних 4 діб (третьй період) діяло гаряче джерело, яке спричинило подальший викид продуктів поділу, розплавлення конструкційних матеріалів.

Припинення викидів на 10-ту добу від початку катастрофи відбулося внаслідок розплавлення опорної плити і виходу розплавленого палива в підреакторний простір. Крім того, допомогло засипання аварійного реактора нейтралізуючими тепловідвідними і фільтруючими матеріалами (карбід бору, доломіт, глина, свинець, пісок).

Роботи з локалізації джерела радіації шляхом засипання проводилися в період з 27 квітня по 5 травня 1986 р.

Зміни метеорологічних умов під час викидів із реактора радіоактивних матеріалів зумовили складну картину забруднення великих територій не лише в Україні, Білорусії й Росії, а також у багатьох країнах Європи. Рух радіоактивних хмар, з яких радіонукліди у складі опадів потрапляли на поверхню Землі, спричинив формування так званих слідів. Найчіткіше проявився *західний слід*, що являє собою вузьку смугу, 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. Широким віялоподібним є *південний слід*. Формування східного сліду зумовило забруднення кількох областей Росії. Зони з підвищеними активностями радіонуклідів утворилися також на території Швеції, Фінляндії, Німеччини, Австрії, Швейцарії, Греції, Болгарії, Румунії, Грузії. Радіонуклідний склад забруднень, що виникли за різними слідами, неоднаковий, хоча спостерігається деяка кореляція між вмістом ізотопів Pu й ^{241}Am та щільністю забруднення ^{90}Sr .

В Україні підвищення потужності дози, що спричинене забрудненням ^{137}Cs у межах 4...20 кБк/м, спостерігається на більшій частині території. Західний слід охоплює Київську, Житомирську області, північ Рівненської та північно-східну частину Волинської областей: тут щільність поверхневого забруднення в окремих плямах сягає 190 кБк/м².

Південний слід зумовив забруднення Київської, Черкаської, Кіровоградської, частково Вінницької, Одеської та Миколаївської областей. Тут щільність забруднення ^{137}Cs досягає 100 кБк/м². Від південного сліду відгалузився слід у західному напрямі й зумовив забруднення частин Вінницької, Хмельницької, Тернопільської, Івано-Франківської та Чернівецької областей, де середня щільність забруднення ^{137}Cs становить 10...40 кБк/м². Значні забруднення – до 40 кБк/м² – виявляються в західній і північно-східній частинах Чернігівської області, на півночі Сумської області, в Донецькій, Луганській і Харківській областях.

У формуванні радіоактивної обстановки виділяються два періоди: йодної небезпеки (тривалістю 1,5-2 місяці) і цезієвий період, який триватиме ще довгі роки, оскільки близько 95% його розпадається через 120 років, а через 150 років залишиться до 3%.

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.

З часом радіонукліди які потрапили в довкілля (у водойми, в рослини, в 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, котрі проживають на забруднених радіонуклідами територіях. Зовнішнє опромінення зумовлене тим, що збільшилася концентрація радіоактивних речовин, насамперед радіонукліда ^{137}Cs , який випромінює γ -радіацію. Внутрішнє опромінення зумовлене надходженням радіоактивних речовин в організм людини разом із питною водою, їжею а також за рахунок інгаляції радіоактивних речовин у складі повітря.

На територіях, забруднених внаслідок Чорнобильської катастрофи, опромінення в підвищених дозах зазнали не тільки люди, а й усі без винятку живі істоти будь-яких екосистем.

До потерпілих внаслідок чорнобильської катастрофи належать такі **категорії** людей:

- ті, хто брав участь у припиненні пожежі й викидів радіоактивних речовин із жерла зруйнованого реактора. Серед цієї групи – люди, що зазнали найсильнішого опромінення; багато з них загинули від гострої променевої хвороби;

- учасники ліквідації наслідків аварії – так звані «ліквідатори». Серед них опромінення в найбільших дозах зазнали ті, котрі працювали біля аварійного блока в перші місяці після аварії, брали участь у дезактивації прилеглої до реактора території промайданчика, засипанні жерла реактора з гелікоптерів, спорудженні тимчасового укриття зруйнованого енергоблоку – «саркофага». Ця

група дуже численна – кілька сотень тисяч переважно зовсім молодих чоловіків. Індивідуальні еквівалентні дози могли перевищувати 500 мЗв;

- ліквідатори, які працювали й працюють зараз у так званій «зоні відчуження» (територія навколо ЧАЕС радіусом 30 км), на реакторах, тимчасових пунктах поховання й локалізації радіоактивних відходів, на дезактивації території, впорядкуванні доріг та гідротехнічних споруд, догляді за лісовими насадженнями тощо;

- населення, яке було евакуйоване з міста Прип'ять і «зони відчуження».

В цій групі потерпілих багато дітей, вагітних жінок і людей похилого віку;

- населення, яке проживає на територіях, забруднених радіонуклідами, й якому загрожує зростання доз опромінення.

Загальна чисельність зазначених груп перевищує 2,8 млн. осіб.

Шкода, яку заподіяла Чорнобильська катастрофа величезна й має різні аспекти: по-перше, й це найголовніше – вплив на здоров'я численної людської популяції; по-друге, радіоактивне забруднення, а отже, вилучення з корисного природокористування величезних територій, витрати на вимушене переселення десятків тисяч людей, здійснення системи контрзаходів для зменшення дозового навантаження на людей, відшкодування населенню втрат, пов'язаних з аварією і т. п.

Щодо стану здоров'я населення, яке зазнало опромінення в підвищених дозах, то з року в рік зростає захворюваність, передусім серед ліквідаторів і дітей, за різними нозологічними формами. Особливо виразним є багаторазове почастишання розвитку злоякісних пухлин щитоподібної залози в дітей (це захворювання вважають індикаторним серед тих, що індукуються опроміненням).

Чорнобильська катастрофа породила багато проблем, для вирішення яких потрібно багато десятків років. Серед них – визначення подальшої долі «саркофага» над зруйнованим реактором, в якому зосереджено більш як 160 т ядерного палива, перетворення зони відчуження на екологічно безпечну територію тощо.

Катастрофа на АЕС «Фукусіма-1» 11 березня 2011 р., у результаті землетрусу в Японії на острові Хонсю в м. Окума вийшла з ладу система охолодження на двох блоках АЕС. Внаслідок цього на чотирьох енергоблоках АЕС з 12 березня сталася серія вибухів і пожеж. АЕС Фукусіма-1 мала 6 киплячих водо-водяних реакторів (Boiling Water Reactor, BWR) сумарною потужністю 4,7 ГВт, однак на період аварії працювали 1-й, 3-й і 4-й енергоблоки, що були зупинені дією аварійного захисту. Всі аварійні системи спрацювали у штатному режимі. Але за годину було перервано електропостачання (зокрема і від резервних дизель-генераторів) через цунамі, що сталося слідом за землетрусом. Вимкнення електропостачання призвело до виходу з ладу системи охолодження реакторів і до розплавлення активної зони реакторів. Аварія призвела до великого витoku радіації та одержала максимальну оцінку небезпеки за шкалою INES.

Із 20-кілометрової зони АЕС було відселено 78000 людей, а з урахуванням 30-кілометрової зони – 140000. За наявними на сьогодні даними, загальний викид радіоактивних речовин на «Фукусімі-1» склад від 370 до 630 тисяч терабеккерелів. Утім, це – на порядок менше чорнобильського викиду. За радіоактивним ізотопом ^{131}I , який накопичується у щитоподібній залозі, цифри такі: «Фукусіма-1» – від 130 тис. до 150 тис. терабеккерелів, ЧАЕС – 1,8 млн. терабеккерелів.

Внаслідок Киштимської аварії у 1957 р. $7,4 \cdot 10^6$ Бк (2 Мк) радіонуклідів було піднято на 1-2 км, що спричинило забруднення СРСР площею 23 тис. км².

НАДХОДЖЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ У ЗОВНІШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ. ЗАКОНОМІРНОСТІ ПОВОДЖЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ РЕЧОВИН У БІОСФЕРІ

Радіоактивні речовини надходять у зовнішнє середовище:

- у результаті випробувань ядерної й термоядерної зброї (особливо якщо вони проводяться на поверхні земної кори, у повітрі й воді);
- як радіоактивні відходи промислових і енергетичних реакторів;
- у результаті аварійних ситуацій на цих установках;
- певна кількість радіоактивних матеріалів надходить у навколишнє середовище при видобутку уранової руди,
- виділенні з неї й збагаченні урану;
- переробці відпрацьованих тепловиділяючих елементів (твелів) з метою одержання ядерного пального ^{239}Pu ;
- у результаті транспортування й зберігання радіоактивних відходів.

Радіонукліди, що забруднюють зовнішнє середовище, мають різне походження й фізико-хімічні властивості. Частина з них являє собою осколки й продукти радіоактивного розпаду цих осколків при розпаді ядер.

Радіоактивні речовини можуть поширюватися у вигляді радіоактивної хмари, що складається з летючих речовин і часток різних розмірів. Радіоактивні речовини, що складаються із часток, осаджуються у вигляді радіоактивних випадінь, розподіл яких залежить головним чином від метеорологічних умов (рис. 3).

1. Хімічні властивості радіонуклідів обумовлені місцем розташування елемента в періодичній системі Д.І. Менделєєва.

Високою хімічною активністю володіють радіонукліди елементів І групи і галогенів, які не утворюють важкорозчинних сполук, менш рухливі нукліди лужноземельних елементів.

Найменшою хімічною активністю володіють радіонукліди рідкоземельних елементів, таких, як цирконій і ніобій, а також радіонукліди трансуранових елементів.

2. Хімічна рухливість радіоактивних речовин при наземному вибуху значно знижується в порівнянні з повітряним.

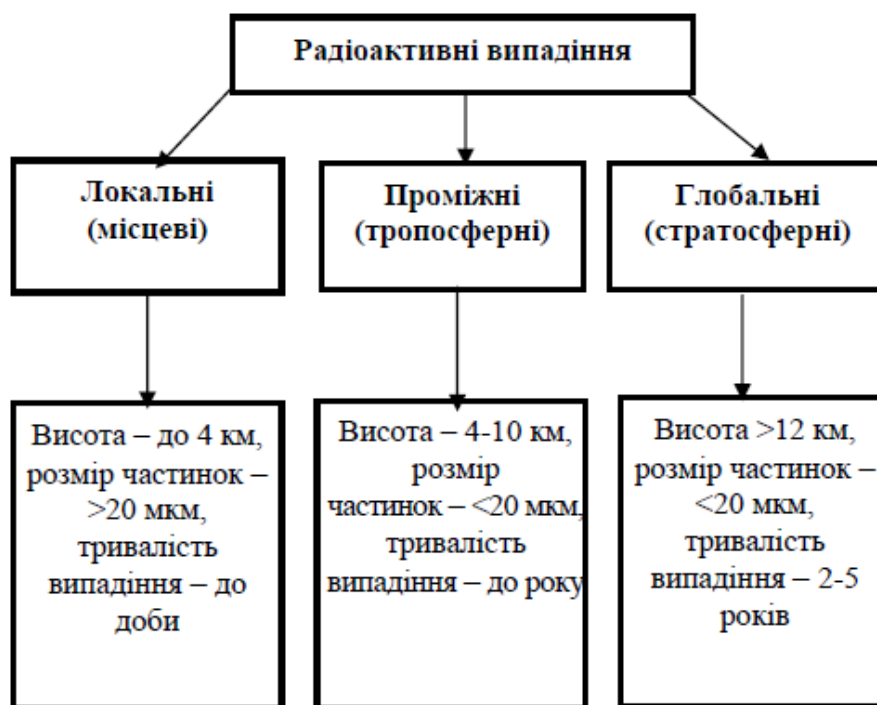


Рис. 3. Формування і параметри радіоактивних випадіннь після проведення ядерного вибуху (за Г.П. Перепелятніковим, 2012)

3. Розчинність радіонуклідів тісно пов'язана зі складом ґрунтів, на яких здійснено вибух. При вибуху:

а) на силікатних ґрунтах радіоактивні речовини вибуху представлені склоподібними оплавленими частками з досить малою розчинністю;

б) на карбонатних ґрунтах продукти вибуху представлені в основному карбонатами й оксидами лужноземельних елементів, що володіють порівняно високою розчинністю в природних середовищах.

4. Біологічна доступність радіонуклідів з оплавлених часток визначається часом їхнього утворення, складом і дисперсністю.

Розчинність радіонуклідів із дрібних часток, як правило, вище, ніж з великих. Частки, що містять радіонукліди глобальних випадіннь, вкрай малі (до 1 мкм) практично повністю розчинні у воді і біологічна рухливість радіонуклідів сумірна з рухливістю їх у водяних розчинах.

При радіаційних аваріях на атомних електростанціях відбувається викид у навколишнє середовище великої кількості радіоактивних речовин, які забруднюють середовище перебування всього живого на Землі, у тому числі й сільськогосподарські угіддя. При цьому встановлено, що основний вплив випромінювання на населення обумовлено споживанням продуктів харчування, вирощених на забруднених територіях, і в основному молока.

В загальному вигляді схему міграції радіоактивних речовин в об'єктах навколишнього середовища можна показати:

атмосфера → людина;

атмосфера → рослини → людина; атмосфера → тварини → людина;

атмосфера → водойма → людина; атмосфера → ґрунт → рослини;

атмосфера → рослини → тварини → людина;
 атмосфера → водойма → риба → людина;
 атмосфера → ґрунт → рослини → тварини → людина;
 атмосфера → водойма → рослини → тварини → людина;
 атмосфера → водойма → ґрунт → рослини → тварини → людина.

Згідно з нею радіоактивні речовини, які випадають з атмосфери на земну поверхню, концентруються на трьох головних об'єктах: ґрунті, рослинах та у водоймах. Надходять вони в рослини і з ґрунту через кореневу систему, а також з поливною водою. Рослини поїдаються тваринами і людиною, і це – основний шлях надходження радіоактивних речовин до організму ссавців. Хоча в період випадання радіоактивних опадів значна їх кількість, як згадувалося, може проникати через органи дихання, деяка – через шкіру, особливо через ушкоджені місця. Надходять радіоактивні речовини до організму тварин і людини також з питною водою. Але більша їх частка – до 60-70% надходить до організму людини з продуктами тваринництва – молоком і молочними продуктами, м'ясом, яйцями.

Пересуваються радіоактивні речовини і зворотними шляхами. Під час вітру радіоактивні частинки з поверхні ґрунту підіймаються в повітря і знов випадають на вказані об'єкти. З рослинними залишками і відходами тваринництва радіоактивні речовини повертаються в ґрунт і знову розпочинають свою міграцію. Вони змиваються дощами і талими водами з ґрунту у водойми, проникають у ґрунтові води.

ПОВІТРЯНИЙ ШЛЯХ НАДХОДЖЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ

Радіоактивні викиди і випадання можуть потрапляти в атмосферу і переміщуватися з потоками повітря. Частинки аерозолів і пилу, що містять радіонукліди, формують радіоактивну хмару і з вітром рухаються у просторі. Під час руху повітряних мас ці радіонукліди залежно від погоди, опадів, зміни вітру і турбулентного переміщення потоків повітря поступово розсіюються. Переміщення радіонуклідів внаслідок атмосферних процесів відбувається значно швидше, ніж на поверхні землі, й визначається швидкістю вітру, яка досягає 10 км/год.

Завдяки вітровому перенесенню радіонуклідів атмосферна дифузія постійно їх розмиває (диспергує) і зрештою вміст радіонуклідів у повітрі знижується до мізерно малих значень. Середня швидкість вітру – найважливіший параметр дисперсії, що визначає напрямок переміщення і кількість повітря, яке «розбавляє» радіонукліди.

Інші важливі чинники, від яких також залежить випадання радіонуклідів з атмосфери, – це опади, що вимивають радіонукліди з хмари, атмосферні умови, наприклад шторм, структура ландшафту рельєфність земної поверхні.

Із переміщенням радіоактивної хмари в атмосфері відбувається процес осадження аерозольних частинок на землю і поверхню води під дією електростатичних сил (аерозолі несуть позитивний заряд, а ґрунт і особливо

вода мають негативний заряд); гравітаційного осадження (чим більші частинки аерозолі, зокрема пилу, тим ближче від джерела викиду вони випадають); через фільтрацію аерозолів і пилу деревами, будівлями і вимиванням дощем. Період, протягом якого радіонукліди можуть перебувати в повітрі, не перевищує звичайно кількох днів.

Величина вторинної вітрової міграції радіонуклідів, що осіли на поверхню ґрунту, визначається швидкістю вітру, характером ґрунтової поверхні, дисперсністю, формою частинок, які піднімаються вітром, міцністю фіксації їх на ґрунтово-рослинному покриві. Вітрова міграція здійснюється в нижніх шарах атмосфери, тому її вплив істотний на відносно невеликих відстанях (1-2 км). В умовах Волинської області однією з причин повторного поверхневого радіоактивного забруднення є вітри з швидкістю понад 10 м/с, які у весняний період повторюються 25-30 разів, а восени – 15-20 разів.

Дуже важкі частинки не можуть переміщуватись таким чином і вони рухаються в результаті численних зіткнень з меншими частинками. Такий механізм називають *сальтацією*.

Встановлено, що з вітровою міграцією радіонуклідів можна успішно боротись за допомогою задернування, проведення структурних меліорацій, зменшення до мінімуму поверхневого обробітку ґрунту.

Залежно від впливу цих факторів виділяють локальні, тропосферні і стратосферні (глобальні) випадіння. Локальні випадіння спостерігають у районі до кількох сот кілометрів у напрямку від джерела.

Атмосферні опади. Залежно від умов виникнення всі радіоактивні речовини, які постійно перебувають в атмосфері та атмосферній воді, можна поділити на такі групи:

1. ізотопи, які виникають в атмосфері під дією космічного випромінювання;
2. гази, які надходять в атмосферу з земної поверхні;
3. ізотопи, які потрапляють в атмосферу з земної поверхні з частинками пилу;
4. речовини, які конденсуються космічним пилом;
5. ізотопи, які надходять в атмосферу внаслідок життєдіяльності людини;
6. штучні ізотопи, які потрапляють в атмосферу при ядерних випробуваннях та в результаті захоронення відходів ядерної промисловості, енергетики, транспорту.

Дослідження свідчать, що кожний вид опадів характеризується відповідними показниками радіоактивності. Сніг-крупа має середню радіоактивність у межах $2 \cdot 10^{-8}$ Кі/кг, сніг лапатий – $3,7 \cdot 10^{-8}$ Кі/кг, зливовий дощ – $1,37 \cdot 10^{-8}$ Кі/кг, обложний дощ – $3,7 \cdot 10^{-9}$ Кі/кг.

Чим більша інтенсивність опадів, тим менша їх радіоактивність: перші порції дощу чи снігу завжди більш радіоактивні, ніж наступні. Дощові краплі значно збільшують свою радіоактивність за рахунок накопичення радіоактивних речовин з повітря. Опади очищають атмосферу від радіоактивності. Наприклад, поблизу Ніагарського водоспаду радіоактивність повітря у 5 разів менша, ніж на відстані від нього.

Пил та частинки диму, захоплені снігом, іноді мають до 90% загальної радіоактивності снігових опадів.

Радіоактивність хмар та опадів має максимальне значення над континентами, зменшується у гірських районах і досягає мінімальних значень над океаном.

Радіонукліди, що випали з атмосфери на поверхню ґрунту, потрапляють із **поверхневим стоком** на відповідні водозбірні площі струмків, рік та інших водоймищ. Поверхневий стік радіонуклідів залежить від характеру ландшафту, типу і шорсткості підстилаючої поверхні, щільності рослинного покриву, пори року, характеру і кількості опадів. В умовах гірського ландшафту, при гладкому кам'яному покритті, позбавленому рослинності, і в період інтенсивних дощів об'єм поверхневого рідкого і твердого стоку радіонуклідів є максимальним. Для рівнинних ландшафтів, типових для Полісся України, об'єм поверхневого стоку радіонуклідів становить: для ^{137}Cs – близько 0,01-0,4% на рік, а для ^{90}Sr – 0,2-4%.

Велике значення для поверхневої активності стоку радіонуклідів із водозбірної площі, особливо із заплав рік, мають періоди весняних і осінніх паводків, властивих нашим рікам.

Поширення радіоізотопів у воді здійснюється під впливом чинників:

- фізико-хімічних: адсорбція, іонний обмін, осадження, седиментація, флокуляція;
- біотичних: поглинення водними організмами із води, накопичення деяких з них як у організмах, так і у ґрунті.

На поведінку радіонуклідів у річках значно впливає хімічний склад води, ступінь її мінералізації, кількість та характер суспензованих частинок. У річках, де суспензовані тверді частинки мають тенденцію до осадження в окремих місцях, більша частина радіоактивних продуктів затримується саме в таких місцях, утворюючи локальні осередки забруднення.

На орних землях, зайнятих під посівами сільськогосподарських культур, в рік з поверхневими водами виноситься в середньому 1% ^{90}Sr . Міграція радіонуклідів до рівня ґрунтових вод супроводжується винесенням їх в річкові системи.

Відносно висока міграційна активність ^{90}Sr пов'язана з його здатністю утворювати комплекси з органічною речовиною. Завдяки цьому він може знаходитись розчиненим в катіонній, аніонній і нейтральній формі, що дозволяє йому долати геохімічні бар'єри і досягти навіть глибоких ґрунтових вод.

Дуже інтенсивно перерозподіляються радіонукліди в ландшафтах, які характеризуються перезволоженням, і де можливе забруднення ґрунтових вод.

Крім поверхневого стоку потрібно враховувати *вторинне вітрове підіймання* радіонуклідів, що осіли на поверхню ґрунту. У разі високої вітрової активності на прибережних територіях можливе потраплення радіонуклідів у водяні екосистеми і в органи дихання людини внаслідок дефляції (осадження) чи вторинного вітрової підіймання, пов'язаних із пилоутворенням. Утворення пилу може бути зумовлене дією вітру, рухом транспорту, будівельними і

сільськогосподарськими роботами.

МІГРАЦІЯ РАДІОНУКЛІДІВ У ГІДРОЕКОСИСТЕМАХ

Основними шляхами надходження радіонуклідів у водні екосистеми є повітряний шлях, поверхневий стік і вторинне вітрове підймання (перенесення), що однаково стосується і морських, і прісноводних екосистем.

При осіданні радіонуклідів з атмосфери за інших однакових умов значна частина радіонуклідів потрапляє на дзеркало води. Відомо, що щільність випадань радіонуклідів на океанічну поверхню вища, ніж на наземну у 2-7 разів.

Після надходження радіонуклідів у гідроекосистеми вони одразу вступають у взаємодію з її абіотичною та біотичною складовими. Процес цієї взаємодії можна оцінити наступними наслідками:

1. активність радіонуклідів у воді швидко зменшується, паралельно зростає активність їх у біотичних і абіотичних компонентах водоймища;
2. швидкість переходу ^{137}Cs і ^{90}Sr у біологічні об'єкти значно змінюється за часом і варіює для різних видів живих організмів;
3. через деякий час після потраплення в прісноводну екосистему активність радіонуклідів у її компонентах стабілізується.

Міграція радіонуклідів у гідро екосистемах відбувається суперечливо через численність фізичних і біологічних процесів, що її обумовлюють. Одні процеси зумовлюють розсіювання радіонуклідів, інші навпаки спричиняють концентрацію їх в окремих компонентах гідроекосистеми. Так, акумуляція радіонуклідів в гідроекосистемах зумовлюється фізичними процесами – адсорбцією на поверхнях і одночасно адсорбцією через мембрани клітин із водної фази, а також при живленні гідробіонтів. Значна частина радіонуклідів надходить до фітопланктону та утримуються в ньому. Після відмирання біомаси гідроекосистем радіонукліди акумулюються в детриті.

За характером розподілу різних радіонуклідів серед компонентів водоймища усі радіонукліди поділено на чотири основних типи.

1. Гідротропи, що залишаються у воді (^{35}S , ^{51}Cr , ^{71}Ge).
2. Еквітропи, що рівномірно розподіляються серед компонентів водоймищ (^{60}Co , ^{86}Rb , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{131}I).
3. Педотропи, що переважно накопичуються в ґрунті й донних відкладеннях (^{59}Fe , ^{65}Zn , ^{90}Y , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{137}Cs).
4. Біотропи, що переважно накопичуються в гідробіонтах (^{32}P , ^{115}Cd , ^{144}Ce).

Розподіл радіонуклідів серед елементів екосистеми прісноводного водоймища описують коефіцієнтами накопичення – відношенням питомої активності радіонуклідів у системах: вода – донні відкладення, вода – гідробіонти; донні відкладення – гідробіонти тощо. Численними дослідженнями встановлено значну активність радіонуклідів у донних відкладеннях прісноводних водойм. Вона перевищує їх активність у воді у 10 разів і більше, а

в гідробіонтах – у сотні і тисячі разів.

Серед вивчених ізотопів найбільш інтенсивно накопичуються гідробіонтами ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{95}Zr , ^{90}Y , ^{144}Ce , ^{147}Pr . Коефіцієнти накопичення для цих елементів досягають десятків тисяч одиниць (на суху масу). Рівень K_n визначається не тільки фізико-хімічними властивостями радіонуклідів, а й біологічними властивостями різних гідробіонтів. Серед гідробіонтів виділяють окремі види, які є специфічними щодо накопичення тих чи інших радіонуклідів. Порівняння різних груп гідробіонтів за їхньою накопичувальною здатністю показало, що рослини мають більші K_n , ніж тварини, а одноклітинні й нитчасті водорості накопичують радіонукліди більше, ніж вищі рослини.

Серед великої кількості чинників, що впливають на K_n радіонуклідів гідробіонтами, виділяють такі: 1) концентрацію у воді ізотопних і неізотопних носіїв; 2) фізико-хімічний стан радіонуклідів у розчині й рН середовища; 3) температуру та освітленість води.

Головні джерела радіоактивності поверхневих вод – гірські породи та підземні води. Другорядним джерелом є *атмосферні опади*.

Основні процеси, які зумовлюють появу та вміст радіоактивних елементів у воді: а) розчинення сполук, які перебувають у твердому стані і містять радіоактивні ізотопи; б) виділення радіоактивних ізотопів з розчину у вигляді осадів; в) поглинання або видалення з води радіоактивних газів.

До процесів, які впливають лише на вміст радіоактивних ізотопів у воді, належать: а) випаровування та утворення льоду, що підвищують концентрації радіоактивних ізотопів у воді; б) випадіння опадів, танення льоду, конденсація парів, які зменшують радіоактивність води; в) змішування вод різної радіоактивності; г) зміна температури і тиску.

Ступінь радіоактивності річкових вод залежить від їх мінералізації, радіоактивності порід та деяких фізико-хімічних властивостей води. Річкова вода у середньому має меншу сумарну радіоактивність, ніж морська. Лише концентрація радію у водах річок наближається до його концентрації у морях. З цього правила випадають річки, які протікають у районах з підвищеною радіоактивністю порід.

Найбільший внесок у сумарну радіоактивність річкових вод належить ^{40}K , тому їх радіоактивність прямо залежить від вмісту у них калію (табл. 2).

Підвищений вміст урану спостерігається у річках, які мають водозбірну площу, складену гранітами, або ж живляться переважно підземними водами (до $2 \cdot 10^{-5}$ г/л).

Радіоактивність озерних вод тісно пов'язана з хімічним складом води приток та підземних вод, які живлять озера.

Таблиця 2

**Хімічний склад та природна радіоактивність води деяких річок
земної кулі, зумовлена K^+**

Річка	Мінералізація води, мг/л	Вміст $\text{Na}+\text{K}$, мг/л	Радіоактивність, 10^{-12} Кі/л
Амазонка	30,0	3,3	0,5
Везер	301,0	34,2	5,2

Дунай	331,0,	5,3	0,8
Ельба	188,0	13,7	2,2
Колорадо	684,9	102,7	16,4
Колумбія	112,9	9,3	1,4
Майн	196,1	5,8	0,9
Міссісіпі	210,6	13,8	12,2
Міссурі	419,8	38,0	6,1
Ніл	119,1	11,8	1,8
Парана	90,6	18,6	2,9
Рейн	281,6	5,2	0,8
Ріо-Гранде	650,9	123,5	19,7
Ріо-Негро	166,7	13,5	2,2
Св. Лаврентія	200,2	7,2	1,1
Темза	358,3	12,3	1,9
Юкон	135,2	6,0	1,0

Морське й океанічне середовище є найважливішим резервуаром для депонування радіонуклідів. У морському середовищі за радіоекологічними аспектами прийнято виділяти прибережний і відкритий океан. Прибережний океан охоплює естуарії (гирла) рік, лагуни, водний простір над континентальним шельфом (мілководдя), окраїнні моря. Відкритий океан – це велика частина океану з глибинами понад 1 км. У відкритому океані активність радіонуклідів досить рівномірно розподіляється на глибині до 300 м, а потім зменшується за експонентою до глибини 700-800 м.

До океану радіоактивні речовини потрапляють переважно внаслідок вивітрювання гірських порід, стоку з поверхневими та підземними водами радіоактивних речовин (розчинених або у завислому стані). Менша роль належить абразії берегів, вулканізму, еоловому та космічному пилу.

Природна радіоактивність морської води, зумовлена К, коливається у межах $(3-5) \cdot 10^{-10}$ Кі/л. Питома активність за рахунок ^{40}K у 100 разів перевищує питому активність, зумовлену вмістом U, Th та інших природних ізотопів, і майже у 50 разів радіоактивність, зумовлену ^{87}Rb .

Природна радіоактивність морської води, зумовлена калієм, рубідієм, ураном, радієм і торієм, на кілька порядків (3-4) менша, ніж радіоактивність континентальних порід.

У прибережній зоні радіонукліди потрапляють у донні відкладення моря, особливо в зоні розташування АЕС. Донні відкладення морів мають високу сорбційну ємність, що призводить до накопичення в них радіонуклідів. За міцністю зв'язування і сорбцією радіонукліди у донних відкладеннях (Атлантичний, Тихий, Індійський океани і Середземне море) можна розмістити в такій послідовності: $^{45}\text{Ca} < ^{90}\text{Sr} < ^{238}\text{U} < ^{137}\text{Cs} < ^{86}\text{Rb} < ^{65}\text{Zn}$.

Високий рівень мінералізації води в морі зменшує накопичення радіонуклідів у морській біоті – рослинах і тваринах, і коефіцієнти накопичення для прісноводної біоти, як правило, вищі, ніж для морської, але останні також

дуже високі (табл. 3).

Накопичувальна здатність морської і прісноводної біоти залежить також від концентрації біомаси в одиниці об'єму води. Що вищий вміст біомаси в 1 м³ води, то більша частка активності радіонуклідів може бути зосереджена в біотичній складовій водоймища чи певної ділянки моря.

Таблиця 3

Коефіцієнти накопичення радіонуклідів в основних компонентах морської екосистеми

Компонент	Коефіцієнт накопичення радіонуклідів								
	¹⁴⁴ Ce	¹³⁷ Cs	⁹⁵ Nb	²³⁹ Pu	¹⁰⁶ Ru	⁹⁰ Sr	¹³² Te	⁶⁵ Zn	⁹⁵ Zr
Донні відкладення	5000	1000	10000	10000	10000	30	–	2000	10000
Водорості	5000	100	2000	20000	2000	100	1000	2000	2000
Ракоподібні	1500	50	500	1000	500	50	100	4000	500
Моллюски	1500	50	1000	1000	2000	20	100	80000	1000
Риби	100	50	50	100	10	5	10	5000	30

Підземні води. Головним джерелом надходження радіоактивних елементів у підземні води є гірські породи. В підземних водах може бути значно більший вміст радіоактивних елементів, ніж в інших типах природних вод. Тоді такі води називають радіоактивними. Води вважаються радіоактивними, якщо концентрація радіоактивних елементів у них перевищує певну умовну межу: Rn > 185 · 10³ Бк/м³; Ra > 1 · 10⁻¹¹ г/л; U > 3 · 10⁻⁵ г/л.

Розрізняють три основні типи радіоактивних підземних вод: радонові, радієві, уранові з підвищеним вмістом відповідних радіоактивних елементів.

МІГРАЦІЯ РАДІОНУКЛІДІВ У ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ

Відомо, що ліси за своїми можливостями і властивостями у житті людей і держави відіграють та виконують різноманітні ґрунтозахисні, водорегулюючі, водоохоронні, екологічні, санітарно-гігієнічні, сировинні та інші корисні функції.

Найважливіше джерело забруднення наземних лісових екосистем – радіоактивні гази та аерозолі, що випадають з атмосфери. Великі часточки, що осідають під дією сили гравітації, потрапляють безпосередньо на підстилаючу поверхню і рослинний покрив. Осадження на рослинах дрібних часточок і газів, що переносяться вітром і повітряними потоками, зумовлене турбулентним переміщенням атмосфери і вимиванням часточок атмосферними опадами.

За умов потепління клімату та забруднення значних територій України радіонуклідами після катастрофи на Чорнобильській АЕС на перший план виходять властивості лісових екосистем по підтримці природної рівноваги біосфери та акумуляції значної кількості радіонуклідів, які мігрують по ланцюгам живлення у лісових біоценозах.

Інтенсивність турбулентної пульсації атмосфери в приземному шарі і

зумовлене нею випадання радіонуклідів значною мірою залежать від ступеня шорсткості підстилаючої поверхні. Коефіцієнт осадження радіонуклідів з атмосфери біля поверхні ґрунту внаслідок турбулентної дифузії зростає зі збільшенням пересіченості місцевості й висоти рослинного покриву.

Коефіцієнт інерційного осадження залежить від розміру часточок: важкі часточки затримуються краще, легкі обтікають перешкоду разом із повітряним потоком і незначною мірою осаджуються на поверхні рослин. За наявності множинних перешкод (крони дерев) дрібні часточки аерозолів теж осаджуються. Можна говорити про фільтрувальну здатність дерев і лісового масиву в цілому.

Здатність до затримання рослинного покриву щодо часточок, які випадають з атмосфери, і наступне змивання їх із рослин залежать від кількох чинників: 1) площі відкритої поверхні органів рослин; 2) форми, розмірів, орієнтації листя чи хвої та ступеня шорсткості їхньої поверхні; 3) швидкості вітру під час і після випадання; 4) кількості опадів під час і після випадання; 5) розмірів і агрегатного стану часточок аерозолів; 6) кількості часточок, відкладених на рослинний покрив до випадання; 7) відносної вологості повітря під час випадання.

Кількість пилу, що перехоплюється з випадань рослинним покривом, значною мірою залежить від будови листя, шорсткості його поверхні, щільності рослинного покриву і відносної вологості повітря. Якщо відносна вологість становить 90%, коефіцієнт затримування зростає в 2,5 рази порівняно із сухою погодою (ймовірність захоплення радіонуклідів вологим листям вища). Помітний вплив має і швидкість вітру. Осадження є максимальним, якщо швидкість вітру не перевищує 10 км/год. Значення для відкритого та екранованого листя відрізняються в 10 разів. За ідеальних метеорологічних умов на рослинах затримуються всі часточки розміром до 200 мкм. Проте із загальної кількості аерозольних часточок, затриманих рослинами, надалі на них закріплюється тільки певна частина, а решта змивається дощем і видувається вітром. У разі середньої швидкості вітру 10 км/год із рослин протягом кількох годин може бути вилучено близько 50% вільних часточок пилу.

Чорнобильська катастрофа призвела до значного радіоактивного забруднення лісів України. У лісових масивах, внаслідок їх структури та будови, накопичилось більше радіоактивних елементів ніж на відкритих площах. Це, в свою чергу, визначило ліси як «критичну територію» з огляду можливих радіаційних дозових навантажень при перебуванні людини у них, або при використанні продукції лісового господарства.

Ліс здатний довго й міцно утримувати радіонукліди, які потрапили до нього, запобігаючи їх виносу за межі забрудненої території. Ліс може впливати на міграцію радіонуклідів у глобальному масштабі. Проте ліс, особливо хвойний, дуже чутливий до впливу іонізуючого випромінювання.

Своєрідні властивості лісу починають виявлятися вже з перших моментів осадження радіонуклідів з атмосфери на лісовий масив. Для характеристики здатності лісу до затримування використовують такий показник, як коефіцієнт затримування:

$$K_3 = \frac{V}{A} ,$$

де A – поверхнева активність радіонуклідів, що випали на одиницю площі лісу, Бк/км² (Кі/км²);

V – поверхнева активність затриманих у кронах дерев радіонуклідів на тій самій одиниці площі лісу, Бк/км² (Кі/км²).

Із таблиці 4 видно, що лісові екосистеми забруднюються у 3-7 разів більше, ніж ландшафти відкритого типу.

Таблиця 4

Відносні коефіцієнти забруднення різних типів ландшафту порівняно з орними угіддями

Тип ландшафту	Відносний коефіцієнт забруднення
Вирубка	1
Луки	1,8
Ліс:	
листяний	3,2
сосновий	4-6
березовий	6
мішаний	7,3

Коефіцієнт затримування при осадженні на ліс атмосферної домішки радіонуклідів варіює в широкому діапазоні значень залежно від типу і віку насаджень, сезону, метеорологічних умов під час випадання і фізико-хімічних форм радіонуклідів, що осідають на ліс. Так, у зимовий період випадання радіонуклідів листяного лісу в 5 разів менше, ніж у весняно-літній період, через опадання листя.

Величезна площа поверхні крон дерев порівняно з їхнім об'ємом дає змогу ефективно сорбувати і утримувати радіонукліди, внаслідок чого ліс виконує функцію фільтра стосовно вітрових і дощових потоків, що несуть радіонукліди.

У разі горизонтального вітрового потоку на лісовий масив основна частина радіонуклідів, що містяться у ньому, фільтрується і затримується на узліссях. Таку здатність лісу називають *узлісним ефектом*.

Листяні насадження здатні утримувати 10-20% річної кількості атмосферних опадів, а отже, й радіонуклідів, крони хвойних порід – 20-30%. Значення коефіцієнта затримування залежить від тривалості та інтенсивності дощу і снігу. Інтенсивні зливові дощі зумовлюють гірше утримування радіонуклідів, ніж мжичка (мряка) – 95 %.

Крони деревних рослин здатні ефективно утримувати також сухі випадання радіонуклідів (особливо ¹³¹I) у вигляді частинок і газів. У рослин зі щільними кронами коефіцієнт затримування твердих радіоактивних частинок дорівнює ступеню зімкнутості крон (зімкнутість крон – частка площі крон па одиницю площі лісу). У цілому коефіцієнт затримування радіонуклідів у

лісових масивах коливається від 0,2 до 1,0.

Частина радіонуклідів, що залишається в кронах дерев, може проникати у внутрішні тканини рослин і залучатися до обмінних процесів. Адсорбція радіонуклідів (таких, як ^{32}P , ^{40}K , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{106}Rh , ^{137}Cs і ^{134}Cs) після поверхневого забруднення – основний механізм їх надходження у тканини деревних рослин. Такі радіонукліди, як ^{32}P , ^{40}K і ^{137}Cs , здатні вільно переміщуватися в рослинах і відкладатися в різних органах. Рухливість інших радіонуклідів відносно незначна.

Незалежно від ступеня рухливості радіонуклідів у початковий період після викиду переважає їх рух зверху донизу, із крон під полог лісу. Завдяки цьому основна частина радіонуклідів через певний час зосереджується в лісовій підстилці. Час такої вертикальної міграції, за який 95% радіонуклідів переходять під полог лісу, становить 1 рік для листяних лісів, що опадають, і 3 роки для хвойних, де хвоя замінюється повільно.

За результатами досліджень, значна частина радіонуклідів зосереджується в листі й корі дерев. Деревина вважається практично чистою. Активність ^{137}Cs у деревині не перевищує кількох відсотків загальної активності радіонуклідів у дереві.

Спочатку після випадання радіонуклідів у лісі переважає перенесення їх зверху донизу, а потім відбувається перехід ґрунт – корені – стовбур – крона. З часом настає динамічна рівновага між цими процесами. Далі спостерігається повільне підвищення вмісту радіонуклідів у біомасі дерева і промисловій деревині.

Особливе місце в екосистемі лісу посідають гриби. Так, якщо в перший період після випадання чи аварії радіонуклідне забруднення грибів є тільки поверхневим і незначним, то через кілька років, коли починаються процеси переробки і засвоєння лісової підстилки, радіонуклідне забруднення грибів стає істотним і згодом зростає. Ця обставина потребує спеціального моніторингу і контролю радіонуклідного забруднення грибів у лісі.

Після потрапляння у лісову підстилку радіонукліди залучаються до основних екологічних процесів. Цей процес можна описати у вигляді такої блок-схеми: лісова підстилка – біота лісової підстилки (гриби та інші рослини) – ґрунти – корені – стовбури – кора – листя. Цей цикл може тривати довго.

Накопичення радіонуклідів в певному виді рослин залежить від факторів, які доцільно об'єднати у дві групи за відношенням до рослинного організму: внутрішні (притаманні конкретному виду) та зовнішні (екосистемні).

Групи внутрішніх факторів складають біологічні особливості видів:

- систематичне положення виду;
- життєва форма рослини;
- потреба у K^+ , Ca^{2+} та інших катіонах;
- глибина розміщення кореневої системи у ґрунті;
- екологічна амплітуда виду.

Різні види рослин неоднаково накопичують радіонукліди. Причиною цього є відмінності у розміщенні кореневих систем у ґрунті, особливо зони всмоктування, різна ступінь дотикання коренів з найбільш забрудненим шаром

грунту. Чим глибше розміщена коренева система виду, тим менше надходження ^{137}Cs до його фітомаси з ґрунту.

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

Особливість некореневого шляху надходження полягає в тому, що при безпосередньому осіданні радіоактивних частинок з різних шарів атмосфери відбувається забруднення надземної маси рослин усіма радіонуклідами, що випадають.

На інтенсивність надходження радіонуклідів до рослин також істотно впливають такі параметри їх корневих систем, як горизонтальна протяжність, ступінь заповнення коренями ґрунтових горизонтів, хімізм корневих виділень. Радіонукліди схожі за хімічною будовою з біогенними елементами, активніше накопичуються у рослинах (^{137}Cs є аналогом калію).

Інтенсивність накопичення радіонуклідів змінюється в онтогенезі рослин. Максимальний темп поглинання і накопичення мінеральних елементів припадає на ранній період життя рослин. В наступні періоди розвитку різко активізуються процеси біосинтезу, в результаті чого концентрація радіонуклідів у біомасі рослин трохи зменшується.

Як відомо ґрунт є початковою ланкою чисельних трофічних ланцюжків живлення у лісових екосистемах. Слід нагадати, що ще у дочорнобильський період у чисельних наукових працях наголошувалось, що несприятливі умови (ґрунти легкого гранулометричного складу, висока їх кислотність та перезволоження) обумовлюють високу міграційну здатність ^{137}Cs та ^{90}Sr у лісових екосистемах.

Тип ґрунту істотно впливає на інтенсивність надходження радіонуклідів до рослин кореневим шляхом. Особливо чітко це проявляється у рослин з широким екологічним ареалом. Загальною закономірністю для цих рослин є значно більше накопичення радіонуклідів на дерново-підзолистих ґрунтах порівняно з сірими лісовими та опідзоленими чорноземами. Для типу умов місцезростання величина накопичення ^{137}Cs рослинами із ґрунту буде більшою при меншій родючості та більшій вологості ґрунту.

Інтенсивність міграції ^{137}Cs у ґрунтах лісових насаджень обумовлюється в основному вмістом в них гумусу, вологи та кислотністю. До факторів, що впливають на міграційну здатність радіоцезію у ґрунтах відносять також їх фізико-хімічні властивості і, в першу чергу, їх гранулометричний склад (особливо кількість глинистих та мулистих фракцій) та насиченість основами ґрунтового поглинального комплексу, вмісту у ґрунтах катіонів-аналогів ^{137}Cs (калію, натрію) та іонів-антагоністів, зокрема азоту.

Установлена загальна закономірність в ряді ґрунтів Полісся стосовно того, що максимальна інтенсивність міграції радіонуклідів і їх накопичення у рослинному покриві характерні для ґрунтів з високою вологістю, підвищеною кислотністю, низьким вмістом гумусу, фракцій фізичної глини та вмісту калію.

При вивченні вертикального розподілу валового запасу ^{137}Cs у ґрунтах в різних трофотропах при однаковій вологості, а саме: вологих борах (ґрунт – дерново-середньпідзолистий, піщаний), вологих суборах (ґрунт – дерново-

середньопідзолистий, супіщаний), вологих сугрудах (грунт дерново-слабопідзолистий, легкосуглинистий) було встановлено, що основна активність ^{137}Cs в цих ґрунтах закумуляована у лісовій підстилці (30% у ґрунті борів, 45% ґрунті суборів та 25% у ґрунті сугрудків).

Із глибиною спостерігається зменшення активності ^{137}Cs як в ґрунтах борів, суборів так і сугрудків.

Міграція радіонуклідів по профілю ґрунтів протікає повільно і з часом призводить до:

- зниження потужності дози випромінювання над поверхнею ґрунту;
- зменшення інтенсивності видування і вимивання радіонуклідів поверхневими водами;
- зміни величин надходження у рослини радіонуклідів в результаті перерозподілу їх відносно корневих систем;
- забруднення ґрунтових вод.

Переміщення радіонуклідів по профілю ґрунтів може бути наслідком:

- механічного переносу часток ґрунту, на яких сорбовані радіонукліди;
- переміщення вільних іонів чи їх комплексів з органічними речовинами в результаті дифузії.

Велика роль дифузії у вертикальному переміщенні радіонуклідів у болотних (застійних) ґрунтах, з малою швидкістю фільтрації, сильно гумусних ґрунтах. На таких ґрунтах переміщення проходить інтенсивніше. Близько 20% загально вмісту ^{137}Cs на зволжених землях проникло на глибину до 10-20 см.

Рухливість кожного радіонукліду обумовлена поглинальною здатністю ґрунту та розчинністю радіонуклідів у воді. Більш кисле середовище сприяє розчинності іонів у тому числі і радіонуклідів, більш лужне – їх осадженню і адсорбції. Так, ^{137}Cs більш рухливий як одновалентний катіон. Найменша рухливість радіонуклідів у чорноземах. Найбільш сприяють рухливості радіонуклідів дерново-підзолисті та сірі лісові ґрунти, в яких мало перегною і глинистих часток та більш висока кислотність.

Вплив інших параметрів ґрунту на накопичення ^{137}Cs в узагальненому вигляді можна сформулювати так: інтенсивність надходження радіонукліда із ґрунту до фітомаси тим більша, чим менший в ньому вміст дрібнодисперсних фракцій – мулистої та глинистої; менше значення рН (більша кислотність); менший вміст обмінних форм K^+ , як іона антагоніста ^{137}Cs ; менший ступінь насиченості основами ґрунтового поглинаючого комплексу.

Отже, у всіх типах ґрунтів із глибиною відбувається зменшення вмісту радіоцезію, який більш інтенсивно мігрує вглиб ґрунтів у бідних трофотропах в порівнянні із більш багатими.

У вологих умовах спостерігається підвищена вертикальна міграція ^{137}Cs у ґрунтах в порівнянні з більш сухими, тоді як в одному типі умов місцезростання у ґрунтах хвойних насаджень вертикальна міграція радіоцезію відбувається більш повільно, ніж у ґрунтах листяних насаджень.

Було встановлено, що найпоширенішим радіоактивним елементом-забруднювачем територій лісових екосистем є ^{137}Cs . Найбільша кількість максимально забруднених радіонуклідами площ лісів (без урахування 30-ти

кілометрової зони) знаходяться на території Житомирської і Рівненської областей. Найбільше лісів, які зазнали радіоактивного забруднення ґрунтів ізотопом цезію понад $15 \text{ Ki}/\text{km}^2$ було виявлено в об'єднанні Житомирліс 16,4 тис. га та Київліс – 5,5 тис. га. Одночасно при проведенні широкомасштабних радіологічних обстежень лісів України була виявлена мозаїчність їх радіоактивного забруднення.

Отже, ліси України характеризуються різними рівнями радіоактивного забруднення та наявністю істотної мозаїчності забруднення лісових екосистем ^{137}Cs на рівні кварталів, виділів, лісництв, держлігоспів і областей.

МІГРАЦІЯ ^{137}Cs В ОСНОВНІ ЛІСОУТВОРЮЮЧІ ПОРОДИ

За даними досліджень встановлено, що найвища щільність радіоактивного забруднення лісових масивів виявлена на узліссях з навітряної сторони, а в глибині лісових насаджень спостерігається зниження величини ^{137}Cs майже на порядок. З підвітряної сторони зафіксована протилежна картина, лісові насадження забруднені ^{137}Cs в 1,5 рази більше в порівнянні з прилеглими територіями. Така неоднорідність радіоактивного забруднення лісових і аграрних екосистем обумовлюється дією фактора бар'єру з лісових насаджень.

Відомо, що радіоактивне забруднення деревини обумовлюється надходженням радіонуклідів через кореневу систему, діаметр якої в 2-5 разів перевищує діаметр крони і досягає від 10 до 20 м, то на процес їх проникнення насамперед впливає величина радіоактивного забруднення верхніх шарів ґрунту в зоні розміщення коренів дерева.

Дослідженнями динаміки питомої активності ^{137}Cs в тканинах і органах сосни звичайної при різкій щільності радіоактивного забруднення ґрунту впродовж 1991-1995 рр. (ТУМ-В3) було встановлено, що підвищений вміст ^{137}Cs спостерігається у фізіологічно активних тканинах та органах сосни (таких як апікальна меристема, хвоя, однорічні пагони, луб).

Коефіцієнт накопичення ^{137}Cs (відношення вмісту радіоцезію в органах і рослині до його вмісту в ґрунті) в однорічній хвої та пагонах складає від 2,0 до 4,4 разів, корі внутрішній – 5,5 разів, корі зовнішній – 15 разів, а деревині лише 1,2 рази.

Одночасно було встановлено, що при збільшенні щільності забруднення ґрунту ^{137}Cs підвищується і радіоактивність всіх досліджуваних тканинах та органів дерев сосни звичайної. Надходження ^{137}Cs до листяних порід має свої особливості.

Експериментальні дані вказують на наявність видової відмінності в накопиченні цими породами радіоцезію. Найбільша концентрація ^{137}Cs виявлена у сосни, дещо менша – у берези і найменша – у дуба і осики, яка у порядку зменшення утворює наступний ряд: сосна – береза – вільха – дуб – осика.

Установлено, що найбільші значення коефіцієнтів переходу в асиміляційних органах були встановлені для сосни (24,5-63,5), дещо менші – у берези (5,0-25,0), дуба (0,9-4,3), осики (2,0-58).

Невеликі значення коефіцієнта переходу були виявлені для деревини досліджуваних порід: сосни (1,9-3,4), берези (1,3-2,7), осики (0,4-1,0), дуба (0,1-0,6), які ранжуються в наступний ряд: сосна – береза – осика – дуб.

На ці особливості слід звертати увагу при регламентації використання продукції лісового господарства в умовах їх радіоактивного забруднення.

На надходження ^{137}Cs до деревних порід впливає також вік насаджень. Так, за даними досліджень у 1995 р., питома активність загальної кори на висоті 1,3 м у віці 10 років становила – 2040, у віці 11-20 років – 2544, а у віці 21-40 років – 3630 Бк/кг. Одночасно було виявлено, що вміст радіонуклідів в корі зростає від комля до вершини стовбура, що притаманно всім віковим категоріям.

МІГРАЦІЯ РАДІОНУКЛІДІВ У НЕДЕРЕВНУ ПРОДУКЦІЮ

Всі види побічного користування мають практично прямий вихід на отримання харчової продукції лісу, що централізовано заготовлюється лісогосподарськими підприємствами або місцевим населенням для власних потреб. Внесок таких харчових продуктів лісу як гриби та дикорослі ягоди в сумарну дозу внутрішнього опромінення сільського населення Українського Полісся, за оцінками спеціалістів, сягає 35-50%.

Загальними закономірностями радіоактивного забруднення всіх видів продукції, отримуваної при побічному користуванні лісом, є:

- збільшення вмісту радіонуклідів у продукції при підвищенні щільності забруднення ґрунту радіонуклідами;
- видоспецифічність вмісту радіонуклідів у різних видах рослин (сировини) в межах кожної з господарських груп видів (ягідних, лікарських, грибах тощо);
- зростання інтенсивності накопичення радіонуклідів при підвищенні вологості ґрунту та меншій його родючості;
- значне варіювання вмісту радіонуклідів в одному виді сировини (продукції) в тому самому місці відбору в різні роки, що пов'язане із впливом погодних умов різних вегетаційних періодів.

Більше накопичення радіонуклідів у продукції характерне для вологих, дощових періодів.

Гриби є важливою складовою побічної продукції лісу. В зв'язку з особливостями біології їх плодові тіла акумулюють значні кількості ^{137}Cs , що робить цей харчовий продукт лісу критичним з радіоекологічної точки зору.

Радіоактивне забруднення грибів має певні особливості:

- питома активність радіонуклідів у всіх видах грибів залежить від щільності радіоактивного забруднення ґрунту. Гранично допустимі щільності забруднення ґрунту радіонуклідом, за яких можлива заготівля продукції, становить $2,5 \text{ Кі/км}^2$, хоча в різних типах лісорослинних умов ця величина значно варіює;

- інтенсивність накопичення ^{137}Cs плодовими тілами грибів залежить від виду гриба. В *борах* за інтенсивністю накопичення ^{137}Cs у плодових тілах види грибів утворюють такий ряд:

польський гриб > сиріжки > підберезники > зелениці > білі гриби > лисички;

у *суборах*:

польські гриби > підберезники > сиріжки > білі гриби > підосичники > лисички;

у *сугрудках*:

підберезники > сиріжки > білі гриби > лисички;

- інтенсивність накопичення ^{137}Cs плодовими тілами їстівних грибів в умовах сугрудків у 3-8 разів менша, ніж у борах, у 10-13 разів ніж у суборах та у 24-30 разів ніж у грудках;

- накопичення даного радіонукліда плодовими тілами таких промислово цінних грибів як білі та лисички значно менше, ніж інших видів, і також залежить від трофності ґрунту. Заготівля цієї продукції дозволяється в лісах за щільності радіоактивного забруднення ґрунту до 3 Кі/км²;

- враховуючи, що при висушуванні грибів їх маса зменшується у 8-20 разів, а існуючі санітарні нормативи для сухих грибів лише в 5 разів вищі, ніж для свіжих, у районах з підвищеним рівнем радіоактивного забруднення слід відмовитися від заготівлі грибів з подальшим їх висушуванням.

В організаційному плані перед заготівлею слід практикувати контрольне збирання грибів з визначенням вмісту в них радіонуклідів. Всі партії грибів, заготовлених централізовано лісогосподарськими підприємствами, повинні обов'язково проходити радіаційний контроль перед реалізацією.

Радіоактивне забруднення дикорослих ягід. Найінтенсивніше накопичують радіонукліди основні ягідні види Українського Полісся, що належать до родини брусничних: чорниця, брусниця, буяхи, журавлина болотна; менш інтенсивно – інші ягідні види: малина звичайна, суниця лісові, горобина звичайна, калина звичайна.

Оскільки існує тісна залежність між вмістом ^{137}Cs у ягодах певного виду зі щільністю забруднення ґрунту цим радіонуклідом, за відповідними коефіцієнтами переходу можна розрахувати гранично допустиму щільність забруднення ґрунту радіонуклідом, при якій його вміст не буде перевищувати допустимих рівнів.

Інтенсивність накопичення ^{137}Cs у свіжих ягодах різних видів істотно вища за бідних і вологих умов порівняно з багатшими і сухішими. Заготівля свіжих ягід більшості видів лімітується питомою активністю ^{137}Cs , однак ягід чорниць у сугрудках, горобини звичайної та калини звичайної обмежується граничною зоною ведення лісового господарства (15 Кі/км²). Ягоди чорниць у свіжих та вологих суборах можна заготовляти при щільності забруднення ґрунту ^{137}Cs до 2 Кі/км², а в свіжих та вологих сугрудках – до 10 Кі/км²; ягоди брусниць у свіжих борах та свіжих суборах – до 1 Кі/км²; ягоди буяхів у сирих борах та сирих суборах – до 1 Кі/км², а у вологих борах та суборах – до 2 Кі/км².

Згідно Закону України «Про правовий статус і соціальний захист

громадян, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи» – «Продукція, вироблена у зонах безумовного (обов'язкового) відселення, гарантованого добровільного відселення, посиленого радіоекологічного контролю, повинна мати сертифікат, що вказує місце її виробництва, вміст радіонуклідів, відповідального виробника цієї продукції і контролера, який перевіряє її на вміст радіонуклідів».

РАДІОАКТИВНЕ ЗАБРУДНЕННЯ РОСЛИН

Радіонукліди можуть надходити до рослин трьома шляхами: кореневим або ґрунтовим шляхом (за рахунок кореневого всмоктування), аеральним або некореневим шляхом (через надземні частини – листя, стебла, суцвіття, плоди при осадженні на них радіоактивних опадів) і через засвоєння з дернини, яке характерне для радіоактивного забруднення рослин лук.

Повітряним шляхом рослини (листя, стебла, суцвіття, плоди) забруднюються коли з атмосфери радіонукліди осаджуються у вигляді твердих радіоактивних часток, у вигляді рідких осадів (оксидів розчинених у воді) та у вигляді суспензій (суміші твердих та рідких осадів).

Здатність рослин утримувати радіонукліди, що випадають, характеризуються коефіцієнтом первинного затримання (КПЗ), який визначається як частка радіоактивних речовин, затриманою рослинами від кількості тих, що випали на одиницю площі у відсотках за формулою:

$$КПЗ = P_y \times 100 / P_u,$$

де P_y – кількість радіонуклідів затриманої біомасою рослин на одиниці площі після припинення випадінь радіоактивних речовин, Бк/м²;

P_u – кількість радіонуклідів, який випав на одиницю забрудненої площі, Бк/м²;

100 – коефіцієнт для переведення величини у відсотки.

Величини первинного затримання залежать від наступних факторів: величини проективного покриття ґрунту листям, форми, розміру та орієнтації листових пластинок, стану поверхні листків, швидкості вітру, дисперсності опадів, вологості повітря і рослин, кількості опадів, фази росту і розвитку рослин.

Чим більша величина проективного покриття площі ґрунту листям рослин, то більша частка радіоактивних випадінь буде затримуватись біомасою.

Найвищу здатність до затримання радіоактивних аеральних випадінь має широке і горизонтально розташоване листя рослин. Краще затримує радіоактивні випадіння жорстке і опушене листя рослин.

Коефіцієнт первинного утримання $K_{пу}$ може змінюватися в дуже широких межах – від кількох до 95%.

Так, $K_{пу}$ 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 і органи однієї і тієї ж рослини. Так, для ярої пшениці первинне утримання складає: для листя – 41%, для стебел – 18%, для полови – 11%, для зерна – 0,6%.

Вміст радіонуклідів в одиниці маси зерна залежить від строків їх випадання. Найбільша концентрація радіонуклідів у зерні спостерігається при їх випаданні в період цвітіння і молочної стиглості, більш низька – при випаданні їх 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 відтікання 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 і коренеплоди столового і цукрового буряку 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 небезпечно. 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 наземних 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 піврозпаду, цей радіонуклід може проникати з кормом тварин у молоко, а через молоко – в організм людини.

Надходження радіонуклідів до врожаю рослин при некореновому (аеральному) забрудненні є коефіцієнт пропорційності або коефіцієнт переходу (КП), який визначають за формулою:

$$\text{КП} = \text{Ср}/\text{Сг},$$

де Ср – питома активність повітряно-сухої маси рослин, Бк/кг;

Сг – питома активність повітряно-сухої маси ґрунту, кБк/м².

Надходження радіонуклідів у рослини залежно від їхніх фізико-хімічних властивостей. Кореневе поглинання радіонуклідів з ґрунту відбувається за рахунок неметаболического поглинання (адсорбція, іонний обмін), метаболического поглинання (проникнення радіонуклідів у живу клітину кореня крізь мембрану), яке характеризується яскраво-вираженою вибірковістю іонів, що поглинаються (активно або пасивно).

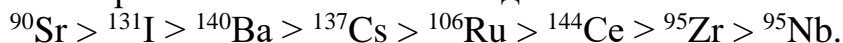
^{137}Cs є хімічним аналогом калію, а ^{90}Sr – кальцію, тому спостерігається певна подібність поглинання рослинами і пересування по них К, Са і їх хімічних аналогів Cs і Sr.

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

При просуванні радіонуклідів 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 з цієї закономірності складає цезій, відносний вміст якого в насінні може досягати 10% і вище загальної кількості його в надземній частині.

Загалом накопичення радіонуклідів 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 радіонуклідів і знижується вміст на одиницю маси сухої речовини.

При збільшенні врожаю, як правило, зменшується вміст радіонуклідів на одиницю маси. Інші радіонукліди надходять у рослини в невеликій кількості через значну сорбцію в ґрунтах. За здатністю засвоюватися рослинами радіонукліди можна розмістити в такій послідовності:



Особливо слабо накопичуються в рослинах трансуранові елементи.

Надходження радіонуклідів у рослини з різних типів ґрунтів. Забруднення продукції рослинництва (ступінь засвоєння) радіоактивних речовин 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 лісних ґрунтах і сіроземах і найнижчі – на чорноземах. Аналогічна залежність установлена і для цезію.

Велика різноманітність ґрунтів у нашій країні визначає значну різницю в поведінці радіонуклідів у ґрунтах і накопиченні їх у рослинах. Тому концентрація радіонуклідів 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 і накопиченням радіонуклідів у рослинній продукції.

Надходження радіонуклідів у рослини залежно від їхніх біологічних особливостей. Розмір накопичення радіонуклідів 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 радіонуклідів – у зернових злаках.

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

Діапазон накопичення ^{137}Cs в насінні сільськогосподарських культур різний. Так, у насінні квасолі цезію на одиницю маси міститься в 3-5 разів менше, ніж у насінні гороху і вівса. Видова відмінність у накопичуванні цезію

окремими сортами пшениці, вівса, квасолі і гороху на одиницю маси зерна може досягати 10, а сортова складає 1,5-2 рази.

Значно відрізняються вмістом радіонуклідів озимі і ярові зернові культури. Озимі (пшениця, жито), як правило, накопичують у 2-2,5 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. ^{90}Sr найбільше накопичується в коренеплодах буряку, 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 в бульбах картоплі, ніж у коренеплодах буряку і моркви, пояснюється, очевидно, тим, що коренеплід – це видозмінений корінь, через який радіонуклідів надходять з ґрунту в рослину; бульба ж картоплі – видозмінене стебло, і радіонуклідів 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.

МІГРАЦІЯ РАДІОНУКЛІДІВ У ЛУЧНИХ ЕКОСИСТЕМАХ

Основна частина луків зосереджена в заплавах малих і середніх річок і поділяється на материкові і заплавні. Встановлено, що міграція радіонуклідів у лучних біоценозах принципово відрізняється від такої в агроценозах та на орних землях. Ці відмінності пов'язані насамперед з наявністю лучної дернини і більшим розмаїттям біоценозів луків (складом травостою).

На міграцію радіонуклідів у ґрунті природних луків впливають насамперед тип ґрунту, наявність дернини, тривалість використання луків без обробки ґрунту, періодичні перезволоження та затоплення луків. Міграція радіонуклідів у профілі ґрунту вологих перезвожених луків відбувається в основному шляхом їх конвективного переносу (направленого току води) у профіль ґрунту. Цей процес особливо інтенсивно протікає під час затоплення луків у період повеней і паводків. При цьому одночасно посилюється процес дифузійного перенесення радіонуклідів. Установлено, що підвищення вологості ґрунту луків сприяє підвищенню коефіцієнта дифузії радіонуклідів у десятки разів.

За умов механічного обробітку ґрунту при корінному покращенню луків (оранка, внесення вапна, добрив, висів травосумішей) відбувається перерозподіл радіонуклідів у шарі до 30 см внаслідок їх перемішувань. Основна частка ^{137}Cs і ^{90}Sr зосереджується в одному шарі і лише через два-три роки після оранки може мігрувати (від 1 до 20%) у підорний шар.

Слід зазначити, що надходження радіонуклідів у рослини луків суттєво відрізняється також від періоду радіоактивного забруднення територій. Так, у

період інтенсивних аеральних випадів радіонуклідів до їх припинення відбувається надходження радіонуклідів до рослин позакореневим способом.

У наступний період, період стабілізації, радіонукліди надходять до рослин луків переважно із дернини. За інтенсивністю надходження радіонуклідів із дернини перевищує ґрунтове у десятки разів. У подальшому забруднення травостою луків буде обумовлюватися багатьма чинниками, а саме: щільністю забруднення територій, доступністю радіонуклідів у випадіннях, наявністю забрудненої радіонуклідами дернини, гідрологічним і водним режимом луки, типом ґрунту, біологічними особливостями рослин луків. Так, накопичення ^{137}Cs і ^{90}Sr у лучних рослинах прямопропорційне вмісту радіонуклідів у ґрунті (щільності забруднення ґрунтів). Біологічну доступність радіонуклідів визначають форми їх випадів.

Радіоактивні часточки затримуються переважно в міжвузлях, пазухах листя, між волосками й у смолистих вузлах поверхні листків. Тому рослини з добре розчленованим, шорстким, липким, опушеним волосками (наприклад, повстяна вишня) і смолистим листям мають більшу затримувальну здатність, ніж рослини з гладким листям.

Потрапляючи на трав'яну рослинність, радіонукліди впродовж вегетації переходять на поверхню ґрунту і залучаються до ґрунтового колообігу речовин.

Відразу після потрапляння на поверхню ґрунту радіонукліди містяться в його шарі завтовшки 1-2 см, а потім під впливом опадів починається фільтрація і дифузія радіонуклідів за профілем ґрунту.

Значну роль у процесах вертикальної міграції радіонуклідів у ґрунті відіграють біогенні чинники – транспортування кореневими системи, мікрофлора ґрунту і діяльність землерийних тварин. Перерозподіл радіонуклідів у ґрунті відбувається дуже повільно. Через 4-8 років після аварії 90% радіонуклідів містяться в шарі ґрунту 5 см завтовшки. Для ^{90}Sr характерний швидший процес міграції, ніж для ^{137}Cs .

Особливо швидко процеси вертикальної міграції радіонуклідів спостерігаються в легких супіщаних типах ґрунту зони Чорнобильської аварії (Полісся України).

Типи ґрунтів найбільш суттєво впливають на надходження до травостою ^{137}Cs , накопичення якого варіює в межах більше двох порядків величин. Коефіцієнти переходу ^{137}Cs у рослини осушеної торф'яної луки можуть змінюватися у залежності від їх видового складу у 15-23 рази. Заслуговує на увагу той факт, що надходження радіонуклідів у травостій луків змінюється впродовж років, що минули з моменту їх забруднення радіоактивними аеральними випадіннями, так і впродовж одного вегетаційного періоду.

Ґрунт як компонент біогеоценозу, з одного боку, сорбує і міцно утримує більшість радіонуклідів, знижуючи їх доступність для кореневих систем, а з другого – закріплення радіонуклідів ґрунтом призводить до тривалого затримання їх у верхньому коренезаселеному шарі й перешкоджає винесенню радіонуклідів за межі кореневої зони.

Ґрунт утримує радіонукліди шляхом йонного обміну, адсорбції і хімічного осадження. ^{137}Cs і ^{90}Sr сорбуються за типом йонного обміну. Велика

група радіонуклідів (^{60}Co , ^{90}Y , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{106}Ru) сорбується і міцно утримується твердою фазою ґрунту. Для деяких радіонуклідів важливу роль у сорбуванні відіграє органічна речовина ґрунту. Швидкість вертикальної і горизонтальної міграції радіонуклідів залежить від механічних і фізико-хімічних властивостей ґрунту (ємність поглинання, склад обмінних катіонів-носіїв, структура і рН ґрунту, мінеральний склад і ступінь обводнення луки).

У трав'янисті рослини луків радіонукліди потрапляють кореневим і позакореневим шляхом. Позакореневий шлях пов'язаний із початковим періодом випадання, коли рослини сорбують і утримують близько 25 радіонуклідів. Згодом вони переходять у ґрунт і беруть участь у кореновому надходженні, в якому основну роль відіграють радіонукліди ^{137}Cs і ^{90}Sr .

Діапазон варіювання коефіцієнта переходу ґрунт – трав'янисті лучні рослини дуже значний і залежить, насамперед, від типу ґрунту. Він максимальний для легких супіщаних ґрунтів і мінімальний для важких суглинистих і чорноземів. Для торф'яних ґрунтів характерні високі значення коефіцієнтів переходу радіонуклідів у лучні трави.

Кореневий перехід ^{90}Sr у лучні трави набагато (до 10 разів) перевищує перехід ^{137}Cs . Чим вищий ступінь обводнення луків, тим вище значення Кп. Перехід радіонуклідів у рослини луків збільшується при зменшенні вмісту глинистих і мулистих фракцій і мінералів та підвищеннях їх вологості. У відповідності до цієї закономірності встановлений спадаючий ряд накопичення ^{137}Cs у травостій луки, який має вид: болотні – заплавні (тривало заплавні) – середньозаплавні – коротко заплавні – низинні – суходольні.

Вплив радіонуклідів на рослини. у рослин, як і в тварин, після впливу іонізуючого випромінювання розвивається радіаційний синдром. При рівномірному опроміненні рослини, коли будь-яка її частина одержує однакову дозу радіації, її пошкодження зумовлене радіаційним ушкодженням найбільш радіочутливих тканин. Такі радіочутливі тканини, ушкодження яких призводить до формування радіаційного синдрому у рослин, називаються *критичними*. Критичними органами у рослин є всі меристеми: апікальні, латеральні, інтеркалярні. Оскільки всі органи рослини формуються з меристем, то при їх опроміненні спостерігається ушкодження майже всіх органів як вегетативних, так і генеративних.

Прямою причиною пошкодження вегетуючої рослини є втрата меристематичними клітинами, як найбільш радіочутливою тканиною організму, здатності до поділу.

Різні органи рослин по-різному реагують на опромінення: найчутливіші серед них генеративні, потім всі органи, що на момент опромінення складаються із меристем, які активно діляться.

При цьому на рівні органів цілої рослини виявляються зміни архітекτονіки: змінюється морфологія трахей і трахеїд; у коренів посилюється розгалуження, порушується утворення корневих волосків. Може змінитись порядок розміщення листків, філотаксис, можуть виникнути фасціації, пухлинні утворення. Іноді змінюється тип галуження. Змінюється форма листка, порядок жилкування; стимулюється утворення калюсу, що призводить

до розвитку місцевих розростань (пухлин) або до появи бруньок (часто цілими групами) в незвичних місцях. На місці таких розростань нерідко утворюються корінці. Іноді радіація вповільнює ріст, прискорює процеси цвітіння у рослин.

РАДІОЧУТЛИВІСТЬ ОРГАНІЗМІВ

Дози опромінення, що спричиняють загибель різних організмів, різняться на кілька порядків. Іншими словами, кожному біологічному виду властива своя міра чутливості до іонізуючого випромінювання, своя радіочутливість.

Рівень радіочутливості значно різниться в межах одного виду – індивідуальна радіочутливість. Крім того, навіть в одному організмі окремі клітини і тканини значно різняться за радіочутливістю.

Для характеристики радіочутливості застосовують різноманітні радіобіологічні ефекти, що виявляються при різних рівнях опромінення. Але частіше за все використовують рівні доз, при яких після опромінення гине певна частина організмів. Звичайно, це доза, при якій гине і, відповідно, виживає половина організмів. Це відбувається внаслідок різної індивідуальної радіочутливості окремих організмів одного виду, її називають *напівлетальною* дозою і вона позначається як LD_{50} . Іноді використовують летальну дозу, при якій гинуть всі організми, – LD_{100} . Вона, як правило, в 1,7-2,3 рази вище за LD_{50} .

Радіочутливість рослин. Рослини різних систематичних груп досить суттєво відрізняються за своєю радіочутливістю. Найвищу радіочутливість серед рослин і, мабуть, взагалі серед усіх живих організмів, має лілія. Напівлетальна доза для рослин лілії становить 0,5-1 Гр (табл. 5). Стійкість насіння лілії до радіації в 10-20 разів вища.

До рекордсменів за чутливістю до іонізуючих випромінювань належать хвойні рослини і насамперед сосна та ялина, для яких напівлетальні дози становлять відповідно 1-3 і 3-5 Гр. Саме через це під час аварії на Чорнобильській АЕС в зоні станції загинув хвойний ліс площею близько 500 га.

Серед сільськогосподарських рослин найбільшу радіочутливість мають деякі представники родини бобових. Досить чутливі до іонізуючої радіації злаки. А от роди більшості овочевих культур мають порівняно високу радіостійкість, тобто низьку радіочутливість.

Максимальну радіостійкість серед вищих рослин мають представники родини капустяних (капуста, редька, редис, бруква, ріпак, гірчиця та інші). Так, напівлетальна доза для вегетуючих рослин редису становить 50 Гр, а для насіння аж 2000 Гр, тобто в 50-200 разів вищі за напівлетальні дози для найбільш радіочутливих родів.

Таблиця 5

Порівняльна радіочутливість живих організмів (Гродзинський Д.М., 2001)

Вищі рослини	LD_{50} , Гр	Ссавці	LD_{50} , Гр	Деякі інші організми	LD_{50} , Гр
Лілія	0,5-1	Морська свинка	1,5-3	Риби	5-20

Сосна	1-3	Вівця	1,5-4	Кури	6-15
Ялина	3-5	Корова	1,5-5,5	Качки	10-16
Боби	3-5	Коза	2-5,5	Амфібії	10-30
Яблуня	4-6	Осел	2-5,5	Черепахи	15-20
Горох	5-9	Верблюд	2,5	Молюски	20-200
Квасоля	10-13	Людина	2,5-4	Комахи	50-300
Ячмінь	13-17	Мавпи	2,5-5,5	Змії	80-200
Пшениця	13-18	Свиня	2,5-6	Членистоногі	100-1000
Кукурудза	18-22	Кінь	2,5-6	Дріжджі	200-300
Буряки	25-30	Собака	3,5-4	Мохи	200-500
Конюшина	25-30	Миші	4,5-7	Найпростіші	200-3000
Капуста	25-40	Кішка	5-7	Бактерії	200-4000
Ріпак	25-50	Кролик	8-10	Ціанобактерії	500-4000
Редис	50	Монгольська піщанка	10-13	Віруси	3000-8000

Надзвичайно високу радіостійкість мають нижчі рослини – гриби, водорості, лишайники. Чемпіон серед них, як і серед усіх видів рослин – ціанобактерії. Напівлетальні дози для деяких з видів їх досягають 4000 Гр, тобто 4 кГр. В цьому відношенні вони поступаються лише вірусам – найелементарнішій і найпростішій неклітинній формі живих організмів.

Радіочутливість тварин. З відомостей про радіочутливість тварин важливими для людини є, насамперед, дані про представників класу хребетних – ссавців, до якого вона сама належить. В таблиці 5 наведено дані про радіочутливість деяких видів ссавців. Як бачимо, для більшості з них значення напівлегальних доз варіюють теж у широких межах. До найбільш радіочутливих родів відносять морських свинок і овець, мінімальні значення ЛД₅₀ для яких становлять лише 1,5 Гр. До найбільш радіостійких з домашніх тварин – кролів, ЛД₅₀ для яких досягає 8-10 Гр. Радіочутливість молодих тварин вища, ніж дорослих. Вивчення наслідків Чорнобильської катастрофи показало, що остання закономірність стосується і людини: діти більш чутливі до іонізуючої радіації, ніж дорослі.

Рекордсменом щодо радіостійкості серед ссавців є невеликий гризун з підродини хом'якових, що живе в Прибайкаллі, монгольська піщанка. Для неї напівлетальна доза досягає 13, а летальна – 18 Гр.

Серед хребетних тварин більшу радіостійкість, ніж ссавці, мають птахи. Напівлетальні дози для більшості їх видів, у тому числі і для домашньої птиці – курей, гусей, качок, індиків складають 6-25 Гр. Для риб трохи менше – 5-20 Гр. Для амфібій – земноводних: жаб, тритонів, саламандр – складають 10-30 Гр. Широко варіюють напівлетальні дози для плазунів: для найбільш радіочутливих представників цього класу – черепах – 15-20, а для найбільш радіостійких змій – 80-200 Гр.

Набагато вищу радіостійкість виявляють безхребетні тварини. Для більшості видів комах напівлетальна доза становить 50-300, а летальна – 100-500 Гр.

Для молюсків напівлетальні дози варіюють від 20 до 200 Гр, для членистоногих – від 100 до 1000 Гр, для найпростіших (амеб, інфузорій, джгутикових) – від 200 до 3000 Гр.

Радіочутливість бактерій і вірусів. Довгий час вважалось, що найнижчу радіочутливість серед живих організмів на Землі мають бактерії роду мікрококкус, виявлені в каналі одного атомного реактора, де потужність дози опромінення становила понад 1 мільйон Гр на добу. У цих умовах бактерія не тільки виживала, а й розмножувалась. Напівлетальна доза гострого γ -опромінення для неї становить 3-3,5 кГр. У зв'язку з такою високою радіостійкістю ця бактерія дістала назву *Mikrococcus radiodurens* – мікрококкус радіостійкий.

Але серед бактерій є представники, для яких напівлетальні дози набагато нижчі. Однією з найбільш радіочутливих бактерій є кишкова паличка. Для неї ЛД₅₀ становить лише 200 Гр. Для більшості ж бактерій напівлетальні дози знаходяться в діапазоні 300-2000 Гр. Спори бактерій ще стійкіші до опромінення іонізуючою радіацією.

Найбільша радіостійкість серед живих організмів на нашій планеті у вірусів – для них ЛД₅₀ коливається від 3 до 8 кГр, а ЛД₁₀₀ – летальна доза досягає 20 кГр. У стані спокою їх радіостійкість набагато вища.

НАДХОДЖЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ В ОРГАНІЗМ

Шляхи надходження радіонуклідів в організм:

- 1) через легені при вдиханні забрудненого повітря;
- 2) через травний тракт із кормом і водою, що містять радіоактивні речовини;
- 3) через неушкоджену шкіру, слизові оболонки й рани.

Характер розподілу радіонуклідів в організмі залежить від основних хімічних властивостей елемента, форми сполуки, що вводиться, шляхи надходження й фізіологічного стану організму. Ступінь проникнення й затримка в легенях залежать від заряду часток і їхніх розмірів.

Радіонукліди, що надійшли в організм, разом з кров'ю розподіляються по органах і тканинах, де частково затримуються, вибірково концентруючись в окремих органах. Але більшість їх з часом виводиться з організму.

Частка радіонуклідів, що включаються в обмін, неоднакова. Як правило, вони затримуються в тих тканинах і органах, у складі яких є стабільні елементи з аналогічними хімічними властивостями. Так, стронцій, який є хімічним аналогом кальцію, з якого переважно формується скелет, в основному нагромаджується у кістках. Саме в кістках і концентрується основна маса стронцію.

Калій, роль якого в організмі дуже багатогранна, але в основному зводиться до забезпечення функціонування м'язів, більш-менш рівномірно

розподіляється по організму. Так само поводить себе в організмі його хімічний аналог цезій і його радіоактивні ізотопи, що утворюються при ядерних реакціях – ^{134}Cs і ^{137}Cs та інші, які дифузно розходяться по всіх тканинах.

Таким чином, довгоживучі радіонукліди ^{90}Sr і ^{137}Cs потрапляють до організму тварини і людини, до речі, і рослини помилково. Як елементи живлення вони їм не потрібні.

Для деяких радіоактивних елементів властивий дуже високий ступінь нагромадження в окремих органах. Так, до 30% радіоактивного ^{131}I нагромаджується у щитоподібній залозі, яка складає лише 0,2-0,5% маси тіла, що є наслідком специфіки фізіологічної цього органу, котрий для нормального функціонування потребує звичайний нерадіоактивний ^{127}I . Разом з цим нерадіоактивним йодом він «помилково» накопичує і радіоактивний, який за своїми хімічними властивостями не відрізняється від нього. Особливо активно процес накопичення радіоактивного йоду відбувається в умовах йодної нестачі, характерної для багатьох регіонів, зокрема Полісся. Саме здатність деяких радіоактивних елементів вибірково нагромаджуватись у значних концентраціях в окремих тканинах і органах являє собою головну небезпеку при їх попаданні в організм.

Якщо при зовнішньому опроміненні всі тканини опромінюються рівномірно, то при внутрішньому відбувається формування високих місцевих або локальних доз.

Ступінь радіаційного впливу радіоактивних речовин, які попадають всередину організму, або, як їх називають, *інкорпорованих радіонуклідів*, на окремі органи і в цілому на організм залежить від терміну їх перебування в організмі. Деякі з них, що приєднуються до процесів активного обміну речовин, можуть протягом короткого часу виводитись з організму з продуктами метаболізму. Так, тритій (^3H) – продукт викидів атомних станцій навіть при нормальній їх роботі, який бере участь у водному обміні, протягом кількох тижнів повністю виводиться з організму ссавців разом з водою. В той же час ^{90}Sr , який бере участь в процесі формування кісткової тканини може перебувати в організмі людини протягом усього її життя.

Для характеристики часу перебування в організмі окремих радіоактивних речовин існує поняття так званого *періоду напіввиведення* радіоактивного елемента з організму. Це той час, протягом якого кількість нагромадженої в організмі радіоактивної речовини зменшується вдвічі внаслідок звичайних процесів біологічного виділення – роботи кишечника, нирок, шкіри (табл. 6).

Таблиця 6

**Періоди напіввиведення і напіврозпаду деяких радіонуклідів
з організму людини**

Ізотоп	Період напіввиведення	Період напіврозпаду
Тритій (^3H)	8-16 діб	12,3 років
Вуглець (^{14}C)	7-13 діб	5500 років
Фосфор (^{32}P)	1-3 роки	14,3 діб
Сірка (^{35}S)	140 діб	87,5 діб

Калій (^{40}K)	58 діб	1,3 млрд. років
Кальцій (^{45}Ca)	20 років	163 доби
Стронцій (^{90}Sr)	25-70 років	29 років
Йод (^{131}I)	80-200 діб	8 діб
Цезій (^{137}Cs)	30-90 діб	30 років
Полоній (^{210}Po)	50-80 діб	138 діб
Радон (^{222}Rn)	1-7 год	3,84 діб
Рацій (^{226}Ra)	17 років	1600 років
Торій (^{232}Th)	68 років	14 млрд. років
Уран (^{235}U)	200-450 діб	700 млн. років
Уран (^{238}U)	200-450 діб	4,5 млрд. років
Плутоній (^{239}Pu)	150-300 років	24 тис. років

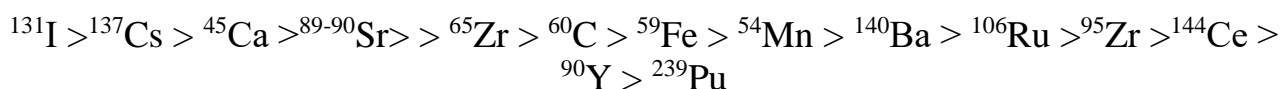
Тривалість періоду напіввиведення залежить від специфіки обміну речовин кожного виду організмів, кожної окремої людини, а саме: від характеру раціону, від віку. Так, період напіввиведення ізотопів ^3H і ^{14}C складає всього 7-16 діб; ^{137}Cs коливається від 30 діб у дітей, для зростаючого організму котрих властивий активний обмін речовин, до 90 діб у дорослих людей; ^{90}Sr , котрий включається у кістки і виводиться дуже повільно – від 25 до 70 років; ^{239}Pu – до 300 років тобто практично цей радіоактивний ізоотп з організму не виводиться.

Кількість радіоактивних речовин в організмі зменшується не тільки внаслідок виведення, а й за рахунок радіоактивного розпаду. На відміну від періоду напіввиведення, ця величина не залежить від будь-яких факторів.

МЕТАБОЛІЗМ РАДІОНУКЛІДІВ В ОРГАНІЗМІ

Особливості усмоктування радіонуклідів в організмі у шлунково-кишковому тракті. Всмоктування підрозділяється на активне й пасивне. Найбільш важливе місце активного усмоктування – шлунково-кишковий тракт, а при повітряному шляху надходження – легені.

1) Швидкість резорбції радіонуклідів у тварин з однокамерним шлунком вище, ніж у жуйних, що мають багатокамерний шлунок. По швидкості усмоктування в шлунково-кишковому тракті радіонукліди розташовуються в ряд:



Галогени, лужні й лужноземельні елементи всмоктуються в максимальних кількостях (від 5 до 100%), а важкі й рідкоземельні елементи (у результаті утворення в кишечнику слабо розчинних з'єднань із фосфатами й жирними кислотами) всмоктуються дуже слабо (від 0,001 до 2,3%).

Трансуранові й рідкоземельні елементи в кишечнику утворюють важкорозчинні сполуки, тому ступінь всмоктування їх дуже низька.

2) Найбільше інтенсивно радіонукліди всмоктуються у дванадцятипалій, тонкій і повздожній кишках, у шлунку.

3) Радіоактивні ізотопи, що всмокталися в кров, беруть участь в обміні речовин організму точно так само, як стабільні ізотопи даного елемента.

4) Чим більша маса тварин, тим повільніше всмоктуються радіонукліди, так як, у теплокровних тварин з меншою масою інтенсивніше протікає обмін речовин для компенсації втрати теплоти внаслідок збільшення відносної поверхні тіла.

5) У тварин на вирості усмоктування радіонуклідів протікає більш активно, ніж у дорослих.

6) Всмоктування радіонуклідів залежить від кількості речовин, що надійшли. Чим більше їх надходить в організм, тим менша процентна кількість всмоктується.

7) Всмоктування залежить від агрегатного стану радіонукліда, що поступає в організм тварини.

Розподіл радіонуклідів в організмі. Поводження радіонуклідів, що всмокталися в кров, визначається:

- біогенною значимістю для організму стабільних ізотопів даних елементів, тропністю їх до певних тканин і органів;

- фізико-хімічними властивостями радіонуклідів – положенням елементів у періодичній системі Д.І. Менделєєва, валентністю радіоізоотопу й розчинністю хімічної сполуки, здатністю утворювати колоїдні сполуки в крові й тканинах і інших факторах.

Елементи першої основної групи (Li, Na, K, Rb, Cs) повністю всмоктуються з кишечнику, порівняно рівномірно розподіляються по органах і виділяються переважно із сечею. Елементи другої основної групи (Ca, Sr, Ba, Pu) добре всмоктуються з кишечнику, вибірково відкладаються в кістяку, виділяються в трохи більших кількостях з калом.

Елементи третьої основної і четвертої побічної груп, у тому числі легкі лантаноїди, актиноїди й трансуранові елементи, практично не всмоктуються з кишечнику, відкладаються в печінці й у меншій мірі в кістяку, виділяються переважно з калом.

Елементи п'ятої і шостої основних груп періодичної системи, за винятком Po, порівняно добре всмоктуються з кишечнику й виводяться майже винятково із сечею протягом першої доби, завдяки чому в органах виявляються в порівняно невеликих кількостях.

Типи розподілу радіонуклідів в організмі ссавців всіх видів у принципі однакові, і вони мало міняються з віком тварин.

Нерівномірність розподілу:

1) у вагітних самок радіоактивні ізотопи проходять через плаценту й відкладаються в тканинах плода;

2) у молодих тварин – більш інтенсивне усмоктування й депонування радіонуклідів у тканинах, нерівномірність розподілу по окремих частинах (ділянках) органа;

3) при запальних процесах. У вогнищах запалення звичайно відзначається підвищене, іноді в десятки разів, відкладення їх.

Орган, у якому відбувається вибіркова концентрація радіонукліда й внаслідок чого він піддається найбільшому опроміненню й ушкодженню, називають *критичним*.

Для йоду – щитоподібна залоза, для стронцію, кальцію й радію – кістки. Для всіх радіонуклідів критичними органами будуть кровотворна система й статеві залози. Ці органи виділені як критичні тому, що вони є найбільш уразливими, навіть при малих дозах радіації в них відбуваються істотні зміни (табл. 7).

Таблиця 7

Радіочутливість органів і тканин людини Доза опромінення, Зв (×100 бер)

Органи, тканини	Доза опромінення
Яєчники	5-20
Кристалік	5-20
Сім'яники	5-30
Зрілі мол. залози	5
Кістковий мозок	5-80
Рост. хрящ	5-30
Рост. кістка	5-20
Нирки	5
Легені	5-40
Печінка	5-40
Лімфатичні вузли	5-40
Серце	5-90
Шлунок	5-30
Кишківник	5-40
Товстий кишківник	5-20
Щитоподібна залоза	5-150

На процеси всмоктування і депонування радіонуклідів впливають багато факторів: вік, вид та фізіологічний стан тварин, наявність у раціоні клітковини, хімічних аналогів радіонуклідів, речовин, які мають властивості утворювати з радіонуклідами важкорозчинні сполуки або речовини, що прискорюють їх всмоктування (ферменти, вітаміни, гормони).

Молочна дієта, підвищена потреба організму в білках та мінеральних речовинах під час інтенсивного росту, вагітності, лактації значно підвищують коефіцієнт всмоктування і накопичення радіонуклідів. Цю закономірність треба враховувати для оцінки радіаційної безпеки внутрішнього опромінення молодих організмів, яка майже у 10 разів перевищує рівень радіаційної безпеки для дорослих.

Інтенсивність і величина всмоктування радіонуклідів у шлунково-кишковому каналі залежить від хімічної форми сполуки, до складу якої він входить. Добре всмоктуються радіонукліди, що знаходяться у вигляді іонів. Майже не всмоктуються радіонукліди, що входять до складу оплавлених силікатних часток.

Швидкість надходження радіонуклідів в шлунково-кишковий канал, органи і тканини значно перевищує швидкість виведення їх з організму тварин. Тому при постійному довготривалому надходженні радіонуклідів відбувається їх накопичення в організмі. Кратність накопичення з часом може досягати сталої величини, що свідчить про рівновагу в обміні елемента, тобто коли кількість в організм ізотопу, який надійшов, дорівнює кількості виведеного з організму даного радіонукліду.

Час, протягом якого організм втрачає половину радіоактивного елемента, має назву *ефективний період напіввиведення*. Втрати організмом радіонуклідів відбуваються як за рахунок їх біологічного виведення у процесі обміну речовин, так і за рахунок їх фізичного розпаду.

Радіонукліди цезію виводяться з організму переважно в процесах обміну, тобто біологічним шляхом, концентрація радіоіоду в організмі зменшується за рахунок фізичного розпаду ізотопу, а радіостронцію – за допомогою обох названих шляхів.

Основні параметри метаболізму радіонуклідів у різних видів сільськогосподарських тварин, а саме: коефіцієнти всмоктування, накопичення, ефективний період напіввиведення, коефіцієнти переходу в молоко та м'ясо змінюються в широких межах. Це пов'язано з біологічними і фізіологічними особливостями організму, спрямованістю та інтенсивністю обмінних процесів, в тому числі і обміну радіоактивних речовин, що впливає на радіоактивне забруднення продукції тваринництва і на токсичну дію радіонуклідів на організм тварин.

НАГРОМАДЖЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ В ОРГАНАХ І ТКАНИНАХ

Нагромадження радіонуклідів в органах і тканинах пов'язане з фізико-хімічними властивостями ізотопів. Для оцінки швидкості нагромадження використовують поняття *кратність нагромадження*, під яким розуміють відношення отриманої активності радіонуклідів в органах і тканинах до їхнього щодобового надходження в організм.

Кратність нагромадження в різних видів організмів кожного з радіонуклідів різна. З віком організму кратність нагромадження радіонуклідів знижується. Темпи всмоктування й депонування ізотопів у тканинах прямопропорційні.

Кратність нагромадження F визначають за формулою:

$$F=Cm/g,$$

де C – питома активність радіонуклідів в органах і тканинах, Бк/кг; m – маса органа або тканини, кг; g – активність радіонукліда, яка щодоби надходить в організм, Бк.

Радіонукліди з високою кратністю нагромадження найнебезпечніші (ізотопи йоду, стронцію й цезію).

По ступеню зростання нагромадження стронцію в кістяку тварини розташовуються в наступному порядку:

велика рогата худоба < кози < вівці < свині < кури;

по ступеню нагромадження в м'язах і паренхіматозних органах:

кози < велика рогата худоба < вівці < кури.

Цезій (^{137}Cs) теж найбільш інтенсивно відкладається в курей і в меншому ступені в органах овець і великої рогатої худоби.

При тривалому надходженні в організм – швидкість їхнього нагромадження змінюється. Спочатку воно відбувається інтенсивно, а потім, у міру насичення тканин, поступово сповільнюється, і нарешті настає рівновага між знову вступаючими радіонуклідами та виведеними.

Якщо організм стане одержувати більшу кількість радіонуклідів, то вони знову почнуть накопичуватися до встановлення нової рівноваги, але вже на більш високому рівні. Навпаки, якщо тварини стануть приймати з кормом меншу кількість радіонуклідів, то вони почнуть виводитися з організму. Це явище має найважливіше практичне значення для одержання придатної в їжу продукції на забруднених територіях.

ВИДАЛЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ З ОРГАНІЗМУ

Радіонукліди беруть участь в обміні речовин за принципом, який аналогічний тому, як це відбувається для їхніх стабільних ізотопів: вони виводяться з організму через ті ж самі видільні системи, що і їхні стабільні носії. Виділення радіонуклідів:

1) через шлунково-кишковий тракт і нирки,

2) через легені й шкіру,

3) із плодом і молоком (у вагітних і лактуючих тварин).

Швидкість виведення радіонуклідів залежить від:

- швидкості обміну речовин. Найбільш швидко виводяться радіонукліди, депоновані в ті тканини, де швидкість обміну речовин висока.

- стану радіонуклідів у тканинах, тобто чи перебувають вони у вільному стані або пов'язані із тканевими структурами. Вільні радіонукліди швидше виводяться з організму – це ^{131}I , ^{106}Ru , ^{132}Te , ^{137}Cs . Пов'язані із тканинним білком і радіонукліди, що перебувають у колоїдному стані, виводяться повільніше – ^{140}La , ^{142}Pr , ^{144}Ce , ^{147}Pm .

- тропності радіонуклідів до тканин і органів. Остеотропні радіонукліди виводяться з організму повільніше, тому що в кістковій тканині набагато нижче, ніж у м'яких тканинах, обмін речовин. Крім того, вони здатні

включатися безпосередньо в кісткову тканину, заміщаючи там кальцій (^{90}Sr , ^{90}Y , ^{140}Ba і ін.).

- виду хімічної сполуки, шляху й тривалості надходження радіонуклідів в організм фізико-хімічних властивостей радіонукліда – основний фактор, що визначає шляхи виведення радіонуклідів з організму;

- тривалості надходження радіонукліда (однократне або хронічне). Оскільки різні тканини організму по-різному зв'язують той самий радіонуклід, то й швидкість виведення із цих тканин буде різна.

Час, протягом якого вихідна кількість радіонукліда зменшиться вдвічі, називають ефективним *періодом напіввиведення* (Т_{еф}).

Зниження концентрації радіоізоотопів відбувається за рахунок двох основних факторів: фізичного їхнього розпаду й дійсного виведення. Значення ефективного періоду напіввиведення обчислюють за формулою:

$$\text{Т}_{\text{еф}} = \text{Т}_{\text{фіз}} \cdot \text{Т}_{\text{біол}} / (\text{Т}_{\text{фіз}} + \text{Т}_{\text{біол}}),$$

де Т_{фіз} – період напіврозпаду радіонукліда; Т_{біол} – період його біологічного напіввиведення.

Ефективний період напіввиведення довгоживучих ізоотопів визначається в основному біологічним періодом напіввиведення, короткоживучих – періодом напіврозпаду.

- вид, вік, функціональний стан організму.

ОСОБЛИВОСТІ МЕТАБОЛІЗМУ І ТОКСИЧНА ДІЯ НА ОРГАНІЗМ РАДІОНУКЛІДІВ ЙОДУ, ЦЕЗІЮ ТА СТРОНЦІЮ

Ізотоп йоду ^{131}I – змішаний β - і γ -випромінювач з періодом напіврозпаду 8,6 доби. Це один із багатьох радіоактивних ізоотопів йоду, який представляє найбільшу небезпеку внутрішнього опромінення населення та тварин у перші 90 діб після ядерного вибуху або радіаційної аварії. Надходить у навколишнє середовище у вигляді аерозолів (75%) і парів (25%). Вихід ^{131}I при ядерних вибухах досягає 19%, а при зруйнуванні реактора – від 20 до 80% загальної радіоактивності викиду.

^{131}I надходить в організм ссавців через органи травлення, дихання, шкіру. Практичне значення мають аліментарний та інгаляційний шляхи надходження. Крізь шкіру може всмоктатись 1-2% йоду від резорбованого інгаляційним шляхом.

Щитоподібна залоза є критичним органом для радіойоду. В ній на одиницю маси накопичується в 10000 разів більше йоду, ніж у нормально функціонуючій крові.

В м'ясо тварин переходить дуже мало йоду – менше 0,001%. Радіоактивний йод добре накопичується у яйцях курей. В жовток яйця переходить до 16%, у білок та шкаралупу відповідно 1% та 0,1% йоду раціону.

У період «йодної небезпеки» – 1-3 місяці після забруднення навколишнього середовища, основним джерелом його надходження в організм

людини, особливо дітей, є молоко. Тому допустимий рівень вмісту ^{131}I в молоці не повинен перевищувати для дітей – 370 Бк/л, для дорослих – 3700 Бк/л. Допустимий рівень надходження ^{131}I в добовий раціон корів при виробництві молока, придатного для дитячого харчування – 3700 Бк/л. При надходженні такої кількості радіонукліду поглинута доза щитоподібної залози може становити 0,12 Гр.

Межа річного надходження ^{131}I в організм дорослої людини 30000 Бк, для дітей – у 10 разів менша.

Небезпека опромінення щитоподібної залози людини у дозах десятки сантигрей поєднується з бластомогенними ефектами. Статистичне значиме збільшення кількості пухлин залози відмічається при дозі опромінення 0,5 Гр і зростає із збільшенням дози опромінення. Латентний період може досягати у дорослих 25-40 років, у дітей він коротший – близько 10 років.

Цезій (^{137}Cs) відноситься до довгоживучих продуктів поділу ядра важких елементів у ядерних реакторах або при ядерних вибухах. Це один із багатьох радіоактивних ізотопів цезію, який має практичне значення. Період напіврозпаду ^{137}Cs складає 30 років. Він змішаний β - та γ -випромінювач. Вихід ^{137}Cs у продуктах ядерного поділу досягає 6% від сумарної активності. У радіоактивних викидах чорнобильського реактора частка радіоцезію сягала 30% від усієї активності.

При будь-якому шляху надходження в організм ізотопи цезію добре резорбуються. Найбільш активно процеси всмоктування цезію відбуваються у тонкому відділі кишківника.

Шляхи надходження не впливають на характер розподілу радіоцезію. До 52% ізотопу затримується у м'язах (переважно у серцевому), 28% – в інших органах і тканинах, а 30% – виводиться з організму.

До настання рівноваги між надходженням та виведенням цезію з організму відбувається його накопичення в організмі і концентрація радіонукліду в органах і тканинах в декілька разів більша, ніж у раціоні. Так, кратність накопичення ^{137}Cs в м'язах кролів становить 8-21, биків – 23, овець – 17, свиней – 58, собак – 30, курей – 400. В організмі людини накопичується у 90-140 разів більше ^{137}Cs , ніж надходить кожен день з їжею.

На перехід ^{137}Cs в молоко корів впливає вміст у раціоні клітковини, її збільшення в раціоні вдвічі зменшує перехід радіоцезію в молоко.

Відсоток переходу радіоцезію в м'ясо тварин досить високий. В середньому в 1 кг яловичини переходить 4% ^{137}Cs раціону, у конину – 8-9%, у свинину та баранину – 15%, в курятину – 450%. У курей з білком та жовтком яйця виводиться 3,5% цезію раціону. В білку міститься у 2-3 рази більше ^{137}Cs , ніж у жовтку, а в шкаралупі лише 1-2% загальної кількості цезію яйця.

Молоко і м'ясо – основне джерело надходження радіоцезію в організм людини. Тому, згідно ДР-2006, допустимі рівні ^{137}Cs в молоці та молочних продуктах не повинні перевищувати 100 Бк/л, у м'ясі та м'ясних продуктах – до 200 Бк/кг, у одному яйці – 6 Бк, а у продуктах дитячого харчування – 40 Бк/кг.

Стронцій (^{90}Sr). При поділі ядер важких елементів (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu) в атомних реакторах і при ядерних вибухах утворюється 11 радіоактивних

ізоотопів стронцію, серед яких найбільшу біологічну небезпеку представляє ^{90}Sr . ^{90}Sr – чистий β -випромінювач. Період напіврозпаду – 29,12 років. Вихід ^{90}Sr в продуктах поділу ^{235}U складає близько 3,5% до загальної активності, у продуктах поділу ізоотопів Чорнобильського походження його було 4,5%.

^{90}Sr надходить в організм через шлунково-кишковий канал, легені та шкіру. Рівні всмоктування з шлунково-кишкового каналу коливаються від 5 до 60% (в середньому – 30%, із легень – 35%, крізь шкіру – 0,3%).

Величина всмоктування ^{90}Sr із шлунково-кишкового каналу зменшується із збільшенням віку організму, з підвищенням вмісту кальцію і фосфору в раціоні. Доступність стронцію збільшується при вагітності, введенні в організм вітаміну Д, при молочній дієті, при рахіті та остеопорозі, при ультрафіолетовому опроміненні тварин. У самців вона вища, ніж у самок.

В крові стронцій знаходиться в катіонній формі або лабільно зв'язаний з білками сироватки крові. Будучи аналогом кальцію, він вибірково накопичується у скелеті (від 20 до 66%) і менш 1% затримується у м'яких тканинах. Радіоактивність скелету по ^{90}Sr у 100-150 разів перевищує радіоактивність інших тканин. Стронцій легко проходить плацентарний бар'єр і в період формування скелету він активно включається у кістки плоду (до 50-70%), в т.ч. 1-2% із скелету матері.

^{90}Sr в скелеті розподіляється нерівномірно. Більш висока концентрація радіонукліду відмічається у хребцях. У губчастій частині кістки він відкладається у більшій кількості, ніж у компактній її частині. Підвищене депонування ^{90}Sr відбувається в зонах активного росту та перебудови кістки, в епіфізах і діафізах довгих кісток, поблизу гаверсових каналів, у місцях перелому (пошкодження).

По здатності накопичувати ^{90}Sr тварини утворюють ряд: собаки>кури й вівці>кози>свині>велика рогата худоба.

Виведення ^{90}Sr з організму відбувається переважно через шлунково-кишковий канал (65-90%), нирки (до 8%), молочну залозу (до 6%).

Ефективний період напіввиведення для 70% стронцію із скелету складає 10-15 років. Концентрація ^{90}Sr в кістках постійно зростає, збільшуючи і радіаційний вплив як на клітини кісткової тканини, так і на кістковий мозок.

В значних кількостях (40-60%) ^{90}Sr переходить з раціону в куряче яйце. Причому 96,5% ^{90}Sr знаходиться у шкаралупі яйця, а 3,5% – в складі білка та жовтка. В 1 кг м'яса птиці переходить до 4% ^{90}Sr з корму.

В 1 кг свинини переходить 0,3% ^{90}Sr з корму. Таким чином критичними продуктами по вмісту в них ^{90}Sr є яйця курячі, м'ясо птиці, баранина та молоко кіз.

Допустимі рівні вмісту, ^{90}Sr , згідно з ДУ-2006, в молоці і молочних продуктах – 20 Бк/кг; в м'ясі і м'ясних продуктах – 20 Бк/кг; в продуктах дитячого харчування – 5 Бк/кг.

Межа річного надходження ^{90}Sr в організм дорослої людини повинна бути майже у 40 разів менша, ніж для ^{137}Cs . Токсичність ^{90}Sr зумовлена дією на організм β -часток самого елемента та його дочірнього продукту – ^{90}Y (ітрію).

Особливістю дії стронцію на організм тварин є те, що цей остеотропний

радіонуклід постійно опромінює кістковий мозок і кісткову тканину. Тому у променевих ураженнях організму ^{90}Sr провідне місце займають зміни у кровоутворюючому кістковому мозку.

Зміни з боку шлунково-кишкового каналу, нервової, серцево-судинної системи та інших органів нагадують зміни при інтоксикації ^{137}Cs і при зовнішньому γ -опроміненні. Порушуються усі види обміну речовин, зменшується функція залоз внутрішньої секреції.

В подальшому розвиваються склеротичні процеси у судинах (потовщення стінок судин, звуження їх просвіту), дистрофія міокарду.

Віддалені наслідки впливу ^{90}Sr – розвиток остеосарком і лейкозів.

В початковий період впливу ^{90}Sr (поглинута доза у скелеті 0,05-0,15 Гр) збільшується активність ендокринних залоз. Підвищення з часом тканинної дози в скелеті до 0,5-1,0 Гр пригнічує процеси сперматогенезу у самців і змінює функціональний склад статевих гормонів у самок. У тварин виникають порушення функції печінки, підшлункової залози, нирок, лейкопенія, анемія, знижується активність нейроендокринної системи та імунна реактивність організму, у 3-5 разів збільшується частота виникнення доброякісних та злоякісних пухлин, скорочується тривалість життя.

Тривала дія на організм тварин малих доз ^{90}Sr не вивчена. Не достатньо вивчена також токсична дія радіонукліду ^{90}Sr на організм людини.

БІОЛОГІЧНА ДІЯ ІОНІЗУЮЧОЇ РАДІАЦІЇ

Як при зовнішньому опроміненні, коли іонізуюча радіація діє на живий організм ззовні, так і при внутрішньому, коли організм або окремі його органи опромінюються радіоактивними речовинами, що надійшли всередину, спостерігаються певні різноманітні зміни у функціональному стані і навіть будові організму (рис. 4). Ці зміни одержали назву радіобіологічних ефектів.

Радіобіологічний ефект – це реакція живого організму на дію іонізуючої радіації, що характеризується зміною деяких його ознак та властивостей. Виділяють два класи радіобіологічних ефектів – *соматичні* і *генетичні*.

Соматичними радіобіологічними ефектами є зміни, що відбуваються в організмі протягом його онтогенезу – періоду індивідуального розвитку від моменту зародження до закінчення життя; *генетичними* – зміни, що передаються нащадкам, тобто проявляються в наступних поколіннях.

Серед соматичних ефектів виділяють такі *п'ять основних типів*: радіаційна стимуляція, морфологічні зміни, променева хвороба, прискорення старіння і скорочення тривалості життя та загибель. Генетичні або мутагенні ефекти утворюють окремий тип.

1. Радіаційна стимуляція – це прискорення росту та розвитку організму при дії на нього іонізуючої радіації в дозах, в десятки й сотні разів нижчих за ті, що спричиняють гальмування цих процесів.

Для будь-якого живого організму в стані спокою чи активного метаболізму – насіння, проростків, вегетуючих рослин, комах, мікроорганізмів,

та інших можна підібрати дозу будь-якого виду іонізуючої радіації, при якій спостерігається ефект радіаційної стимуляції у тій чи іншій формі – прискоренні процесів обміну і синтезу окремих речовин, поділу клітин, росту окремих органів і організму в цілому, фаз розвитку та інших.

Так, при опроміненні яєць курей до інкубації або під час інкубації в дозах 0,01-0,05 Гр помітно підвищується виводимість курчат, прискорюється на 10-12 днів початок періоду яйцекладки, збільшується несучість птиці в цілому. Опромінення курчат в дозі 0,15 Гр сприяє підвищенню їх живучості, прискорює процеси росту й розвитку. При опроміненні ікри риби спостерігається прискорення розвитку ембріонів, а при опроміненні мальків – активізація росту й розвитку риби. Підсилюються ці процеси і при опроміненні поросят. Є дані про те, що опромінення лабораторних щурів та мишей в дозах 0,1-0,4 Гр підвищує їх плідність.

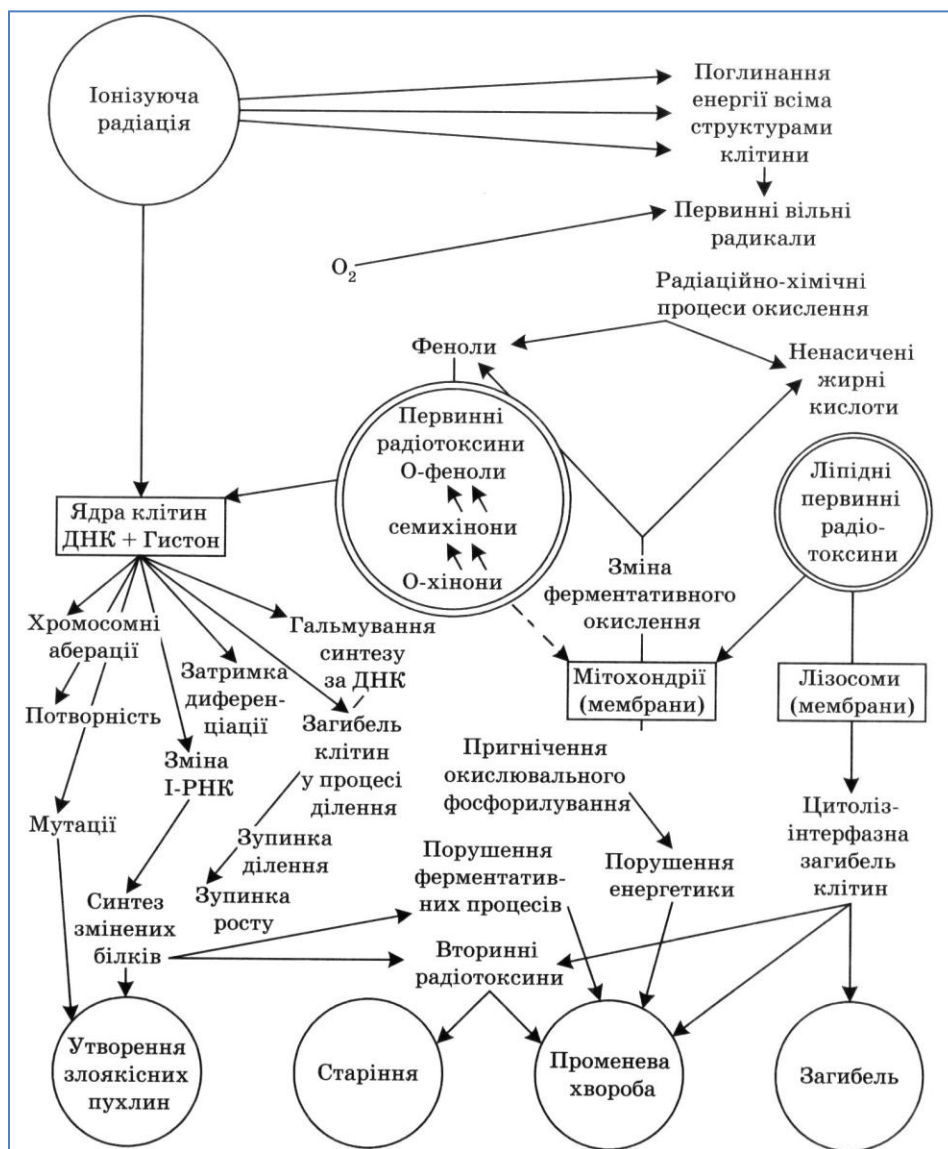


Рис. 4. Схема радіаційного ураження організму (за А. М. Кузіним)

2. Морфологічні зміни – це зміни під впливом іонізуючої радіації зовнішнього вигляду організму, окремих його органів, анатомічної структури,

тобто набуття ознак, які відрізняють його від батьківських форм. Ці ознаки не спадкові, а відхилення від норми, потворства існують лише в поколінні опромінених організмів.

Так, при опроміненні тварин у стадії ембріогенезу (розвитку зародка) можливі порушення росту кісток, пропорцій розвитку окремих органів, росту й розвитку організму в цілому, що врешті-решт може призводити до виникнення різних вад.

При опроміненні дорослих особин ушкоджуються насамперед клітини, які перебувають у стані поділу. Саме в цих місцях виникають такі *морфологічні зміни*: зміна кольору шкіри й волосяного покриву, випадання волосся, припинення росту рогових утворень та їх відшаровування, катаракта (помутніння кристалика ока), що дістала назву променевої, зміни розмірів і форми окремих органів, різні ступені дистрофії. Опромінення тварин може зумовити виникнення найрізноманітніших виразок на поверхні тіла або на внутрішніх органах з наступним утворенням на їхньому місці рубців. До цього типу ефектів відноситься й виникнення під дією радіації пухлин на різних органах.

3. Променева хвороба – це загальне порушення життєдіяльності організму, яке характеризується глибокими функціональними і морфологічними змінами всіх його систем і органів внаслідок ушкодження їх різними видами іонізуючих випромінювань. В залежності від дози, потужності дози, а також кратності і тривалості опромінення тварин променева хвороба може протікати гостро або хронічно.

Гостра променева хвороба виникає звичайно при загальному опроміненні за короткий час – секунди, хвилини, години, дні. За тяжкістю захворювання розрізняють *чотири її ступені*: легку (у людини при дозах радіації 1-2 Гр), середньої тяжкості (2-4 Гр), тяжку (4-6 Гр) і найтяжчу або дуже тяжку (більше 6 Гр).

У розвитку гострої форми променевої хвороби виділяють 4 періоди або фази.

Перший – *період первинних реакцій* – може спостерігатись вже через кілька годин після опромінення і триває протягом 3-4 діб. Характерними його ознаками є порушення стану нервової системи, що виявляється у формі збудження, яке змінюється пригніченням та слабкістю. Погіршується апетит, порушується ритм роботи серця, виникають задишка, пронос, блювання, може підвищитись температура тіла. У периферійній крові вже в першу добу після опромінення спостерігаються порушення у формулі крові, тобто співвідношення між окремими її елементами-клітинами. Зокрема, збільшується кількість лейкоцитів, ретикулоцитів, зменшується число лімфоцитів та інших клітин. На кінець періоду у стані хворих відмічаються суб'єктивні поліпшення.

Другий період – *латентний або прихований, фаза удаваного благополуччя*, залежно від тяжкості хвороби триває від кількох діб до 2 тижнів і більше. Чим вища одержана доза або чим тяжча форма променевої хвороби, тим він коротший. При дуже тяжкій формі променевої хвороби цього періоду може зовсім не бути.

Стан хворих у цей період може здаватись задовільним. Однак уявність цього благополуччя легко підтверджується аналізом крові. Насамперед виявляється наростаюче зниження багатьох клітин крові: лімфоцитів, тромбоцитів, нейтрофілів, ретикулоцитів. Спостерігається руйнування клітин кісткового мозку. В кінці періоду можуть виявлятися крововиливи на слизових оболонках, порушення травного каналу, бронхіт, пневмонія, випадання волосся (характерна морфологічна зміна). Але в кістковому мозку в другій половині цього періоду при легкій та середній формах хвороби з'являються ознаки регенерації – відновлення.

Третій період – розпал хвороби – *період виявлення клінічних ознак гострої променевої хвороби* залежно від її ступеня проявляється через 1-4 тижні. Знову загальний стан хворих різко погіршується: виникає задихання, погіршується функціонування серцево-судинної системи, органів травлення, спостерігається втрата апетиту, пронос, зменшення маси тіла, може виникнути короткочасна лихоманка, яка періодично повторюється, підвищується температура тіла. Характерною ознакою цього періоду є геморагічний синдром – крововиливи під шкіру, на слизових оболонках, у травному каналі, у мозку, серці, легенях та інших органах.

В залежності від одержаної дози та індивідуальної чутливості людини до опромінення третій період триває від 1 до 3-4 тижнів. Наприкінці його розвивається прогресуюча анемія або недокрів'я – хвороба, головною ознакою якої є зниження вмісту в еритроцитах гемоглобіну – речовини, яка переносить кисень з органів дихання до тканини. При дозі 2,5-4 Гр, яка одержала назву напівлетальної, у половини хворих в кістковому мозку та лімфатичних вузлах може спостерігатись повне руйнування клітин, що призводить до смерті. У другій половини хворих в цих органах відмічаються ознаки регенерації та перехід хвороби через 1-1,5 місяця в четвертий період.

Четвертий період – *період відновлення*, при легкому ступені гострої променевої хвороби проходить досить швидко і повною мірою. Він характеризується поліпшенням загального стану організму, нормалізацією температури тіла. Зникає кровоточивість, відновлюються показники крові, травлення. При середній тяжкості променевої хвороби період відновлення триває 2-2,5 місяця, а в цілому видужання опроміненої людини завершується за 3-6 місяців.

При тяжкій формі хвороби період відновлення може затягнутись на 7-9 місяців. Але дуже часто повного видужування не відбувається: протягом всього життя спостерігається зниження імунітету – здатності організму протистояти інфекційним захворюванням і взагалі несприятливим чинникам, послаблення відтворної здатності, загострення хронічних захворювань, можливе скорочення тривалості життя. Нерідко гостра форма променевої хвороби переходить в хронічну.

Дуже тяжкий ступінь гострої променевої хвороби триває від кількох днів до кількох тижнів і без втручання лікувальних прийомів, звичайно, завершується смертю хворих у першому або третьому періоді. При опроміненні в дозах, що перевищують летальні, ранній смертельний наслідок може настати

вже через 2-4 доби. При дозах, вищих за летальні в 1,5-2 рази, загибель можлива навіть під час опромінення або в найближчі години після нього – так звана «смерть під променем».

Під час аварії на Чорнобильській АЕС декілька десятків чоловік з числа робітників, які обслуговували станцію в ту зміну, і пожежників, котрі першими прибули на місце палаючого четвертого блоку, одержали високі, більші за смертельні, дози опромінення – до 10 Гр і вищі. Деякі з них вже через декілька годин почали відчувати сильну спрагу, нудоту, головокружіння, загальну слабкість. Потім почалося надзвичайно сильне потовиділення, блювання. Через декілька днів на тлі посилення цих симптомів спостерігалися втрата апетиту, крововиливи в шкіру, кровотечі, пронос, нерідко кривавий, виникнення виразок у роті, носоглотці. Тобто явні ознаки гострої променевої хвороби при великих дозах іонізуючої радіації виявляються досить швидко.

Хронічна променева хвороба – форма променевого ураження, що розвивається внаслідок тривалого опромінення людини малими дозами зовнішнього опромінення або від радіоактивних речовин, які потрапили всередину організму.

Хронічна променева хвороба не має таких явних ознак прояву, як гостра. І тому визначити її значно важче. Проте все ж виділяють три форми хронічної променевої хвороби: *легку, середню і тяжку*. Розрізняють також періодичність протікання хвороби, як при гострій формі.

Легка форма хронічної променевої хвороби зумовлена опроміненням у порівняно невеликих дозах і протягом короткого періоду – 1-2 мГр на добу до досягнення сумарної дози 0,5-0,7 Гр. Звичайно, вона характеризується функціональним порушенням здоров'я – нервової, серцево-судинної, ендокринної систем. Після припинення опромінювання ці зміни можуть зникнути.

Для середньої форми хвороби, яка спостерігається при дещо більших потужностях доз і сумарних дозах, характерними є вже порушення регуляторних систем, функціональна недостатність органів травлення, нервової, серцево-судинної систем і особливо крові. Але після припинення опромінення також настає відновлення, яке супроводжується нормалізацією перерахованих порушень, іноді з тим чи іншим ступенем їх недостатності.

Тяжка форма хронічної променевої хвороби проявляється при щоденному опроміненні в дозах 4-5 мГр на добу при досягненні сумарної дози 10 Гр і вище за декілька місяців і навіть років. Вона характеризується глибокими морфологічними порушеннями деструктивного порядку в органах кровотворення, травному каналі, нервовій та інших системах. Ця форма хвороби супроводжується поступовим ослабленням діяльності серця, порушенням функцій залоз внутрішньої секреції, виснаженням, зниженням стійкості проти інфекційних хвороб. Навіть після повного припинення опромінення відновлення відбувається досить повільно і повного видужування без медичного втручання досягти дуже важко.

При потраплянні радіоактивних речовин всередину організму хронічна променева хвороба часто зумовлюється тривалим локальним опроміненням

окремих органів і систем, що спричинюється вибіркоvim розподілом їх у тілі та нагромадженням в окремих органах. Наприклад, ^{131}I концентрується переважно в щитоподібній залозі, зумовлюючи опромінення цього важливого органа ендокринної системи хребетних. Це призводить до порушень в рості і розвитку, послаблення імунітету. Особливо небезпечне потрапляння цього радіоактивного елемента штучного походження у ще несформований організм дітей. Цього, на превеликий жаль, не вдалося уникнути в період аварії на Чорнобильській АЕС.

^{90}Sr переважно нагромаджується у скелеті, опромінюючи червоний кістковий мозок – основний кровотворний орган. Саме це призводить до різних порушень у формулі крові і різним, що важко виліковуються, хвороб крові.

Лікування променевої хвороби. Видужування після променевої хвороби у найбільш узагальненому вигляді зводиться врешті-решт до заміни уражених радіацією клітин здоровими. Тому більшість лікувальних заходів, як правило, спрямовані на прискорення цього процесу. Так, одним з ефективних прийомів при всіх формах променевої хвороби є така широко відома процедура, як переливання крові від здорової людини чи введення кровозамінників. При високих дозах опромінення, коли гинуть чутливі до радіації клітини кісткового мозку – депо всіх клітин крові, застосовують пересадку кісткового мозку від донора. Ефективним є застосування стимуляторів кровотворення – речовин, які прискорюють виникнення нових елементів крові, поділ неушкоджених клітин кісткового мозку.

4. Прискорення старіння і скорочення тривалості життя. Існує пряма кількісна залежність між скороченням тривалості життя і одержаною організмом дозою іонізуючої радіації. Проте, як вважають геронтологи – вчені, які вивчають закономірності старіння організмів, прискорення старіння і скорочення тривалості життя не обов'язково повинні бути неминучими після опромінення або наслідками один одного. Хоч справді скорочення тривалості життя може наставати після променевої хвороби, як і після будь-якого перенесеного тяжкого захворювання. Але воно не завжди пов'язане із справжнім старінням.

5. Загибель. При високих дозах опромінення іонізуючою радіацією, коли видужання від променевої хвороби неможливе, настає загибель або смерть організму – повне припинення його життєдіяльності як цілісної системи.

До віддалених наслідки дії радіації відносяться непухлинні і пухлинні форми.

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

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

Склеротичні процеси є наслідком пошкодження судинної сітки опромінених органів. Морфологічно вони проявляються такими процесами як

цироз печінки, хронічні променеві дерматити, атеросклероз, променеві катаракти, ушкодження нервової системи.

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

Пухлинні форми. Пухлини виникають частіше всього при опроміненні тварин α і γ -випромінюваннями. При цьому пухлини, зазвичай, виникають в критичних органах. Частоту появи пухлин у тварин збільшує сукупна дія радіаційних і інших хвороботворних факторів.

ГЕНЕТИЧНІ ЗМІНИ В ОРГАНІЗМІ ПІД ВПЛИВОМ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Іонізуючі випромінювання можуть викликати також і генетичну дію. Розрізняють генні, хромосомні і геномні мутації. Соматичні ефекти виявляють тільки у безпосередньо опроміненого організму. Генетичні або спадкові ефекти передаються нащадкам. Вони виникають внаслідок мутацій, тому їх називають ще мутагенними ефектами.

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

Іонізуюча радіація, на відміну від багатьох інших шкідливих факторів, що діють на живі організми (високі й низькі температури, зміни атмосферного тиску та інші), має здатність зумовлювати порушення у спадковому матеріалі і сприяти виникненню мутацій. Вони можуть призводити до появи в наступних поколіннях, аж до 15-20-го, організмів із зміненими властивостями – виродків, збільшенню частоти спадкових хвороб. Це було доведено в досліджах з мікроорганізмами, рослинами, комахами, дрібними лабораторними тваринами – організмами, що мають швидку і високу відтворюваність. Є всі підстави вважати, що так само і так тривало діє іонізуюча радіація і на людину.

Залежність кількості мутацій, що виникають при дії іонізуючої радіації, від дози має лінійний або близький до лінійного характер. З одного боку це свідчить про те, що ступінь генетичного ушкодження збільшується прямо пропорційно дозі, а з другого – вказує на *безпороговість* цієї радіобіологічної реакції. Тобто якою б малою не була доза опромінення, вона здатна індукувати мутації, викликати ураження. *Немає нешкідливих доз.* Якою б малою не була доза, достатньо одного попадання в молекулу ДНК, тобто одного акту іонізації, щоб викликати мутацію. І саме в цьому полягає підступність іонізуючих випромінювань: при малих дозах організм не зазнаватиме ніяких соматичних ушкоджень, але ушкодження можуть виявитись у його нащадків.

Мутації, що виникають при опроміненні в статевих клітинах ссавців, можуть бути настільки серйозними, що плід, який формується з них, може бути нежиттєздатним і загинути. Такі мутації називають *летальними*, тобто смертельними. В інших випадках мутаційні зміни можуть бути сумісними з життям, але виявляються у вигляді відхилень різного ступеня від батьківських форм – *спадкових хвороб*. З підвищенням дози опромінення збільшується і

небезпека виникнення обох типів мутацій. При різних дозах опромінення живих організмів іонізуючою радіацією виявляються неоднакові радіобіологічні ефекти. Радіаційна стимуляція – перший соматичний ефект, що спостерігається за мінімальних доз. Морфологічні зміни, променеву хворобу, прискорення старіння і скорочення тривалості життя виявляються при дозах, у десятки разів більших. Ще при більших дозах настає загибель.

Але не тільки від дози випромінювань залежить прояв радіобіологічних ефектів. Наприклад, дози, що стимулюють ріст і розвиток рослин родини капустяних (редис, капуста, редька, ріпак), пригнічують їх і навіть здатні викликати загибель рослин родини бобових (боби, горох, квасоля). Дози, які майже не завдають шкоди комахам, смертельні для всіх тварин класу ссавців. Всі радіобіологічні ефекти визначаються чутливістю організму до іонізуючої радіації або їх радіочутливістю.

ПРОТИРАДІАЦІЙНИЙ БІОЛОГІЧНИЙ ЗАХИСТ

Іноді між іонізуючою радіацією і факторами неіонізуючої природи може спостерігатися антагонізм, при якому ефект опромінення зменшується. Це явище було відоме давно. Перешкодити процесу поглинання енергії іонізуючого випромінювання можна тільки поставивши між джерелом випромінювання і об'єктом опромінення захист у вигляді цегляної, бетонної, а ще краще – свинцевої загорожі. Це так званий фізичний протирадіаційний захист, який одержав назву *екранування* і широко застосовується в певних ситуаціях.

А як захистити від іонізуючої радіації населення при вибухах атомних бомб, аваріях на підприємствах ядерного паливного циклу?

На сьогодні існує ціла галузь, напрямок радіобіології, яка займається проблемою протирадіаційного біологічного захисту. І вже знайдено досить багато простих і порівняно складних хімічних сполук, введення яких в організм зменшує уражуючу дію іонізуючих випромінювань, гальмує надходження радіоактивних речовин в організм, прискорює їх виведення. Умовно ці речовини можна поділити на три групи: радіопротектори, радіоблокатори і радіодекорпатори.

Радіопротектори. У 1949 р. практично водночас дослідники З. Бак і А. Ерве із Бельгії та Г. Патт із США повідомили наукову громадськість світу про дві хімічні сполуки, введення яких лабораторним тваринам перед рентгенівським опромінення підвищує їх виживання.

Перші заявили, що таку дію має добре відома дуже сильна отрута ціанід натрію – аналог сумно звісного ціаністого калію. Ін'єкція цієї речовини мишам у дозі, в кілька разів меншій за летальну безпосередньо перед гострим опроміненням, знижувала ступінь радіаційного ураження приблизно в 1,5 рази.

Г. Патт навів дані про амінокислоту цистеїн, яка приблизно в такій же мірі теж захищала тварин від опромінення. Так було відкрито перші протипроменеві або радіозахисні речовини, що дістали назву радіопротекторів.

Радіопротектори – це хімічні речовини, введення яких в організм перед

опроміненню або під час опромінення іонізуючою радіацією, знижує ступінь прояву радіобіологічних ефектів, тобто сприяє послабленню радіаційного ураження.

Кількісною характеристикою дії радіопротекторів є величина, яка називається *фактором зміни дози (ФЗД)*. *Фактор зміни дози* – це відношення ефективної дози (наприклад, ЛД₅₀) при опроміненні організму з радіопротектором до ефективної дози, що зумовлює такий самий радіобіологічний ефект у звичайних умовах, тобто без радіопротектора.

Природно, що коли хімічна речовина захищає організм від іонізуючого випромінювання, значення ФЗД повинно бути більшим за 1. Наприклад, якщо ЛД₅₀ в звичайних умовах при γ -опроміненні мавп складає 3,0 Гр, а при застосуванні радіопротектора 4,5 Гр, то ФЗД в такому випадку буде дорівнювати 1,5.

Якщо ж ФЗД менше за 1, це, навпаки, свідчить про посилення дії випромінювання – *радіосенсибілізацію*. А коли дорівнює 1, то речовина не діє ніяк – нейтральна щодо випромінювання.

Через два роки після відкриття перших радіопротекторів З. Бак зі своїми співробітниками виявив, що одна з похідних сполук цистеїну – цистеамін має набагато виразнішу здатність зменшувати ступінь променевого ураження як при ін'єкціях, так і при згодовуванні тваринам. Захищає від радіації він і рослини, якщо їх обприскати розчином цистеаміну або додати його у поживне середовище. При застосуванні цистеаміну в деяких випадках ФЗД досягає 2, тобто він підвищує радіостійкість організму у 2 рази.

В даний час відомі тисячі сполук, які мають радіопротекторні властивості. Це в першу чергу сульфгідрільні сполуки – речовини, що містять -SH групу і до яких належать цистеїн і цистеамін; багато інших відновників; біогенні аміни – органічні сполуки похідні аміаку, що містять активні групи -NH₂, -NH; згадані вже ціаніди; окремі метаболіти – речовини, що виробляються в організмі в процесі обміну речовин; інгібітори метаболізму; солі деяких металів; різні біологічно-активні речовини та багато інших сполук.

Ідеальний радіопротектор повинен відповідати таким трьом основним вимогам. По-перше, мати високу протирадіаційну здатність. По-друге, бути стабільним, тобто зберігати свої радіопротекторні властивості протягом певного часу. І, по-третє, мати мінімальну токсичну дію при введенні в організм.

На жаль, більшість найкращих радіопротекторів не відповідає цим вимогам. Наприклад, цистеамін: ефективність його найвища, але стабільність дуже низька – в активно метаболізуючій системі, якою є організм ссавців, він швидко окислюється і вже через 20-30 хв. після введення втрачає свої радіозахисні властивості. Це саме стосується майже всіх радіопротекторів-відновників. Досить висока токсичність цистеаміну – навіть при радіозахисних концентраціях він здатен викликати інгібування багатьох, у тому числі синтезу ДНК, сповільнювати поділ клітин, індукувати розриви хромосом. При різній ефективності, в тій чи іншій мірі, нестабільні і токсичні багато інших радіопротекторів.

Внаслідок цього основна маса радіопротекторів проявляють свої більш-менш значні радіозахисні властивості лише в умовах гострого одноразового опромінення.

Після аварії на Чорнобильській АЕС одним з найважливіших завдань радіобіології є пошук засобів протипроменевого захисту для умов хронічного опромінення, яке триває роки, десятиліття, все життя – радіопротекторів так званої пролонгованої, тобто тривалої дії.

Такі властивості мають природні метаболіти, зокрема деякі *вітаміни*, радіопротекторні властивості багатьох з котрих давно відомі. Це в першу чергу стосується вітамінів, що мають високу відновлювальну активність – А, С, Е, U.

Вітамін А – ретинол. Головне його джерело – каротини рослин, які є провітаміном, тобто попередником вітаміну. Це характерні оранжево-жовті пігменти, при окиснювальному розпаді котрих в організмі тварин і людини утворюється вітамін А. Дуже багато каротинів у моркві, шипшині, обліписі. Немало містять його ягоди смородини, горобини, помідори, гарбузи. Каротини – жиророзчинні речовини і краще засвоюються організмом у супроводі жирів. Тому вживати овочі і плоди, що їх містять, бажано з рослинною олією, сметаною. Велику кількість вітаміну А містять такі продукти тваринництва як молоко, сметана, масло, ячний жовток. Особливо багато його у печінці морських риб та інших тварин.

Вітамін С – аскорбінова кислота. Головне її джерело – свіжі овочі, фрукти, ягоди. Особливо великі кількості вітаміну С містять плоди шипшини, смородини, грецького горіху (недозрілі), актинідії, овочевого перцю, а також листові овочі – цвітна капуста, кріп, цибуля, часник. На відміну від інших тварин-савців, в організмі приматів, до яких належить і людина, відсутні ферменти, необхідні для синтезу вітаміну С (цей виняток розповсюджується ще на морську свинку). Тому в організм людини вітамін С може надходити тільки з продуктами харчування.

Вітамін Е – токоферол. Синтезується тільки рослинами. Найбільші його кількості в досить концентровану вигляді містять рослинні олії – соняшникова, кукурудзяна, маслинова, лляна, ріпакова та інші. Багато вітаміну Е в горіхах – грецькому, ліщині, кедровому, фундуку, мигдалі. Суттєвим його джерелом є також салатні овочі – салат, м'ята, цикорій, листові гірчиця.

Вітамін U – цей порівняно менш відомий вітамін має досить складну назву – метилметионінсульфоній хлорид. Він вперше був одержаний з капусти, яка і є основним його джерелом, особливо капуста брокколі – різновидність цвітної капусти, яку ще називають спаржевою. Багато його і в інших рослинах родини хрестоцвітих, зокрема редисі, редьці, а також у шпинаті, селері.

Радіопротекторна ефективність вітамінів при гострому опроміненні порівняно з цистеаміном досить невелика – ФЗД рідко перевищує 1,2-1,3. При хронічному опроміненні вона, як правило, ще нижча. Вони досить швидко включаються в обмін речовин і виводяться в організму. Але, будучи природними метаболітами, вони нешкідливі для нього і можуть вводиться в певних кількостях постійно. Таким чином, за рахунок вітамінів в організмі людини можна створити свого роду постійний радіозахисний фон, який буде

підтримувати його радіостійкість на більш високому рівні.

Безумовно, вживаючи вітаміни у безконтрольно високих кількостях у вигляді концентрованих фармацевтичних препаратів можна заподіяти шкоду організмові. *Гіпервітаміноз* – інтоксикація, яка спричиняється високими дозами вітамінів.

Радіопротекторні властивості мають деякі метали, зокрема солі заліза, цинку, селену, марганцю, кобальту, нікелю, молібдену, міді. При гострому γ -опроміненні ФЗД для деяких з них досягає 1,5-1,7. Метали також відзначаються певною стабільністю. Всі перераховані метали належать до групи важких, тобто є токсичними. Але в невеликих кількостях разом і з здійсненням багатьох фізіолого-біохімічних функцій вони проявляють і радіозахисні властивості.

Метали в організмі через деякий час також можуть окиснюватись, включитися в обмін речовин і виводитись з організму. Тому при тривалому опроміненні потрібно вводити нові дози радіопротекторів цього типу.

Заліза багато у квасолі, салаті, буряках, огірках, ячмені, яблуках. На цинк багаті кукурудза, особливо її цукристі столові сорти, квасоля, цибуля, буряки. Марганцю багато в буряках, квасолі, цибулі, моркві, кукурудзі, салаті, томатах. Велику кількість кобальту містить салат, томати, капуста, картопля, огірки; нікелю – квасоля, салат, огірки, капуста; молібдену – квасоля, горох, огірки, томати, капуста.

Радіопротектори захищають організм безпосередньо від випромінювань як зовнішніх джерел природного і штучного походження, так і внутрішніх, які надійшли в нього з повітрям через органи дихання, шкіру, але головним чином через органи травлення з їжею і водою. В даний час до 90-95% загальної дози іонізуючої радіації населення України одержує саме за рахунок внутрішнього опромінення, точніше випромінювання радіоактивних речовин, які надходять з продуктами харчування.

На кожному етапі переходу радіоактивних речовин з однієї ланки до наступної можна встановити своєрідні заслони за допомогою певних хімічних речовин, які одержали назву радіоблокаторів.

Радіоблокатори – хімічні речовини, які зменшують, «блокують», надходження в організм радіоактивних речовин. Чим раніше на цьому шляху буде встановлений блок, тим менше радіоактивних речовин надійде в організм людини і тим меншу дозу внутрішнього опромінення вона одержить.

Первинна і найвідповідальніша ланка колообігу радіоактивних речовин в біосфері – ґрунт-рослина. Саме нею постійно надходить до людини основна маса радіоактивних речовин. Радіоактивні речовини починають надходити в рослини через корені. Цей процес, як і взагалі рухомість речовин, прискорюється у кислому середовищі. Саме таким станом – кислою реакцією, не дуже придатною для росту і розвитку рослин, характеризується більшість болотних, торфових та інших ґрунтів зони Полісся і півночі Лісостепу, територія яких найбільше потерпіла від аварії. Давно відомий спосіб доведення реакції таких ґрунтів до нормальної – нейтралізації. Це – вапнування, тобто внесення в ґрунт вапна або вапняних матеріалів, які мають лужну реакцію і нейтралізують середовище.

Проводять вапнування з урахуванням ступеня кислотності, специфіки й типу ґрунтів, біологічних особливостей рослин. Тому що перевищення норми вапна (вносять його до 10 тонн на кожний гектар) може призвести до зміщення реакції ґрунтового розчину у лужний бік. Надходження радіоактивних речовин в цьому разі може зменшитися ще в більшій мірі, але в такому середовищі різко гальмується ріст і, відповідно, продуктивність рослин.

Головною складовою речовиною вапна є кальцій у формах CaO , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Ca_2CO_3 . Кальцій – це хімічний аналог стронцію, і в навколишньому середовищі такі елементи нерідко поводять себе як конкуренти, виявляючи антагоністичні якості. Так, чим більше в ґрунті буде кальцію, тим менше в рослину надійде стронцію. Таким чином, кальцій вапна можна розглядати як радіоблокатор – елемент, який перешкоджає надходженню в рослини ^{90}Sr .

Здатність зменшувати надходження в рослини радіоактивних речовин мають і деякі добрива, які використовують для підвищення врожаю. Добре відомо, що основними поживними речовинами рослин є три елементи: азот, фосфор і калій. Згідно сучасним технологіям вирощування сільськогосподарських рослин вони повинні систематично вноситись у ґрунт для компенсації тієї кількості речовин, яка виноситься врожаєм. Калій калійних добрив є хімічним аналогом і конкурентом-антагоністом другого радіоактивного забруднювача – ^{137}Cs . Збільшення доз калійних добрив при їх внесенні в ґрунт веде до зменшення надходження в рослини ^{137}Cs в декілька разів. Таким чином, калій блокує перехід цього радіоактивного ізотопу.

Важлива роль у справі зменшення надходження в рослини ^{90}Sr належить фосфорним добривам. Фосфор здатний до утворення зі стронцієм погано розчинних у воді сполук, котрі не переходять в ґрунтовий розчин і тому не можуть надійти в рослину. Тому внесення підвищених кількостей фосфорних добрив є також досить ефективним заходом зменшення нагромадження рослинами цього радіоактивного ізотопу і дозволяє віднести фосфор до класу радіоблокаторів.

Суттєво зменшують нагромадження рослинами радіоактивних речовин органічні добрива – гній, компости, торф, пташиний послід. Особливо ефективні вони на бідних на поживні речовини ґрунтах. Ці добрива містять найрізноманітніші елементи живлення рослин, зокрема й ті, що зменшують надходження в рослини радіоактивних речовин – кальцій, калій, фосфор та інші. Головною ж їх специфікою є те, що вони містять велику кількість напіврозкладених дрібнодисперсних органічних речовин, які здатні сорбувати радіоактивні елементи й робити їх важкодоступними для рослин. Це теж своєрідний шлях їх блокування.

Досить ефективно за допомогою блокаторів можна втручатись в процес переходу радіоактивних речовин і на наступному етапі – рослини (корми) – тварини. Для цього необхідно годувати тварин чистими від радіоактивних речовин кормами.

Порушення кальцієвого живлення призводить до збільшення нагромадження в організмі тварин ^{90}Sr . Збагачення раціону кормами, які містять підвищену кількість кальцію являє собою досить діючий спосіб

блокування організму від проникнення ^{90}Sr із шлункового-кишкового тракту тварин в молоко і м'ясо, а у свійської птиці – в м'ясо і яйця.

Аналогічно збагачення раціону за рахунок кормів, які містять підвищену кількість калію, буде сприяти зниженню в цій продукції тваринництва накопичення ^{137}Cs .

Принципово не змінюється стратегія захисту людини від накопичення в організмі ^{90}Sr і ^{137}Cs за допомогою механізму їх блокування.

Радіоактивні речовини переходять з ґрунту в рослини у водорозчинному стані, у вигляді водних розчинів рухаються по трофічним ланцюгам, з водою вони і вилучаються. Так, у вершках і сметані міститься лише 10-15% радіоактивних речовин від тих, що були у молоці, решта залишається у відвійках; у сирах – ще менше; у маслі – в два рази менше, ніж у вершках. Перетоплення масла дозволяє видалити з нього ^{90}Sr і ^{137}Cs майже повністю.

Постачальником кальцію людині, як і тваринам, є і бобові культури. Для України це в першу чергу горох і квасоля, в меншій мірі – соя, сочевиця, боби. Досить багато кальцію містять більшість плодових і ягідних культур родини розових: яблуня, груша, слива, вишня, абрикос, малина, суниця та інші.

Основним джерелом калію для організму людини є також овочі і фрукти. Такі звичайні рослини, що частково вже вище згадувались, як картопля, столові буряки, капуста, овочевий перець, кукурудза, гречка, соняшник належать до рослин-калієфілів, накопичуючи його у великих кількостях. Споживаючи їх, людина створює бар'єр надходженню ^{137}Cs . Дуже багато калію містять виноград і абрикос – ці рослини можна вважати чемпіонами за його вмістом.

Є спеціальні речовини, які здатні знижувати перехід радіоактивних речовин з продуктів харчування в організм. Таку дію, зокрема, мають альгірати натрію, калію, кальцію – солі альгінових кислот, які виділяють з деяких видів бурих морських водоростей. Додавання їх до раціону блокує надходження ^{90}Sr в тканини в 2-3 рази. В зв'язку з тим, що особливу небезпеку ^{90}Sr несе для дітей, альгірати додають до спеціальних продуктів дитячого харчування.

Схожий до альгіратів ефект мають пектинові речовини, яких багато містять коренеплоди і особливо буряки, гарбуз та інші рослини родини гарбуз'яних, плоди цитрусових, особливо лимон, плоди сім'ячкових порід – яблуні, груші, айви.

Радіодекорпоратори. Радіодекорпоратори – це речовини, які прискорюють виведення радіоактивних речовин з організму. Відомі як природні, так і синтетичні препарати, які здатні прискорити цей процес. Одні з них дістали назву ентеросорбентів чи просто сорбентів. Ці речовини здатні більш-менш вибірково поглинати радіоактивні речовини і разом з продуктами обміну виводити їх з організму. Найпростішим і найвідомішим з них є активоване вугілля. Сорбувати радіоактивні речовини можуть деякі мінерали – цеоліти, монтморилоніти, бентоніти.

Другі – це комплекси, природні і штучні препарати, які можуть утворювати зі стронцієм і цезієм міцні, прете добре розчинні у воді сполуки, котрі, беручи участь в обміні речовин, прискорюють їх виведення з організму.

Синтетичні комплекси досить успішно використовуються в практиці

радіаційної медицини. Здійснювати їх застосування необхідно під ретельним наглядом лікаря.

Здатність виводити з організму радіоактивні речовини мають і деякі природні речовини, зокрема антоціан – пігмент, який надає рослинам, головним чином квіткам, плодам, характерного фіолетового, синього, коричневого кольору. Антоціанів багато у темних сортах винограду, чорній смородині, чорноплідній горобині, ожині, шовковиці та інших, але не в столових буряках.

Здатність прискорювати виведення з організму радіоактивних речовин мають різні чаї, зокрема зелений; складні квітково-трав'яністі чаї типу закарпатського, алтайського; деякі настойки на основі рослинних зборів.

ПОДІЛ ЗАБРУДНЕНОЇ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ НА РАДІОЕКОЛОГІЧНІ ЗОНИ

У березні 1991 р. було прийнято Закон України «Про правовий режим території, яка піддається радіоактивному забрудненню внаслідок Чорнобильської катастрофи», який установлює рівні забруднення місцевості і вид екологічної зони, умови проживання і роботи населення в цих зонах.

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

– **зона відчуження** – 30-кілометрова зона навколо ЧАЕС, з якої було евакуйовано населення в 1986 р.;

– **зона безумовного відселення** – територія, що зазнала забруднення довгоживучими радіонуклідами, з щільністю забруднення ґрунту вищою від доаварійного рівня (ізотопами цезію від 15,0 Кі/км² та вище, або ⁹⁰Sr від 3,0 Кі/км² та вище, або плутонію від 0,1 Кі/м² та вище), де розрахункова еквівалентна доза опромінення людини з урахуванням коефіцієнтів міграції радіонуклідів за харчовими ланцюгами може перевищувати 5,0 мЗв/рік понад дозу, яку вона отримала в доаварійний період;

– **зону гарантованого добровільного відселення** – територія з щільністю забруднення ґрунту вищою від доаварійного рівня (ізотопами цезію від 5,0 до 15,0 Кі/км², або ⁹⁰Sr від 0,15 до 3,0 Кі/км², або плутонію від 0,01 до 0,1 Кі/км²), де розрахункова еквівалентна доза опромінення людини з урахуванням коефіцієнтів міграції радіонуклідів за харчовими ланцюгами може перевищувати 1,0 мЗв/рік понад дозу, яку вона отримала в доаварійний період;

– **зона посиленого радіоекологічного контролю** – територія з щільністю забруднення ґрунту вищою від доаварійного рівня (ізотопами цезію від 1,0 до 5,0 Кі/км², або ⁹⁰Sr від 0,02 до 0,15 Кі/км², або плутонію до 0,01 Кі/км²) за умови, що розрахункова еквівалентна доза опромінення людини з урахуванням коефіцієнтів міграції радіонуклідів та інших факторів не повинна перевищувати 1,0 мЗв/рік понад дозу, яку вона отримала в доаварійний період.

Крім того, у законі дані визначення радіаційно небезпечних земель і радіоактивно забруднених земель.

Радіаційно небезпечні землі – це землі, на яких неможливе подальше

(постійне) проживання населення, одержання сільськогосподарської та іншої продукції або які недоцільно використовувати за екологічними умовами. Такі землі підлягають вилученню із сільськогосподарського обігу. До них відносять території 1-2-ї радіоекологічної зони.

Радіоактивно забруднені землі – це землі, які вимагають проведення заходів радіаційного захисту та інших спеціальних втручань, спрямованих на обмеження додаткового опромінення і забезпечення нормальної господарської діяльності. До них належать території 3-4-ї зон.

НОРМУВАННЯ РАДІАЦІЙНОГО ВПЛИВУ НА ОРГАНІЗМ ЛЮДИНИ

На територіях, забруднених внаслідок Чорнобильської катастрофи, опромінення в підвищених дозах зазнали не тільки люди, а й усі без винятку живі істоти будь-яких екосистем. Із понад фоновим опроміненням, яке за характером передавання дози є хронічним, пов'язані певні вже реалізовані радіобіологічні ефекти, й є підстави вважати, що в майбутньому проявляться негативні віддалені наслідки цього опромінення. До потерпілих внаслідок Чорнобильської катастрофи належать такі категорії людей:

- ті, хто брав участь у припиненні пожежі й викидів радіоактивних речовин із жерла зруйнованого реактора. Серед цієї групи – люди, що зазнали найсильнішого опромінення; багато з них загинули від гострої променевої хвороби;

- учасники ліквідації наслідків аварії – так звані «ліквідатори». Серед них опромінення в найбільших дозах зазнали ті, котрі працювали біля аварійного блока в перші місяці після аварії, брали участь у дезактивації прилеглої до реактора території проммайданчика, засипанні жерл реактора з гелікоптерів, спорудженні тимчасового укриття зруйнованого енергоблока – «саркофага». Ця група дуже численна – кілька сотень тисяч переважно зовсім молодих чоловіків. Індивідуальні еквівалентні дози могли перевищувати 500 мЗв;

- ліквідатори, які працювали й працюють зараз у так званій «зоні відчуження» (територія навколо ЧАЕС радіусом 30 км), на реакторах, тимчасових пунктах поховання й локалізації радіоактивних відходів, на дезактивації території, впорядкуванні доріг та гідротехнічних споруд, догляді за лісовими насадженнями тощо;

- населення, яке було евакуйоване з міста Прип'ять і вагітних жінок і людей похилого віку;

- населення, яке проживає на територіях, забруднених радіонуклідами, й якому загрожує зростання доз опромінення.

Нормами радіаційної безпеки України встановлені такі категорії осіб, що зазнають опромінення:

1. Категорія А (спеціальний персонал) – особи, які постійно чи тимчасово працюють безпосередньо з джерелами іонізуючого випромінювання;

2. Категорія Б (додатковий персонал) – особи, що безпосередньо не проводять робіт із джерелами іонізуючого випромінювання, проте у зв'язку з

розташуванням робочих місць у приміщеннях або на промислових майданчиках об'єктів з радіаційно-ядерними технологіями можуть зазнати додаткового опромінення;

3. Категорія В (населення) – решта населення країни.

Саме для наведених категорій осіб розраховані ліміти припустимих доз (табл. 8) та ступені радіоактивного опромінення населення.

Згідно з правилами стосовно захисту персоналу у виробничих умовах від природних джерел радіації доза опромінення не повинна перевищувати 5 мЗв/рік. Під час проведення профілактичних медичних рентгенологічних досліджень річна доза опромінення населення не може бути вищою за 1 мЗв. Є низка інших вимог, що обмежують рівень природно-техногенного опромінення населення як за нормальних умов, так і за умов радіаційної аварії.

Таблиця 8

Ліміти дози опромінення, мЗв/рік

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

Примітки:

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

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

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

100 мЗв - допустиме разове аварійне опромінення населення категорії Б;

250 мЗв - допустиме разове аварійне опромінення персоналу (кат. А), при цьому відсутні явні ефекти ураження;

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

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

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

10 Зв – 100% летальність серед опромінених.

Захистом від проникаючої радіації служать різноманітні матеріали, які послаблюють дію γ -випромінювання і нейтронів. При вирішенні питань захисту необхідно враховувати різницю в механізмах взаємодії γ -випромінювання і нейтронів із середовищем, що визначає вибір захисних матеріалів, γ -випромінювання найсильніше послаблюється важкими матеріалами, які мають високу електронну щільність (свинець, сталь, бетон). Потік нейтронів краще послаблюється легкими матеріалами, які містять ядра легких елементів, наприклад, водню (вода, поліетилен, парафін). В таблиці 9 показані деякі матеріали, які дозволяють зменшити γ -випромінювання і нейтронний потік.

Ураження людини радіоактивним випромінюванням можливе в результаті як зовнішнього, так і внутрішнього опромінення. Зовнішнє опромінення створюється радіоактивними речовинами, які знаходяться поза організмом, а внутрішнє – тими, що надійшли всередину організму з повітрям, водою та продуктами харчування. При зовнішньому опроміненні найбільш небезпечними випромінюваннями є ті, які мають високу проникаючу здатність, а при внутрішньому – ті, які мають іонізуючу здатність.

Таблиця 9

Значення шару половинного послаблення проникаючої радіації

Матеріали	Щільність, г/см ³	Шар половинного ослаблення, см	
		по нейтронах	за γ -випромінюванням
Вода	1	3-6	14-20
Поліетилен	0,92	3-6	5-25
Броня	7,8	5-12	2-3
Свинець	11,3	9-20	1,4-2
Грунт	1,6	11-14	10-14
Бетон	2,3	9-12	6-12
Дерево	0,7	10-15	15-30

Примітка: Інтервали значень товщини шарів половинного послаблення обумовлені різними значеннями ядерних зарядів, а також енергією нейтронів і γ -квантів і т.д.

Вважають, що внутрішнє опромінення є більш небезпечним, ніж зовнішнє, від якого нас захищають стіни приміщень, одяг, шкіра, спеціальні засоби захисту.

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 встановлені такі межі доз опромінення (табл. 10).

Дозові межі опромінення, мЗв·рік-1

Межа ефективної дози	Категорії опромінюваних осіб		
	A1-2	B1	B1
	20	2	1
Межі еквівалентної дози зовнішнього опромінення:			
– для кришталика ока;	150	15	15
– для шкіри;	500	50	50
– для кистей і стоп	500	50	50

1 Розподіл дози опромінення протягом календарного року не регламентується.

2 Для 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) встановлені 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 встановлюється на рівні 1/20 допустимого надходження для категорії А.

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

ОСНОВИ РАДІОЗАХИСНОГО ХАРЧУВАННЯ

Проблема вивчення та контролю радіаційної ситуації на забруднених радіонуклідами територіях і на сьогодні залишається актуальною, оскільки довгоживучі радіонукліди увійшли в біологічний цикл:

грунт → рослина → тварина → людина.

Встановлено, що на даному етапі найбільш важливе значення має надходження радіонуклідів через шлунково-кишковий тракт, внаслідок чого дози внутрішнього опромінення перевищують дози зовнішнього опромінення.

Забруднення сільськогосподарських культур відбувається в основному за рахунок засвоєння депонованих у ґрунті радіонуклідів через кореневу систему рослин.

Враховуючи, що рівні забруднення молока від корів індивідуального сектору в післяварійний період залишаються високими і перевищують допустимі рівні, відбувається накопичення значних доз внутрішнього

опромінення населення. Окрім молока дозові навантаження формують інші види продукції, такі, як лісові гриби, ягоди, м'ясо, картопля, споживання яких сприяє накопиченню радіонуклідів в організмі та формуванню високих рівнів внутрішнього опромінення.

Захист людського організму від шкідливого впливу радіоактивних речовин – одна з найактуальніших проблем сьогодення після Чорнобильської катастрофи. Радіонукліди, потрапляючи в організм з продуктами харчування і водою, формують основне дозове навантаження й, таким чином істотно впливають на стан здоров'я людини. На даний час споживання забруднених продуктів є основним видом опромінення. Однак цей шлях радіаційного впливу доступний для контролю та регулювання.

Перш за все основу всіх заходів потрібно покласти принципи максимального зменшення надходження радіонуклідів до організму. Цього можна досягти розривом найважливіших шляхів міграції радіонуклідів з об'єктів навколишнього середовища в організм людини. Важливим є не лише зменшення надходження радіонуклідів з їжею, а й зменшення коефіцієнту їх засвоєння та накопичення в організмі, застосування найбільш ефективних засобів кулінарної та технологічної обробки харчових продуктів, вибір спеціальних страв, що містять оптимальну кількість радіозахисних речовин з адаптогенними та імуномодуючими властивостями.

Сучасна концепція радіозахисного харчування базується на трьох основних положеннях:

- на максимально можливому зменшенні надходження радіонуклідів з їжею;
- на гальмуванні процесу всмоктування і нагромадження радіонуклідів в організмі;
- на дотриманні принципів раціонального харчування.

Гальмування процесу всмоктування і нагромадження радіонуклідів в організмі можна досягнути за допомогою створення спеціальних раціонів спрямованої дії, включаючи до них сполуки, що виявляють радіозахисну дію.

Нестача в раціоні білків, вітамінів, мінеральних речовин сприяє нагромадженню цезію і стронцію в організмі. І навпаки, збагачення раціону молочним білком, вітамінами груп В і С сприяє їх виведенню.

Насамперед необхідно дотримуватись наступних принципів раціонального харчування:

- а) чіткої відповідності між енергоспоживанням і енергозатратами;
- б) оптимального співвідношення і достатнього споживання усіх життєво необхідних продуктів;
- в) максимального урізноманітнення харчування;
- г) дотримання правильного режиму харчування.

При організації радіозахисного харчування важливе значення має забезпечення повноцінними білками. В раціонах доцільно віддавати перевагу м'ясу кролів, птиці, яловичини, оскільки ці продукти містять менше жиру, який гальмує процеси травлення.

Серед круп перевага надається вівсяній і гречаній, які містять багато

повноцінного білка, незамінних амінокислот, в тому числі метіоніну, лізину. Вівсяна крупа, окрім повноцінного білка і амінокислот, містить рослинний жир з поліненасиченими жирними кислотами (ПНЖК) (близько 6%), солі магнію, поліфеноли, що мають протирадіаційну дію.

Серед молочних продуктів слід віддавати перевагу стравам з сиру, які вже звільнились від радіонуклідів у процесі виробництва (більшість радіонуклідів залишається в молочній сироватці). Крім того, наявність у сирі сірковмісних амінокислот і кальцію, що виявляють радіозахисну дію, робить ці продукти незамінними у щоденному харчуванні. Значна кількість легкозасвоюваного кальцію і повноцінних білків є також у молоці і кисломолочних продуктах (кефірі, ряжанці). Корисними є курячі яйця, в яких міститься до 12,5% повноцінного білка і сірковмісних амінокислот метіоніну й цистину (відповідно 424 і 293 мг на 100 г).

Морська риба та інші морепродукти, на відміну від прісноводної риби, менше забруднені радіонуклідами. Тому страви з морської риби та інших продуктів моря слід використовувати у щоденному харчуванні. Крім того, у риб'ячому жирі багато поліненасичених жирних кислот (ПНЖК) і ретинолу, що мають протирадіаційні властивості.

Картопля, завдяки високому вмісту калію і аскорбінової кислоти є незамінним продуктом у щоденному радіозахисному раціоні. Слід зауважити, що взимку і ранньою весною картопля є основним джерелом аскорбінової кислоти. Добове споживання її для дорослих повинно бути не менше 350-400 г.

Овочі і фрукти є істотною і малозамінною частиною радіозахисного раціону. Практично лише з рослинних продуктів людський організм отримує аскорбінову кислоту, каротин, біофлавоноїди, пектинові речовини, органічні кислоти. Крім цього овочі і фрукти є джерелами тіаміну, нікотинової і фолієвої кислот. З овочами людина отримує значну кількість мінеральних речовин, особливо солей калію.

У радіозахисному харчуванні важливе значення відводиться пряним рослинам: цибулі, часнику, петрушці, кропу, селері, хрону. Завдяки фітонцидам, ефірним маслам, глікоалкалоїдам, аскорбіновій кислоті, каротину пряні рослини підвищують стійкість організму до інфекцій та інших шкідливих факторів навколишнього середовища.

Листові форми прямих рослин багаті на аскорбінову кислоту. У 100 г листя петрушки міститься 290 мг вітаміну С, тобто три добові дози. Зелень кропу втричі багатша за лимони на вміст аскорбінової кислоти. Хрін, цибуля, часник, петрушка, кріп містять ще й лізоцим, фітонциди, леткі ефірні масла, глікоалкалоїди, що виявляють протимікробну, зміцнюючу та радіозахисну дії. Корисними є продукти, що містять пігментні речовини – антоціани (чорна смородина, чорноплідна горобина, столові буряки, темні сорти винограду).

Загальне добове споживання овочів має бути не менше 400-500 г, причому чверть має становити споживання моркви. Терту моркву доцільно вживати у вигляді салатів з яблуками. Сумарна кількість прямих овочів у радіозахисному раціоні повинна становити 50 г на добу.

В умовах забруднення навколишнього середовища радіонуклідами

корисно вводити в раціон бобові (горох, квасоля тощо). Крім повноцінного білка, метіоніну, цистину, ПНЖК у бобових міститься багато магнію, необхідного для оптимального засвоєння кальцію.

Фрукти у щоденному радіозахисному харчуванні також мають дуже важливе значення. Яблук необхідно вживати щодня не менше 150-200 г, оскільки вони є джерелом пектинових речовин, аскорбінової кислоти, харчових волокон, заліза та органічних кислот. При можливості вибору слід віддавати перевагу абрикосам, сливам, персикам, вишням, так як вони містять багато пектину, каротину, аскорбінової та органічних кислот.

У радіозахисному харчуванні корисними є різні види горіхів, в яких міститься чимало повноцінних білків і рослинного жиру, багатого на ПНЖК і токоферол.

До речовин з радіозахисними властивостями також відносяться екстрактивні речовини чаю (таніни, катехіни, епікатехіни, біофлавоноїди). Чайні катехіни, в тому числі епікатехіни, мають властивості вітаміну Р, сприяють зміцненню судин, особливо капілярів і знижують проникність їх стінок.

Раціональне харчування є найважливішим фактором, який сприяє нормалізації в організмі процесів, що змінюються під впливом іонізуючого випромінювання.

Доведено радіозахисний ефект полісахаридів мікробіологічного походження. Виявлено здатність екстракту прополісу захищати від γ -випромінювання, перехоплювати вільні радикали. Досліджено, що застосування полісолодових екстрактів (полісол, антигіпоксин) зменшує накопичення ^{137}Cs .

Останнім часом посилено розробляються таблетовані продукти, що мають радіозахисні властивості; фітодраже з рослинними екстрактами, сухі порошкові продукти на основі розчинних екстрактів овочів і фруктів.

В умовах підвищеної іонізуючої радіації встановлено зниження імунних сил організму. Тому важливу роль відіграють *адаптогени* – засоби, які створюють в організмі стан неспецифічної підвищеної опірності, прискорюють адаптацію до різноманітних факторів середовища, захищають організм незалежно від природи пошкоджуючого фактора, мають нормалізуючу і захисну дію на організм незалежно від спрямованості фізіологічних зрушень.

Застосування адаптогенів підвищує загальну опірність організму до дії багатьох пошкоджуючих агентів, в тому числі до іонізуючої радіації.

До найбільш ефективних адаптогенів належать препарати елеутерококу колючого, женьшеню, лимоннику китайського, вітаміни, флавоноїди, вітамінно-амінокислотні комплекси, окремі мікроелементи, особливо в поєднанні з вітаміно-амінокислотними комплексами, біостимулятори, коферменти та ряд інших речовин.

Крім продуктів харчування інколи доцільно вживати після консультації з лікарем деякі види різних груп фармакологічних та інших речовин. До таких груп відносять: радіопротектори, блокатори надходження радіонуклідів, блокатори накопичення, декорпоранти.

Швидкість виведення радіонуклідів із організму людини залежить від багатьох чинників, серед яких найбільше значення мають:

- а) фізико-хімічний стан депонованих радіонуклідів;
- б) обмін речовин в органах і тканинах основного їхнього депонування;
- в) функціональний стан систем виділення.

Найбільша кількість радіонуклідів, що надходять в організм, особливо сполук, що важко розчиняються, виводиться через шлунково-кишковий тракт. Сполуки тритію, ^{24}Na , ^{131}I , ^{137}Cs , що добре розчиняються, легко виводяться з організму через нирки, потові залози, слинні залози, через печінку (з жовчю), і з молоком. Ці ж радіонукліди легко долають плацентарний бар'єр, надходячи в організм плода.

Разом з тим дуже важкий механізм виведення радіонуклідів, які депонуються в організмі, зокрема ^{90}Sr , ^{239}Pu (спричиняє хронічні захворювання легень: пневмосклероз).

Таким чином, слід мати на увазі, що наслідки опромінення можуть сумуватись і накопичуватись в організмі на протязі тривалого часу, так як ризик віддалених уражень пов'язаний з можливістю мутацій, які здатні виникнути під впливом додаткових зовнішніх та внутрішніх факторів.

Значному зниженню вмісту радіонуклідів у продуктах харчування сприяє їх правильна технологічна і кулінарна обробка. Починати її доцільно з *механічної очистки* продуктів і харчової сировини від забруднення землею, що містить радіонукліди. Тому всі овочі, фрукти, гриби необхідно добре промивати в проточній воді. Перед миттям деяких овочів (капусти, цибулі, часнику) слід видалити верхнє, найбільш забруднене листя. Після миття коренеплоди очищають від лушпиння і повторно миють проточною водою. Наступний етап обробки – *вимочування* в чистій воді протягом 2-3 годин. Цей метод рекомендується для найбільш забруднених радіонуклідами продуктів (дари лісу: свіжі гриби та ягоди). Вимочування грибів протягом 2 годин сприяє видаленню до 30-40 % радіоактивного забруднення. Єдиним доцільним способом *термічної обробки* радіоактивно забруднених продуктів і харчової сировини є варіння. При відварюванні значна частина радіонуклідів переходить у воду. Отже, в умовах підвищеного забруднення продуктів радіонуклідами використовувати відвари в їжу не рекомендується. Довівши до кипіння і проваривши продукт протягом 5-10 хв. необхідно злити відвар, і продовжувати варити у новій порції води. Цей спосіб прийнятий для приготування перших страв, гарнірів, але не для грибів, при варінні яких доцільно зливати воду 2-3 рази.

М'ясо та рибу перед варінням необхідно попередньо вимочити у воді протягом 1-2 год., потім варити у чистій воді без солі при слабкому кипінні протягом 10 хв. Далі злити воду і залити новою порцією води варити до готовності.

Смажити продукти в зв'язку з підвищеним забрудненням їх радіонуклідами недоцільно. Під час смаження практично всі радіонукліди залишаються у продукті, а через випарювання рідини їх концентрація збільшується. При бажанні після відварювання продукти можна підсмажити,

додаючи приправи. Якщо термічна обробка здійснюється без додавання води, або при невеликій її кількості, то концентрація радіонуклідів у готових продуктах фактично не зміниться, чи навіть підвищиться, що пов'язано із зменшенням у них вмісту води.

Істотного зниження вмісту радіонуклідів у молочних продуктах можна досягти шляхом одержання із незбираного молока жирових та білкових концентратів (сметани, масла, сиру). З молока в сир може переходити лише 10-20% радіонуклідів, а в масло та сметану – ще менше.

Значна частина ^{137}Cs може споживатися з рідкою частиною страв, у яку переходять радіонукліди під час приготування їжі. Тому, виключаючи з меню відвари з овочів і грибів, бульйони з м'яса і риби, молочну сироватку після збирання сметани і приготування домашнього сиру, можна істотно зменшити надходження радіонуклідів до організму. Здійснювати всі ці заходи радіозахисту необхідно, якщо є сумніви щодо якості придбаних продуктів і харчової сировини.

СЛОВНИК ТЕРМІНІВ

Аварія радіаційна – будь-яка незапланована подія на будь-якому об'єкті з радіаційною чи радіаційно-ядерною технологією, якщо при виникненні цієї події виконуються дві необхідні і достатні умови: втрата контролю над джерелом радіації; реальне (або потенційне) опромінення людей, пов'язане з втратою контролю над джерелом радіації.

Аварія радіаційно-ядерна – будь-яка незапланована подія на об'єкті з радіаційно-ядерною технологією, яка відбувається з одночасною втратою контролю над ланцюговою ядерною реакцією і виникненням реальної чи потенційної загрози мимовільної ланцюгової реакції.

Активність – величина, яка визначається відношенням кількості спонтанних перетворень ядер dN за інтервал часу dt .

$$A = dN/dt$$

Одиниця вимірювання – беккерель (Бк), що дорівнює одному розпаду за секунду. Позасистемна одиниця – кюрі (Ки), що дорівнює $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

Альфа-випромінювання (α-випромінювання) – іонізуюче випромінювання, що складається з альфа-частинок (ядер гелію), що випромінюються при радіоактивному розпаді чи при ядерних реакціях, перетвореннях.

Атомна електрична станція (АЕС) – об'єкт з радіаційно-ядерною технологією, призначений для виробництва електричної енергії.

Бета-випромінювання (β-випромінювання) – корпускулярне електронне або позитронне іонізуюче випромінювання з безперервним енергетичним спектром, що виникає при перетвореннях ядер чи нестабільних часточок (наприклад, нейтронів). Характеризується граничною енергією спектра $E\beta$ чи середньою енергією спектра.

Біологічний ланцюг – природні шляхи міграції радіоактивних речовин у екосистемах, що призводять до надходження їх із довкілля в живі організми.

Важкі метали – це кольорові метали з щільністю, більшою, ніж у заліза ($7,874 \text{ кг/дм}^3$) – Pb, Cu, Zn, Ni, Cd, Sn, Bi, Hg.

Внутрішнє опромінення – опромінення тіла від джерела іонізуючого випромінювання, що міститься всередині тіла.

Гальмівні промені – електромагнітне випромінювання, що виникає під час розсіювання (гальмування) швидких заряджених часток радіонуклідів (електронів і позитронів) у кулонівському полі. Використовується при гальмівному рентгенівському випромінюванні в рентгенівській трубці.

Гамма-випромінювання (γ-випромінювання) – короткохвильове електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі $< 0,1 \text{ нм}$, що виникає при розпаді радіоактивних ядер, переході ядер із збудженого стану в основний, при взаємодії швидких заряджених часточок з речовиною, анігіляції електронно-позитронних пар тощо.

Генетичні наслідки опромінення – зміни генетичної структури в клітинах живих організмах викликані опроміненням, які передаються до

нащадків.

Гостра променева хвороба – це загальне захворювання, при якому пошкоджуються всі системи організму.

Деактивація природна – це зменшення зараження радіоактивними речовинами внаслідок перетворення радіоізотопів, що розпадаються в стабільні.

Деактивація штучна – очищення заражених об'єктів від радіоактивних речовин шляхом їх видалення із зараженої поверхні.

Деактивуючі речовини – речовини, які сприяють вилученню радіоактивних забруднень, підвищують ефективність процесу миття, комплексоутворення і розчинності, сорбції та іонного обміну.

Джерело іонізуючого випромінювання – природний, природно-техногенний чи техногенний радіаційно-ядерний об'єкт, що містить радіоактивну речовину, або технічний пристрій, який створює іонізуюче випромінювання.

Доза радіаційна – кількість енергії, виділеної під час дії іонізуючого випромінювання, що викликає пошкодження в живих організмах. Виділяють такі види доз: поглинута, еквівалентна та ефективна.

Допустимий викид (ДВ) – регламентований максимальний рівень газо-аерозольного викиду, при якому сумарна річна ефективна доза розрахована для критичної групи населення. Не повинний перевищувати допустимого ліміту дози.

Допустимий рівень (ДР) – нормативний рівень надходження радіонуклідів в організм людини, а також концентрації радіонуклідів в атмосферному повітрі, воді, ґрунті за календарний рік, розрахований для нормальних умов опромінення із значень існуючих лімітів доз.

Еквівалентна доза – поглинута доза випромінювання, помножена на середній коефіцієнт якості випромінювання для біологічної тканини стандартного складу та на модифікаційний фактор. Одиницями вимірювання в системі СІ є зіверт (Зв), позасистемна одиниця – бер (Бер).

Експозиційна доза гамма-випромінювання – характеризує іонізуючу здатність γ -випромінювання у повітрі, позасистемна одиниця – рентген (Р).

Електромагнітне випромінювання – сукупність усіх змінних станів електричного і магнітного полів, які поширюються у вигляді хвиль. До електромагнітного випромінювання належать ультрафіолетове та γ -випромінювання, рентгенівські промені.

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

Ефекти детерміністичні (нестохастичні) – ефекти радіаційного впливу, що виявляються тільки у випадку перевищення допустимого рівня, а тяжкість наслідків яких залежить від величини отриманої дози. Викликають гостру променевою хворобу, променеві опіки тощо.

Ефекти стохастичні – безпорогові ефекти радіаційного впливу, імовірність виникнення яких існує забудь-яких малих доз іонізуючого

випромінювання та зростає із збільшенням дози.

Ефективний період напіввиведення радіонукліду – час, протягом якого організм втрачає половину радіоактивного елемента.

Захоронення радіоактивних відходів – розміщення радіоактивно збагачених та забруднених відходів у радіаційно-ядерному об'єкті (сховищі), призначеному для зберігання радіонуклідів, без наміру їхнього подальшого використання.

Зовнішнє опромінення – опромінення тіла від джерела іонізуючого випромінювання, що розміщене поза тілом.

Зона аварії (відчуження) – територія, яка залежно від масштабів радіаційної аварії потребує планування, часом закриття та проведення певних реабілітаційних і оптимізаційних заходів. Межі зони аварії у кожному конкретному випадку визначаються органами Державної влади України. У 1986 р. навколо Чорнобильської АЕС створена 30-км зона відчуження.

Ізотопи – атоми одного і того ж хімічного елемента, що мають ядра з однаковим числом протонів, але різною кількістю нейтронів. Відрізняються за загальною кількістю частинок у ядрі.

Ізотопи радіоактивні (радіоізотопи) – радіоактивні атоми з однаковою кількістю протонів у ядрі, наприклад радіоактивні ізотопи йоду – ^{125}I , ^{127}I , ^{129}I , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I і т.д.

Іонізуюче випромінювання – електромагнітне або корпускулярне випромінювання, яке, взаємодіючи з речовиною, безпосередньо або опосередковано викликає іонізацію та збудження її атомів і молекул.

Йодна небезпека – небезпека, яка полягає у підвищеному вмісті короткоживучих радіоізотопів йоду в навколишньому середовищі в перші тижні після радіоактивного викиду.

Категорія А (спеціальний персонал) – особи з числа персоналу, які постійно чи тимчасово працюють безпосередньо з джерелами іонізуючого випромінювання.

Категорія Б (додатковий персонал) – обмежена частина населення (особи, які безпосередньо не працюють з джерелами іонізуючого випромінювання, проте за умовами проживання чи розташування робочих місць можуть піддаватися опроміненню).

Категорія В – решта населення, крім персоналу категорії А і Б.

Коефіцієнт послаблення дії радіації – величина, яка показує, у скільки разів та чи інша перешкода (захисний екран) послаблює дію радіації.

Коефіцієнт якості випромінювання – величина співвідношення екологічного ефекту певного виду іонізуючого випромінювання відрізняється від такої ж дії γ -випромінювання.

Контроль дозиметричний (радіоекологічний) – система вимірювань та розрахунків, спрямована на оцінку доз опромінення окремих осіб або груп людей, а також радіаційного стану природного середовища.

Корпускулярні іонізуючі випромінювання – це елементарні та інші частинки матерії, маса спокою яких відмінна від нуля. До них належать α –

частинки, β – частинки (електрони та позитрони), протони, нейтрони, γ – мезони та інші елементарні частинки.

Космічні промені – потоки заряджених частинок і атомних ядер, які безперервно надходять на Землю з космічного простору. Космічні промені поділяють на первинне космічне випромінювання, яке домінує на значних висотах у атмосфері (20...30 ткм над рівнем моря); й вторинне, що властиве малим висотам.

Космогенні радіонукліди – радіонукліди, які виникають внаслідок ядерної реакції між ядрами хімічних елементів земного походження й частинками космічних променів.

Кратність нагромадження – це відношення отриманої активності радіонуклідів в органах і тканинах до їхнього щодобового надходження в організм.

Критичний орган – орган організму, в якому переважно накопичуються радіонукліди.

Кумулятивні властивості – здатність хімічних речовин нагромаджуватися в тканинах та органах рослин і тварин та посилювати свій негативний вплив на організм.

Латентний (прихований) період – можливість виявлення дії опромінення на екосистеми чи людину через певний час, іноді навіть через десятки років.

Мінімальна абсолютна смертельна доза (МАСД) – величина, яка характеризує граничні можливості захисних механізмів організму людини протистояти пошкодженню, що завдає радіація. На сьогодні вона дорівнює 600 рад.

Моніторинг радіоекологічний – система визначення вмісту радіонуклідів у компонентах природного середовища, доз опромінення населення та їхнє прогнозування з метою здобуття достовірної інформації про радіаційну ситуацію певного регіону чи країни.

Надходження інгаляційне – проникнення радіоактивних речовин через дихальну систему, систему травлення та шкіру людини.

Надходження пероральне – проникнення радіоактивних речовин у систему травлення через ротову порожнину людини.

Нейтронне випромінювання – потік нейтральних частинок, що не несуть електричних зарядів. Вільні нейтрони з періодом напіврозпаду від 1 с до кількох хвилин нестабільні. За швидкістю розрізняють повільні нейтрони (10 eV), середньої швидкості (10-10⁵eV) та швидкі нейтрони (від 0,1 MeV). Швидкі нейтрони виникають під час розщеплення ядер.

Період напіввиведення (ефективний) – час, протягом якого активність радіонуклідів в організмі людини або певній його частині зменшується удвічі в результаті дії екологічних процесів та шляхом радіоактивного розпаду радіонукліда.

Період напіврозпаду – характеристика процесу радіоактивного розпаду, що відповідає часу, протягом якого кількість ядер певного радіонукліду внаслідок спонтанних ядерних перетворень зменшується удвічі.

Питома активність радіонукліда – відношення активності радіонукліда в зразку до маси зразка.

Питома радіоактивність – показник радіаційної безпеки будь-якого матеріалу під час здійснення радіоекологічного контролю, використовується як основний критерій радіаційної забрудненості продуктів харчування, питної води, ґрунту, будівельних матеріалів, сировини і продукції промислових підприємств.

Питома радіоактивність масова – величина, яка визначається як відношення кількості розпадів за секунду до одиниці маси (кг) радіоактивної речовини. Одиниця вимірювання – Бк/кг (Кі/кг).

Питома радіоактивність об'ємна – величина, яка визначається як відношення кількості розпадів за секунду до одиниці об'єму радіоактивної речовини. Одиниця вимірювання – Бк/л або Бк/м³ (Кі/л або Кі/м³).

Повна дезактивація – це комплекс заходів, спрямованих на повне видалення радіоактивного забруднення та його ізоляцію (поховання) з метою виключення загрози зовнішнього опромінення або надходження радіонуклідів у біологічний ланцюжок.

Поводження з радіоактивними відходами – всі види практичної діяльності, що стосуються видобутку, збагачення, перевезення, зберігання чи захоронення радіоактивних відходів.

Поглинута доза випромінювання – кількість енергії випромінювання, поглиненої одиницею маси тіла (тканинами організму), які зазнали опромінення. В системі СІ одиницею поглинутої дози є грей (Гр). Позасистемна одиниця вимірювання – рад.

Поглинута інтегральна доза (опромінення) – середня енергія іонізуючого випромінювання, поглинута певною масою тканин патологічного осередку опромінюваного органу, частини всього тіла – Гр-кг (кг-рад).

Потужність дози – величина, що дорівнює дозі радіації, яка отримана будь-якою речовиною за одиницю часу.

Природний радіаційний фон – іонізуюче випромінювання, що складається з космічного випромінювання та іонізуючого випромінювання природних радіоактивних речовин земної кори, ґрунту, біоти.

Природні радіоекологічні аномалії – території з підвищеною концентрацією природної радіації у довкіллі. В Україні природні аномалії (уранові, радонові, торієві) Українського кристалічного щита.

Пролонговане опромінення – радіоактивне опромінення екосистеми чи людини, коли дозу отримують за час, який значно перевищує тривалість гострого опромінення. Під час пролонгованого опромінення стан екосистеми та людини може істотно змінюватися.

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

Радіаційна аварія – це втрата управління джерелами іонізуючого випромінювання, яка спричинена несправністю устаткування, неправильними

діями персоналу, стихійним лихом тощо, які призвели до опромінювання людей вище за встановлені норми, або до радіоактивного забруднення навколишнього середовища.

Радіаційна безпека – стан техногенних радіаційно-ядерних об'єктів та природного середовища, що забезпечує неперевищення основних дозових лімітів, будь-яке невикордане опромінення та зменшення радіаційних доз персоналу і населення.

Радіаційний захист – сукупність радіаційно-гігієнічних, проектно-конструкторських, технічних та організаційних заходів, спрямованих на забезпечення радіаційної безпеки.

Радіаційний ризик – імовірність того, що в особи внаслідок опромінення виникне певний стохастичний ефект.

Радіоактивне забруднення – наявність або процес поширення радіоактивних речовин у межах радіаційного поля в обсягах, які перевищують їхній природний вміст у довкіллі.

Радіоактивний розпад – процес перетворення одних нестабільних радіонуклідів у інші.

Радіоактивні відходи – матеріальні об'єкти та субстанції, активність радіонуклідів або радіоактивне забруднення яких перевищує межі, встановлені діючими нормами радіаційної безпеки.

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

Радіоактивне забруднення – наявність або розповсюдження радіоактивних речовин понад їх природний вміст у навколишньому середовищі та/чи у тілі людини.

Радіобіологічний ефект – відповідна реакція живої клітини або цілого організму на його опромінення. Виділяють детерміністичні й стохастичні радіобіологічні ефекти: радіостійкість, радіочутливість, метаболічну виживаність, системні радіаційно-біохімічні перетворення і модифікації на рівнях ДНК, РНК, клітин і організмів.

Радіобіологія – наука, яка вивчає дію іонізуючого випромінювання на біологічні системи різних рівнів організації, в тому числі на живі організми та їх угруповання.

Радіоблокатори – речовини, які зменшують, «блокують», надходження в організм радіоактивних речовин.

Радіодекорпатори – речовини, які прискорюють виведення радіоактивних речовин з організму.

Радіоекологічний контроль – контроль за дотриманням норм радіаційної безпеки та іншими джерелами іонізуючого випромінювання, а також здобуття інформації про рівні опромінення людей і про радіаційну обстановку в установах та природному середовищі.

Радіоекологія – наука, що досліджує різноманітні аспекти дії іонізуючого випромінювання на екосистеми.

Радіонуклід – Радіонуклід – радіоактивні атоми з даним масовим числом і атомним номером. Радіонукліди одного й того ж хімічного елемента називаються його радіоактивними ізотопами.

Радіопротектори – речовини, введення яких в організм перед опроміненням або під час опромінення іонізуючою радіацією, знижує ступінь прояву радіобіологічних ефектів, сприяє послабленню радіаційного ураження.

Радіостійкість – ступінь стійкості клітин та тканина бо організмів проти дії іонізуючих випромінювань. Радіоактивність характеризується величиною дози іонізуючого випромінювання, яка призводить до загибелі певної частини опромінених клітин та організмів.

Радіоцезій – загальна кількість радіонуклідів ^{134}Cs і ^{137}Cs , періоди напіврозкладу яких становлять відповідно 2,062 року та 30 років.

Радіочутливість – чутливість біологічних об'єктів на дію іонізуючих випромінювань, що викликають у клітинах організмів різні зміни, ступінь прояву яких неоднаковий.

Рентгенівське промені – електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі 0,01-50 нм. Виникає під час гальмування швидких електронів у речовині (безперервний спектр) або в процесі переходу електронів із зовнішніх електронних оболонок атому на внутрішні (лінійчастий спектр). Якщо атомне ядро уловлює власні (здебільшого внутрішні) електрони, тоді надлишкова енергія випускається як рентгенівські промені, причому одночасно вивільняється один протон (p), наприклад: $^{49}\text{V} \rightarrow ^{49}\text{Ti} + p + \text{рентгенівські промені}$. Джерелами рентгенівських променів є рентгенівська трубка, деякі радіоактивні ізотопи, прискорювачі та накопичувачі електронів.

Репарація – це процес повного або часткового відновлення природної структури ДНК, пошкодженої при γ - опроміненні або хімічними агентами, який властивий клітинам всіх організмів.

Рівень радіації – потужність дози, визначену на відстані 1 м від поверхні зараженого об'єкта.

Синергізм дії радіації – явище, яке полягає в екологічному ефекті багаторазового підсилення радіоактивного забруднення під час його дії одночасно з хімічним і фізичним забрудненнями.

Фонове опромінення – опромінювання від джерел іонізуючого випромінювання, що створюють природний радіаційний фон.

Фактор зміни дози – відношення ефективної дози (наприклад, ЛД₅₀) при опроміненні організму з радіопротектором до ефективної дози, що зумовлює такий самий радіобіологічний ефект у звичайних умовах, тобто без радіопротектора.

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

Щільність забруднення – кількість радіоактивних розпадів атомів за

одиницю часу на одиниці поверхні, в одиниці маси і об'єму. Вимірюється в Кі/км² або Бк/км².

Ядерні відходи – речовини та матеріали, що стали радіоактивними внаслідок функціонування ядерного паливного циклу, не підлягають подальшому використанню та потребують довічної герметичної ізоляції. Ядерні відходи бувають твердими, рідкими, пилогазоподібними і такими, що містять природні й штучні радіонукліди. За потужністю випромінювання бувають низько- та високоактивними.

Ядерний матеріал – будь-який спеціально збагачений радіоактивний матеріал, якій піддається розщепленню з виділенням енергії. Переважно це ядерне паливо, за винятком природного урану і збідненого урану, яке може виділяти енергію шляхом ланцюгового процесу ядерного поділу, та радіоактивні продукти і відходи, за винятком невеликої кількості радіоактивних продуктів, радіоактивних відходів та ядерного палива, що встановлюються нормами, правилами і стандартами з ядерної та радіаційної безпеки.

Ядерний паливний цикл – послідовність виробничих процесів, які повторюються, починаючи від видобування переробки та збагачення палива до видалення й зберігання радіоактивних відходів.

Ядерні установки – об'єкти з виробництва ядерного палива, ядерні реактори, які містять критичні та підкритичні збірки; дослідницькі реактори; атомні електростанції; підприємства і установки, які збагачують та переробляють паливо, а також сховища відпрацьованого палива.

ЛІТЕРАТУРА

Основна

1. Батлук В. А. Радіаційна екологія. Київ: Знання, 2009. 309 с.
2. Гродзинський Д. М. Радіобіологія. Київ: Либідь, 2001. 448 с.
3. Гудков І. М. Радіобіологія: Підручник. Київ: НУБіП України, 2016. 485 с.
4. Гудков І. М., Гайченко В. А., Кашпаров В. О., Кутлахмедов Ю. А. та ін. Радіоекологія: Підручник. Херсон: Олді Плюс, 2013. 467с.
5. Клименко М. О., Клименко О. М., Клименко Л. В. Радіоекологія: підручник. Рівне : НУВГП, 2020. 304 с.
6. Константинов М. П. Радіаційна безпека. Суми: Університетська книга, 2003. 145 с.
7. Краснов В.П., Шелест З.М., Давидова І.В. Використання харчових продуктів лісу на територіях, забруднених радіонуклідами: навчальний посібник. Житомир: Вид. О.О. Євенок, 2019. 84 с.
8. Кутлахмедов Ю. О. Корогодін В. І., Кольтовер В. К. та ін. Основи радіоекології. Київ: Вища школа, 2003. 319 с.
9. Кутлахмедов Ю. О., Войціцький В. М., Хижняк С. В. Радіобіологія: Навч. посібн. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2011. 543 с.
10. Павлович В. М. Фізика ядерних реакторів: навч. посіб. НАН України, Ін-т проблем безпеки АЕС. Чорнобиль (Київ. обл.): Ін-т проблем безпеки АЕС, 2009. 224 с.
11. Радіоекологія: підручник. Шапорєв В.П., Масікевич Ю.Г., Моїсєєв В.Ф. та ін. Чернівці: «Місто» АНТ, 2018. 440 с.
12. Саввін О.В., Сухарева М.В., Мешкова А.Г., Суліменко С.Є. Радіоекологія. Частина I : конспект лекцій. Дніпро : НМетАУ, 2021. 81 с.

Додаткова

13. Гродзинский Д.М. Естественная радиоактивность растений и почв. Киев: Наукова думка, 1995. 205 с.
14. Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr у продуктах харчування та питній воді. Державні гігієнічні нормативи / ГН 6.6.1.1-130-2006. Наказ МОЗ України від 03.05.2006, №256.
15. Закон України «Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи». ВРУ, від 27.02.1991 №791а- XII.
16. Закон України «Про поводження з радіоактивними відходами». ВРУ, від 30.06.1995 №255/95-ВР.
17. Радіологічний стан територій, віднесених до зон радіоактивного забруднення (у розрізі районів); за ред. В.І. Холоші. МНС України у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи. Київ, 2008. 49 с.
18. Собонович Е.В., Бондаренко Г.Н., Кононенко Л.В. и др. Геохимия техногенных радионуклидов. Киев: Наукова думка, 2002. 332 с.
19. Тридцять років Чорнобильської катастрофи: радіологічні та медичні наслідки. Національна доповідь України. Національний науковий центр радіаційної медицини, Національна академія медичних наук, Київ, 2016, 177

с. (http://dazv.gov.ua/images/pdf/national_dopovid_2016.pdf)

20. Чернобыльская катастрофа / Под. ред. В. Г. Барьяхтар. Київ: Наукова думка, 1995. 559 с.

Навчально-методичне видання

Музиченко Оксана

Музиченко Оксана

РАДІОЕКОЛОГІЯ

Конспект лекцій