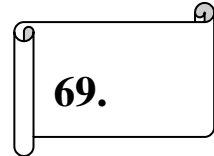


**Міністерство освіти і науки України
Рівненський державний гуманітарний університет
Кафедра екології та збалансованого
природокористування**



**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
для підготовки практичних занять студентів
з дисципліни
«Дія іонізуючого випромінювання»**

для студентів напряму 6.040106 «Екологія,
охорона навколишнього середовища
та збалансоване природокористування»
спеціальності 8.04010605 «Радіоекологія»

Рівне-2015

Упорядники: Д.В. Лико, д. с.-г. н., проф. ;
О.І. Портухай, к. с.-г. н., викл.

Відповідальний за випуск Д.В. Лико , завідувач кафедри

Методичні вказівки для підготовки практичних занять студентів з дисципліни «Дія іонізуючого випромінювання» для студентів напряму 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» спеціальності 8.04010605 «Радіоекологія» / Д. В. Лико, О. І. Портухай. – Рівне : РДГУ, 2015. – 34 с.

Ухвалено на засіданні кафедри екології та збалансованого природокористування РДГУ (протокол № 2 від 11 вересня 2015 р.)

© Д.В. Лико, О. І. Портухай, 2015 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Практична робота 1. Взаємодія електромагнітного та корпускулярного випромінювання з речовиною. Вимірювання дози опромінення	6
Практична робота 2. Соматичні та генетичні радіобіологічні ефекти живих організмів після радіаційного ураження.....	17
Практична робота 3. Дія іонізуючого випромінювання на живі організми	20
Практична робота 4. Використання фізичних та хімічних протипроменевих факторів	24
ЛІТЕРАТУРА	27
ДОДАТКИ	29

Вступ

Метою викладання навчальної дисципліни «Дія іонізуючого випромінювання» є формування у студентів теоретичних знань та практичних навичок, необхідних для роботи у відповідних установах, що здійснюють спостереження, аналіз, оцінку і прогноз впливу радіоактивних елементів на живі організми, а також виявляти причинно-наслідкові зв'язки між дією іонізуючого випромінювання та реакцією живого організму, що супроводжується змінами, які відбуваються протягом його онтогенезу або ушкодженнями, що передаються нащадкам.

Основними завданнями вивчення дисципліни «Дія іонізуючого випромінювання» є здобуття знань щодо видів іонізуючого випромінювання, його біологічної дії на рослини, тварини, віруси, бактерії та людину, а також модифікації радіобіологічних ефектів під впливом різних фізичних і хімічних чинників.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні:

знати

- фізичні основи іонізуючого випромінювання та основні типи радіоактивного розпаду;
- природні та штучні радіоактивні елементи;
- види іонізуючих випромінювань;
- дози випромінювання та одиниці її вимірювання;
- методи реєстрації іонізуючого випромінювання;
- соматичні та генетичні радіобіологічні ефекти;
- близькі та віддалені наслідки радіаційного ураження;
- критичні органи живих організмів, які першими ушкоджуються при опроміненні іонізуючим випромінюванням.

вміти

- визначати поглинуту, експозиційну та еквівалентну дози випромінювання;
- розраховувати потужність дози іонізуючого

випромінювання;

- використовувати детектори ядерних випромінювань для виявлення та ідентифікації типів випромінювання;
- встановлювати морфологічні зміни організму, окремих його органів, анатомічної структури;
- визначати ступені гострої променевої хвороби;
- характеризувати легку, середню та тяжку форми хронічної променевої хвороби;
- встановлювати залежність між скороченням тривалості життя і дозою іонізуючого випромінювання;
- оцінювати радіочутливість та радіостійкість рослин, тварин, бактерій, вірусів аналізуючи напівлегальні та летальні дози організмів;
- використовувати фізичні протипроменеві фактори та хімічні речовини (радіопротектори) для послаблення шкідливої дії на організм іонізуючого випромінювання;
- пояснювати процеси радіаційного ураження та післярадіаційного відновлення.
- прогнозувати наслідки радіаційного ураження та радіобіологічні ефекти.

Практична робота 1

Взаємодія електромагнітного та корпускулярного випромінювання з речовиною. Вимірювання дози опромінення.

Мета роботи: вивчити особливості взаємодії з речовиною електромагнітного та корпускулярного видів іонізуючого випромінювання; розглянути основні одиниці вимірювання доз опромінення.

Теоретичні відомості

Іонізуючими називаються випромінювання взаємодія яких з атомами і молекулами середовища приводить до утворення позитивно і негативно заряджених іонів, тобто до *іонізації речовини*.

Розрізняють два види іонізуючих випромінювань — електромагнітне й корпускулярне. Всі вони мають енергію, достатню для іонізації атомів і молекул речовини Вони невидимі і можуть проникати крізь непрозорі тіла викликаючи різні зміни в біологічних системах. Тому їх називають *проникаючою радіацією*.

Проходячи крізь речовину, іонізуюче випромінювання витрачає свою енергію на іонізацію і збудження зустрічних атомів і молекул і поглинається цією речовиною. Відстань, яку встигає пройти заряджена частинка або квант до того, як її енергія дорівнюватиме нулю, називають *пробігом*. Енергію, яка втрачається зарядженою частинкою або фотоном електромагнітного випромінювання на одиницю їх пробігу в речовині, називають *лінійною передачею енергії* (ЛПЕ); в СІ її виражають в джоулях на метр (Дж/м).

Електромагнітне, або фотонне, іонізуюче випромінювання являє собою потік періодичних електричних коливань, які відрізняються від радіохвиль, інфрачервоного, видимого та ультрафіолетового світла коротшою довжиною хвилі та вищою енергією. До нього відноситься гамма-

випромінювання, а також рентгенівське випромінювання, яке складається з гальмуючого й характеристичного випромінювань.

Електромагнітне випромінювання має квантову природу, його випускають атоми певними порціями (квантами). Фотон не має маси спокою і елементарного заряду. Характерною для нього є стала швидкість руху, яка дорівнює швидкості руху світла; частота електромагнітних коливань, або довжина їх хвилі, з якими пов'язане значення енергії окремих квантів.

Енергія фотона залежить від частоти електромагнітних коливань (ν) або від довжини хвилі випромінювання (λ), зв'язок між якими визначається простим відношенням

$$\nu = \frac{\text{швидкість світла}}{\text{довжина хвилі}} = c/\lambda.$$

У квантовій теорії приймається, що енергія електромагнітного випромінювання прямо пропорційна його частоті:

$$E = h\nu = h' \frac{c}{\lambda} \text{ еВ}$$

де h — стала Планка, одна з основних фізичних констант, яка дорівнює $6,62607 \cdot 10^{-34}$ Дж·с ($6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).

Отже, якщо відома довжина хвилі електромагнітного випромінювання, то можна визначити його енергію, і навпаки, за енергією кванта можна визначити довжину його хвилі, яка лежить в межах 10^{-7} - 10^{-12} м.

Другим джерелом електромагнітного випромінювання є *гальмуюче випромінювання*, яке виникає під час гальмування заряджених частинок в електричному полі ядра атома. Як правило, воно має безперервний енергетичний спектр. Прикладом такого випромінювання можуть бути рентгенівські промені, які виникають на аноді рентгенівської трубки в результаті бомбардування його високоенергетичними електронами. Рентгенівське випромінювання виникає при напрузі 15—250 кеВ, яка подається на анод рентгенівської трубки. Більшість фотонів гальмуючого випромінювання має набагато менше енергії, ніж енергія на аноді; але максимальна

енергія гальмуючого випромінювання дорівнює енергії електрона або напрузі, яка передається на анод.

Довжина хвилі рентгенівського випромінювання 10^{-7} — 10^{-11} м. Умовно рентгенівське випромінювання з довжиною хвилі менш як $2 \cdot 10^{-10}$ м називають *жорстким*, а з довжиною хвилі більш як 10^{-10} м — *м'яким*.

Гамма-кванти, не маючи заряду і маси спокою, зумовлюють послаблену іонізуючу дію, створюють 2-6 пар іонів на 1 см пробігу в повітрі. Залежно від величини енергії вони при взаємодії з речовиною можуть зумовлювати такі ефекти:

а) фотоелектричне поглинання — вибивання електронів з внутрішньої оболонки атома з передачею їм усієї своєї енергії;

б) комптонівський ефект — вибивання електронів із зовнішньої електронної оболонки атома з передачею їм частини своєї енергії і *зміню напрям руху фотона* — розсіювання γ -квантів;

в) виникнення пари — перетворення γ -кванта під дією сильного електричного поля ядра атома в пару електрон-позитрон з наступною їх *анігіляцією*.

Вид взаємодії γ -квантів з речовиною визначається величиною їх енергії та атомним номером речовини, що опромінюється. По всіх трьох видах взаємодії γ -випромінювання з речовиною в кінцевому підсумку утворюються швидкі вторинні електрони, які створюють основну іонізацію атомів середовища, а також характеристичне випромінювання.

Оскільки ймовірність зустрічі γ -квантів з електронами і ядром атома мала, вони мають велику проникаючу здатність. У повітрі γ -кванти проходять шлях, що становить кілька сот метрів, у деревині — більш як 25 см, у свинці — понад 5 см, у воді — десятки метрів, а живі організми вони пронизують наскрізь і є для них небезпечними як джерело зовнішнього опромінення. ЛПЕ γ -квантів з енергією 1,3 МеВ дорівнює 0,3 кеВ, а при енергії 250 кеВ вона становить 2,2 кеВ/мкм. У ролі джерела γ -квантів у біологічних дослідах використовують радіонукліди ^{60}Co та ^{137}Cs .

Після проходження крізь речовину інтенсивність потоку γ -випромінювання послаблюється. Лінійне послаблення γ -випромінювання є досить складним процесом, який залежить від енергії кванта, густини речовини, що опромінює. Чим вища густина цієї речовини (її атомна маса) і менша енергія кванта, тим інтенсивніше він поглинається. Тому для захисту від γ -випромінювання застосовують речовину і матеріали з великою атомною масою — свинець, сталь та ін.

Корпускулярне випромінювання — це потік елементарних частинок, або корпускул, які характеризуються такими величинами, як маса спокою, наявність або відсутність заряду, початкова енергія, яка залежить від швидкості руху частинок. До них належать β -частинки, або електрони ядерного походження, позитрони, α -частинки, протони, нейтрони, пі-мезони, дейтрони - ядра ізотопу водню дейтерію, багато інших частинок, маса спокою яких відрізняється від нуля.

Розглянемо лише ті елементарні частинки, які мають значення в радіобіології та радіоекології — α -, β -частинки, нейтрони.

Альфа-частинки — це потік позитивно заряджених ядер атомів гелію, які складаються з двох протонів і двох нейтронів, мають подвійний заряд атомну масу 4,003 а. о. м. та швидкість польоту у вакуумі $9,25 \cdot 10^3$ км/с. Їх енергія коливається в межах 2-11 МеВ. Енергетичний спектр α -частинок монохроматичний або має невеликий набір дискретних енергій, характерний для кожного елемента з альфа-випромінюванням.

Пробіг α -частинок у речовині пропорційний її енергії і обернено пропорційний густині речовини. Свою енергію α -частинки затрачають переважно на непружні співудари з електронами речовини і рідше — на пружні співудари з ядрами. При пружних співударах кінетична енергія часто не губиться, а зміщується тільки траєкторія її руху, тобто відбувається розсіювання α -частинок. При непружному співударі (розсіюванні) кінетична енергія α -частинки втрачається на іонізацію та збудження атомів і молекул, а напрям її руху

практично не змінюється. Отже, α -частинка рухається прямолінійно

Енергія виникнення однієї пари іонів у повітрі становить близько 34 еВ, так що при проходженні α -частинки урану-238 з енергією 4,2 МеВ до моменту її поглинання виникає близько 10^5 пар іонів. На кінці шляху α -частинки, де вона має меншу енергію, питома іонізація досягає більшого значення (близько 7000 пар на 1 мм шляху), ніж на початку шляху (3000 пар іонів на 1 мм шляху).

Для α -частинок максимальне значення ЛПЕ досягає 260 кеВ/мкм. Шлях пробігу α -частинки до повної втрати енергії досягає в повітрі 10 см, у воді, біологічній тканині – 0,1 - 0,015 мм. Витративши свою енергію, α -частинка приєднує два електрони і перетворюється в атом гелію.

Бета-частинки — потік негативно заряджених електронів ядерного походження, які випускаються ядрами радіоактивних елементів при їх β -розпаді. Їх маса дорівнює масі електрона (0,00548 а. о. м., або $9,106 \cdot 10^{-11}$ г). Енергія β -частинок різних природних і штучних радіоактивних елементів має широкі межі від 0,0015-0,05 МеВ (м'яке випромінювання β -частинок) до 3, рідше 12 МеВ (жорстке β -випромінювання). При β -розпаді ядра разом з β -частинкою виділяється антинейтрино і енергія зв'язку ядра розподіляється між ними мимовільно, тому величина енергії β -частинок одного і того ж елемента неоднорідна, їх енергетичний спектр суцільний і безперервний. Середня енергія β -частинок у спектрі дорівнює приблизно $1/3$ максимальної енергії і позначається E .

При взаємодії з середовищем β -частинка витрачає свою енергію на іонізацію і збудження зустрічних атомів (іонізаційні втрати) та на виникнення гальмівного випромінювання (радіаційні втрати), які збільшуються із зростанням атомної маси опроміненої речовини. Їх шлях у речовині звивистий, оскільки вони легко змінюють напрям руху під дією електричних полів зустрічних атомів. Пробіг β -частинок досягає в повітрі 25 м, у біологічній тканині — до 0,85 см. Вони створюють 50-100 пар іонів на 1 см шляху в повітрі. ЛПЕ β - частинок з середньою

енергією 0,4 МеВ дорівнює 0,25 кеВ/мкм. Вона збільшується в кінці пробігу.

β -частинки середніх енергій повністю поглинаються шаром алюмінію товщиною 5 мм і органічним склом. У зв'язку з, розсіяним типом іонізації повного захисту при роботі з джерелами β -випромінювання не існує. При зовнішній дії великої кількості β -частинок можуть виникнути β -опіки листків рослин і шкіри, кришталика ока. Особливо небезпечні вони при потраплянні в організм.

Нейтрони — це електрично нейтральні частинки ядер атомів усіх елементів, крім вуглецю. Вільні нейтрони виникають у природі або їх добувають у лабораторіях у результаті ядерних реакцій. Взаємодіючи з ядрами, нейтрони можуть розсіюватись на ядрах інших елементів (пружне і непружне розсіювання), зумовлювати реакції поділу важких ядер активації, зумовлюючи інколи утворення радіоактивних ізотопів.

При пружному розсіюванні на ядрах вуглецю, азоту, кисню та інших елементів, які входять до складу біологічної тканини, нейтрони втрачають близько 10-15 % енергії, тоді як при зіткненні з ядрами водню вони практично залишаються такими самими, як і нейтрони; енергія нейтронів зменшується удвічі, передаючись протону віддачі. Як результат такої взаємодії утворюються сильно іонізуючі протони.

У біологічних об'єктах нейтрони можуть спричинити наведену радіоактивність, що становить серйозну небезпеку як фактор біологічної дії.

Передача енергії нейтронів опромінованій речовині відбувається не прямо, а через утворення вторинних частинок (переважно ядер віддачі, β -частинок, γ -квантів). Отже, кінцевий біологічний ефект взаємодії нейтронів з речовиною пов'язаний з іонізацією, яку зумовлюють ці частинки і кванти.

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

Дози випромінювання

Мірою дії будь-якого іонізуючого випромінювання на біологічні об'єкти є величина поглинутої енергії випромінювання, або *доза випромінювання* — величина поглинутої енергії випромінювання на одиницю маси опроміненої речовини. Розрізняють три види доз:

1) поглинута — кількість енергії будь-якого виду випромінювання, що поглинається одиницею маси;

2) експозиційна, або фізична, — кількість енергії рентгенівського, або випромінювання, що поглинається одиницею маси повітря;

3) еквівалентна, або біологічна, — характеризує оцінку дії різних видів випромінювань на організм людини. Вона введена для нормування дозових навантажень при зовнішньому і внутрішньому опроміненнях людини і для прогнозу біологічних ефектів.

Основною величиною, прийнятою в дозиметрії для оцінки міри дії випромінювання, є поглинута доза випромінювання.

Поглинута доза — це відношення величини енергії випромінювання (E), що поглинається деяким об'ємом середовища, до маси (m) цього об'єму, тобто $D_p = E/m$. Одиницею поглинутої дози в СІ є джоуль на кілограм (Дж/кг) або грей (Гр).

Грей дорівнює поглинутій дозі іонізуючого випромінювання, при якій речовині масою 1 кг передається енергія випромінювання 1 Дж (1 Гр = 1 Дж/кг).

Позасистемною одиницею поглинутої дози випромінювання є 1 рад, який дорівнює поглинанню 100 ерг енергії будь-якого іонізуючого випромінювання в 1 г опроміненої речовини: 1 рад = 100 ерг/г = 10^{-2} Дж/кг = 10^{-2} Гр; 1 Гр = 100 рад.

Експозиційна доза випромінювання визначається рівнем іонізації повітря або кількістю енергії фотонного випромінювання, яка використана на утворення в одиниці маси або об'єму повітря іонів, що несуть електричний заряд певної величини. Термін «експозиційна доза» встановлено для фізичної характеристики фотонного випромінювання з енергією від 1 кеВ до 3 МеВ.

В СІ одиницею експозиційної дози є кулон на кілограм (Кл/кг). Ця одиниця дорівнює експозиційній дозі, при якій у повітрі масою в 1 кг фотонне випромінювання утворює іони, що несуть електричний заряд в 1 Кл кожного знака.

Позасистемною одиницею експозиційної дози є рентген (Р) — експозиційна доза фотонного випромінювання, при якій в 1 см³ повітря (0,001293 г) утворюються іони, що несуть одну одиницю електростатичного заряду кожного знака. При цьому мається на увазі, що заряджені частинки, які утворились під дією фотонного випромінювання, витрачають всю енергію на іонізацію. Дозі 1 Р відповідає утворення $2,08 \cdot 10^9$ пар іонів в 1 см³ повітря (при 0°C та 760 мм рт. ст.).

Між одиницями рентген і кулон на кілограм існує таке співвідношення: $1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р}$;

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}.$$

Враховуючи середню енергію утворення іонів, легко встановити енергетичний еквівалент рентгена.

Поглинута й експозиційна дози випромінювання пов'язані між собою таким співвідношенням; 1 Р у повітрі відповідає 0,88 рад, для біологічної тканини $1 \text{ Р} = 0,96 \text{ рад}$. Для того щоб перейти від експозиційної дози, яку вимірюють приладами, до поглинутої дози, треба величину дози в рентгенах помножити на коефіцієнт 0,96. Якщо, наприклад, експозиційна доза дорівнює 25 Р то поглинута становитиме 24 рада ($25 \text{ Р} \cdot 0,96 = 24$).

Експозиційну дозу вимірюють дозиметричними приладами. Поглинуту дозу при внутрішньому опроміненні можна визначити тільки за допомогою розрахунків, якщо відомі радіоактивний ізопоп, його вміст в органах і тканинах організму, тривалість опромінення.

При наявності в об'єкті опромінення одночасно α -, β - і γ -випромінюючих ізопопів окремо обчислюють дозу кожного виду випромінювання і добути результати сумують.

Для розрахунку потужності поглинутої дози (Р) в 1г тканини від β -випромінюючих ізопопів з відомою активністю Д. М. Гродзинський (1984) запропонував таку формулу:

$$P = \frac{3,7 \cdot 10^4 \cdot E_{\beta} A}{6,22 \cdot 10^7} = 0,693 \cdot 10^{-3} \cdot E_{\beta} A, \text{ рад/с,}$$

де $3,7 \cdot 10^4$ — кількість розпадів за секунду в одному мікрокурі; E_{β} — середня енергія β -частинки; A — активність ізотопу, мкКі; $6,22 \cdot 10^7$ — енергетичний еквівалент 1 рада, МеВ.

Приклад: визначити потужність поглинутої дози в 1 г тканини від інкорпорованого в ній 1 мкКі радіонуклідів ^{14}C (середня енергія ^{14}C дорівнює 0,0186 МеВ).

Розв'язання: $P = 0,693 \cdot 0,0186 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 0,011 \cdot 10^{-3} \text{ рад/с}$

Еквівалентна, або біологічна, доза випромінювання. При опроміненні живих організмів виникають ефекти, які визначають ступінь радіаційної небезпеки. Для будь-якого виду іонізуючого випромінювання радіобіологічні ефекти, що спостерігаються, здебільшого прямо пропорційні поглинутій енергії. Але при одній і тій самій поглинутій дозі в тканинах організму біологічний ефект неоднаковий для різних видів іонізуючого випромінювання. Тому знання величини поглинутої дози недостатньо для оцінки міри радіаційної небезпеки. Прийнято порівнювати, біологічні ефекти, зумовлені будь-якими видами іонізуючих випромінювань, з біологічними ефектами, що спричинені рентгенівським випромінюванням, з енергією 220 кеВ і ЛПЕ, яка дорівнює 3 кеВ/мкм.

Рентгенівське випромінювання з енергією 220 кеВ прийнято називати *контрольним*, а для порівняльної оцінки дії іонізуючих випромінювань на живий організм введено поняття *відносна біологічна ефективність* (ВБЕ) — відношення поглинутої дози контрольного випромінювання (D_p), що зумовлює певний біологічний ефект, до поглинутої дози даного виду випромінювання (D_x), яка спричинює той самий ефект:

$$\text{ВБЕ} = D_p / D_x.$$

Поняття ВБЕ рекомендується використовувати тільки в радіобіології, оскільки біологічний ефект залежить також від ряду характеристик організму, умов опромінення і розподілу поглинутої дози в різних органах і тканинах.

Для оцінки ефективності випромінювань в умовах великих об'єктів введено поняття *коефіцієнта якості* (К). Цей коефіцієнт

показує, у скільки разів радіаційна небезпека даного виду випромінювання більша, ніж контрольного рентгенівського випромінювання.

Значення коефіцієнта якості і ВБЕ випромінювань з різними величинами ЛПЕ наведено в додатку 1, з якої видно, що ВБЕ та K близькі, але не еквівалентні.

Еквівалентна доза (D_H) — це добуток поглинутої дози на середній коефіцієнт якості іонізуючого випромінювання в елементарному об'ємі біологічної тканини стандартного складу:

$$D_H = D_R K.$$

Значення коефіцієнтів якості K для різних видів випромінювань наведено у додатку 2.

Одиниця еквівалентної дози в СІ — зіверт (Зв), що визначає кількість енергії будь-якого виду іонізуючого випромінювання, поглинуту 1 кг біологічної тканини, при якій спостерігається такий самий біологічний ефект, що й при поглинутій дозі в 1 Гр контрольного випромінювання.

Позасистемна одиниця еквівалентної дози — бер (біологічний еквівалент рентгена). Це енергія будь-якого виду випромінювання, поглинута 1 г біологічної тканини, при якій спостерігається такий самий біологічний ефект, що й при поглинутій дозі 1 рад контрольного випромінювання. Співвідношення між одиницями еквівалентної дози такі:

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бер}; 1 \text{ бер} = 10^{-2} \text{ Зв}.$$

Розподіл еквівалентної дози в тканині при зовнішньому опроміненні організму досить нерівномірний. Для γ -випромінювання найбільша еквівалентна доза створюється поблизу поверхні тіла, для нейтронів — на глибині кількох сантиметрів від поверхні.

У біологічному відношенні важливо мати інформацію не тільки про величину дози, одержаної опроміненним об'єктом, а й про швидкість її нагромадження, тому що однакова доза, одержана за різні проміжки часу, може спричинити неоднакові ушкодження. Для цього було введено поняття потужності дози.

Потужність дози (P) — це доза випромінювання D , віднесена до одиниці часу:

$$P = D/t.$$

Потужність дози прямо пропорційна швидкості нагромадження дози опромінення. В СІ одиницями потужності поглинутої дози є греї за секунду (Гр/с), експозиційної дози — ампер на кілограм (А/кг), еквівалентної дози — зіверт за секунду (Зв/с). Позасистемні одиниці потужності дози: поглинутої — рад за секунду (рад/с); експозиційної — рентген за секунду (Р/с); еквівалентної — бер за секунду (бер/с).

Залежно від потужності дози розрізняють гостре і пролонговане, або хронічне, опромінення. *Гострим* вважають короткочасне опромінення протягом не більше 4 діб, *пролонгованим* — довгострокове опромінення протягом десятків діб, тижнів і навіть років. У першому випадку потужність дози висока (десятки, сотні греї за годину), в другому — низька (мізерні частки греї за годину).

Розрізняють також *одноразове і багаторазове (фракціоноване) опромінення*. При одноразовому опроміненні доза передається об'єкту опромінення протягом одного безперервного процесу, а при багаторазовому — розділяється на кілька фракцій, які чергуються з періодами, протягом яких організм не опромінюється.

Завдання

1. Розглянути γ -випромінювання, його види. Що відбувається при взаємодії γ -випромінювання з ядрами?
2. Описати гальмуєче випромінювання та навести його приклади.
3. Навести ефекти, що виникають при взаємодії з речовиною електромагнітного випромінювання в залежності від величини енергії.
4. Охарактеризувати проникаючу здатність γ -квантів.
5. Описати корпускулярне іонізуюче випромінювання.
6. Порівняйте шляхи пробігу у повітрі та біологічні тканині α -частинки, β -частинки та нейтронів.
7. Що являє собою поглинута доза? Одиниці вимірювання.
8. Дати визначення експозиційної дози випромінювання?

9. Охарактеризувати біологічну дозу випромінювання.
10. Розкрити зміст поняття «потужність дози». Назвати види опромінення в залежності від потужності дози.

Питання для самоперевірки

1. Визначення поняття «радіоактивність».
2. Яке випромінювання називається іонізуючим? Склад іонізуючих променів.
3. Описати α -розпад.
4. Що відбувається при $\beta(-)$ -розпаді, його види?
5. Що являє собою К-захоплення?
6. Дайте визначення поняття «активність радіонукліда».
7. Які радіоактивні елементи відносяться до природних?
8. Які радіоактивні елементи відносяться до штучних?

Практична робота 2

Соматичні та генетичні радіобіологічні ефекти живих організмів після радіаційного ураження

Мета роботи: вивчити основні види соматичних радіобіологічних ефектів та визначити причини виникнення генетичних у живих організмах після радіаційного ураження.

Теоретичні відомості

Радіобіологічний ефект — це реакція живого організму на дію іонізуючого випромінювання, що характеризується зміною деяких його ознак та властивостей. Звичайно виділяють два класи радіобіологічних ефектів — соматичні й генетичні. *Соматичними радіобіологічними ефектами* є зміни, що відбуваються в організмі протягом його онтогенезу — періоду індивідуального розвитку; *генетичними* — ушкодження, що передаються нащадкам, тобто реалізуються в наступних поколіннях.

Серед соматичних ефектів розрізняють такі 5 основних типів: радіаційна стимуляція, морфологічні зміни, променева

хвороба, прискорення старіння, що призводить до скорочення тривалості життя, і загибель. Генетичні, або мутагенні, ефекти утворюють самостійний клас.

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

Морфологічні зміни — це зміни під впливом іонізуючого випромінювання зовнішнього вигляду організму, окремих його органів, анатомічної структури — ознак, що відрізняють його від батьківської форми. Однак треба підкреслити, що ці ознаки не спадкові, а відхилення від норми, потворства, химерність існують лише в поколінні опромінених організмів.

Променева хвороба — це захворювання, що виникає при дії іонізуючих випромінювань на живий організм і характеризується конкретним комплексом ознак свого прояву. Розрізняють гостру й хронічну форми променевої хвороби.

Гостра променева хвороба тварин виникає звичайно при одноразовому загальному опроміненні. Хронічна променева хвороба тварин — форма променевого ураження, що розвивається внаслідок тривалого опромінення організму малими дозами загального опромінення або від радіоактивних речовин, що потрапили всередину.

Променева хвороба рослин також характеризується відповідним комплексом неспецифічних ознак. Першою ознакою, яка є прямим наслідком затримки поділу клітин, є гальмування росту рослини або окремих її органів під дією випромінювання. Але звичайно, як і інгібування клітинного поділу, гальмування росту є вже вторинною реакцією рослини на опромінення. Вони є наслідком порушення обміну речовин в результаті ушкодження ферментативних систем, порушення регуляторних зв'язків, що визначають підпорядкованість функцій окремих органів.

Існує пряма кількісна залежність між скороченням тривалості життя і дозою іонізуючого випромінювання. Проте, як вважають геронтологи — вчені, що вивчають закономірності

старіння організмів, прискорення старіння і скорочення тривалості життя не обов'язково повинні бути неминучими або наслідком один одного. Справді, як зазначалося в попередньому розділі, скорочення тривалості життя може бути наслідком променевої хвороби, як і індукції лейкозів, пухлин та інших причин, але воно ніяк не пов'язане із справжнім старінням.

При високих дозах опромінення, коли видужання від променевої хвороби неможливе, настає загибель, або смерть, організму — припинення його життєдіяльності як цільної системи.

Соматичні ефекти, розглянуті вище, виявляють тільки у безпосередньо опроміненому організмі. 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.

Залежно від часу прояву після опромінення радіобіологічні ефекти поділяють на близькі та віддалені. До *близьких ефектів* належать ті, які виявляються в перші години, дні, тижні, місяці після опромінення. Віддалені наслідки реєструються у більш пізні строки. До близьких наслідків радіаційного ураження відносять радіаційну стимуляцію, яка виявляється одразу після опромінення; більшість морфологічних змін у тканинах і окремих органах, що виникають протягом перших днів, тижнів післярадіаційного періоду; гостру променевою хворобу всіх ступенів тяжкості, що розвивається протягом 1-1,5 місяця, і загибель.

Віддаленими наслідками радіаційного ураження ссавців вважають такі морфологічні зміни, як злоякісні новоутворення — лейкози, ракові пухлини; скорочення тривалості життя і прискорення старіння, що реалізується, як правило, в останні періоди життя; генетичні ефекти.

Завдання

1. Дайте визначення поняття «радіобіологічний ефект». Назвіть класи радіобіологічних ефектів.

2. Що являє собою радіаційна стимуляція? У чому вона проявляється?
3. Користуючись додатку 3 порівняйте стимулюючі дози γ -опромінення: насіння та проростів різних видів рослин; клітин людини в культурі, поросят, найпростіших, комах, мікроорганізмів. Зробити висновки.
4. Морфологічні зміни, як вид соматичних радіобіологічних ефектів. Причини їх виникнення.
5. Назвіть ознаки морфологічних змін у рослин та тварин.
6. Що таке променева хвороба? Порівняти комплекс ознак прояву променевої хвороби у тварин та рослин.
7. Заповнити таблицю

Основні періоди гострої форми променевої хвороби

Назва періоду	Тривалість	Ознаки

8. Охарактеризуйте форми хронічної променевої хвороби тварин.
9. Вплив випромінювання на прискорення старіння і скорочення тривалості життя.
10. У яких випадках відбувається загибель організмів при опроміненні? Порівняти загибель рослинного і тваринного організмів.
11. Назвати причини виникнення генетичних радіобіологічних ефектів. Причини виникнення мутацій.
12. Що розуміють під близькими та віддаленими біологічними ефектами.

Практична робота 3

Дія іонізуючого випромінювання на живі організми

Мета роботи: вивчити дію іонізуючого випромінювання на рослини, тварини, бактерії, віруси, організм людини.

Теоретичні відомості

У радіобіології та радіоекології рівноправними є два терміни, що характеризують відношення організму до іонізуючих випромінювань — радіочутливість і радіостійкість. Вони взаємозв'язані і з різних боків віддзеркалюють одне і те саме явище. Якщо організм має високу радіочутливість, то він характеризується низькою радіостійкістю, і навпаки. Проте ці терміни треба розрізняти. *Радіочутливість організму* — це його здатність реагувати на мінімальні дози іонізуючої радіації, відчувати за допомогою своїх систем незначні рівні опромінення. *Радіостійкість* — це здатність організму переносити високі рівні опромінення.

Радіочутливість як рослин, так і тварин визначається чутливістю до іонізуючого випромінювання тканин, клітини яких перебувають у стані поділу. Хоч в організмі їх не більше кількох відсотків від усієї маси клітин, але саме вони внаслідок своєї найбільшої ураженості радіацією відповідальні за реакцію на дію - випромінювань. Тому вони дістали назву критичних органів.

Критичні органи — це життєво важливі органи або системи організму, які першими ушкоджуються і виходять з ладу при опроміненні іонізуючим випромінюванням, що зумовлює всі радіобіологічні ефекти, аж до загибелі організму.

Іонізуюче випромінювання на рослини діє по-різному. Найбільш радіочутливі рослинні організми — лілейні, соснові, найбільш радіо стійкі — деякі види синьозелених водоростей.

З відомостей про радіочутливість тварин важливими для людини є насамперед дані про представників класу хребетних — ссавців. Наявні дані про їх представників стосуються передусім дрібних лабораторних тварин — мишей, щурів, кролів, хом'яків, собак. Менше відомостей є про радіочутливість великих тварин (корів, коней, верблюдів), дослідження яких пов'язані із значними витратами. Приблизними є також дані про радіочутливість людини, що ґрунтуються на випадкових даних, здобутих під час аварій, в умовах яких точна дозиметрія просто неможлива.

Найнижчу радіочутливість серед живих організмів мають бактерії роду мікрококкус, виявлені в каналі одного атомного реактора, де потужність дози опромінення становить близько 12 Гр/с, або понад 1 млн Гр/добу. Найбільша радіостійкість у вірусів — для них ЛД₅₀ коливається від 4000 до 8000 Гр. У стані спокою їх радіостійкість набагато вища.

При вивченні дії іонізуючого випромінювання на організм людини були виявлені наступні особливості.

1. У людини відсутні органи чуття, що реагують на іонізуюче випромінювання, тому його дія на організм людини відбувається непомітно.

2. Висока ефективність поглинутої енергії. Навіть невелика кількість поглинутої енергії іонізуючого випромінювання може спричинити суттєві біологічні зміни в організмі людини.

3. Наявність прихованого (інкубаційного) періоду виявлення дії іонізуючого випромінювання. Цей період, який ще часто називають періодом уявного благополуччя, тим менший, чим вища доза опромінення.

4. Дія малих доз іонізуючого випромінювання може накопичуватись (кумулятивний ефект).

5. Іонізуюче випромінювання діє не лише безпосередньо на людину, а й на її потомство (генетичний ефект).

6. Різні органи організму людини мають різну чутливість до іонізуючого випромінювання (додаток 5).

7. Ступінь дії іонізуючого випромінювання залежить від індивідуальних особливостей організму людини.

8. Наслідки опромінення істотно залежать від його дози та частоти. Одноразова дія іонізуючого випромінювання великої дози зумовлює більші зміни в організмі людини, ніж його фракціонована дія.

9. Залежно від еквівалентної дози опромінення та індивідуальних особливостей людини зміни в її організмі можуть набути незворотного характеру.

Дія іонізуючого випромінювання на організм людини може бути зовнішньою, внутрішньою (якщо радіоактивна речовина потрапила в організм людини при вдиханні чи з їжею) та

комбінованою. Ступінь радіаційного ураження залежить від виду випромінювання, тривалості та дози опромінення, фізико-хімічних властивостей радіоактивної речовини та індивідуальних особливостей організму людини (додаток 6).

Допустимі дози іонізуючого випромінювання регламентуються Нормами радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Згідно з цим нормативним документом визначені наступні категорії опромінюваних осіб:

- категорія А - особи, що постійно чи тимчасово працюють з джерелами іонізуючого випромінювання;

- категорія Б - обмежена частина населення (особи, що не працюють безпосередньо з джерелами випромінювання, але за умовами проживання або розташування робочих місць можуть підлягати опроміненню);

- категорія В - населення області, країни.

За ступенем чутливості до іонізуючого випромінювання встановлено три групи критичних органів (тканин) організму, опромінення яких спричинює найбільшу шкоду здоров'ю людини, що наведені у додатку 7.

Умови безпеки при використанні радіоактивних ізотопів у промисловості передбачають розробку комплексу захисних заходів та засобів не лише стосовно осіб, які безпосередньо працюють з радіоактивними речовинами, але й тих, хто знаходиться у суміжних приміщеннях, а також населення, що проживає поруч з небезпечним підприємством (об'єктом). Засоби та заходи захисту від іонізуючого випромінювання поділяються на: організаційні, технічні, санітарно-гігієнічні та лікувально-профілактичні.

Завдання

1. Порівняти поняття радіочутливість та радіостійкість організмів.
2. Як впливають малі дози іонізуючих випромінювань на живі організми.
3. Які органи називають критичними?
4. Які рослини є найбільш радіочутливими? Користуючись додатком 4 вкажіть які рослини можна використовувати

- як індикатори радіаційного забруднення серед деревних рослин, а які серед сільськогосподарських культур.
5. Як впливає іонізуюче випромінювання на рослинні угруповання?
 6. Порівняти радіочутливість різних видів тварин.
 7. Порівняти радіочутливість бактерій та вірусів.
 8. Назвати особливості дії іонізуючого випромінювання на організм людини.
 9. Які порушення в організмі людини можуть виникати в залежності від поглиненої сумарної дози?
 10. Які категорії опромінених осіб виділяють згідно з Нормами радіаційної безпеки України?
 11. Які три групи критичних органів (тканин) організму людини встановлено за ступенем чутливості до іонізуючого випромінювання? Розподілити наступні органи людини на три групи за чутливістю до дії іонізуючого випромінювання: усе тіло, щитоподібна залоза, статеві органи, нирки, кисті, червоний кістковий мозок, кісткова тканина, шкіра, м'язи, литки, легені, жирова тканина, печінка, селезінка, шлунково-кишковий тракт, кришталік ока, передпліччя, стопи.
 12. Які заходи захисту від іонізуючого випромінювання відносять до організаційних та технічних?
 13. Що включають в себе санітарно-гігієнічні та лікувально-профілактичні заходи захисту від іонізуючого випромінювання.

Практична робота 4

Використання фізичних та хімічних протипроменевих факторів

Мета роботи: вивчити особливості використання фізичних та хімічних протипроменевих факторів для зміни радіобіологічних ефектів у живих організмах.

Теоретичні відомості

Тривалий час серед радіобіологів була поширена думка - що запобігти радіаційному ураженню, змінити його наслідки неможливо. І хоч багато хто з дослідників ще на ранніх етапах розвитку радіобіології нерідко спостерігали і описували зміну (модифікацію) радіобіологічних ефектів під впливом різних фізичних (температури, вологості, освітлення, газового складу атмосфери) і хімічних чинників (різних речовин та сполук), належного пояснення їм вони не знаходили.

Противопроменевий біологічний захист — це послаблення шкідливої дії на організм іонізуючого випромінювання в результаті впливу на нього перед опроміненням або під час опромінення яким-небудь чинником фізичної природи чи хімічної речовини.

Ступінь прояву радіобіологічних ефектів значною мірою визначається такими факторами навколишнього середовища, як газовий склад атмосфери, температура, вологість, освітлення та ін. Вони називаються *фізичними*, бо належать до явищ, які характеризують фізичний стан біосфери і які переважно вивчає фізика.

Радіаційне ураження організму дуже залежить від вмісту в атмосфері кисню, оскільки при зниженні його концентрації зменшується радіаційне ураження. Це явище дістало назву «кисневого ефекту».

Максимум радіаційного ураження виявляється звичайно при об'ємній частці кисню в атмосфері 20—21 %. При зменшенні концентрації кисню (гіпоксії) ступінь противпроменевого захисту організму наростає і досягає максимуму при повній відсутності кисню (аноксія).

Кількісним вираженням зміни дії випромінювання на живий організм під впливом кисню є величина, що називається *коефіцієнтом кисневого підсилення* (ККП). Це відношення ефективної дози при опроміненні організму в умовах гіпоксії до ефективної дози, що зумовлює такий самий радіобіологічний ефект при опроміненні в повітрі. Наприклад, якщо ЛД₅₀ в

першому випадку становить 7,5 Гр, а в другому — 3 Гр, то $KKP=7,5 : 3=2,5$.

Вплив температури на ступінь прояву радіаційного ураження — складний процес, в якому поєднуються і деякі прямі реакції впливу температури на розвиток радіаційних реакцій, і посередні, зумовлені дією температури на окремі фізіологічні процеси. Тобто, з одного боку, зміна температури може впливати на хід реакцій променевого ураження, а з іншого — на інтенсивність обміну речовин, тим самим сприяючи зміні радіочутливості організму.

Сонячне світло відіграє важливу роль у житті живих організмів, особливо рослин. Відомі тисячі видів тварин, у тому числі і ссавців, що живуть без світла, але для рослин — це вкрай рідкісний виняток. Тому практично всі дані про залежність радіочутливості від освітлення і якості світла (його складу) стосуються організмів, в яких відбувається фотосинтез,— рослин.

У 1949 р. практично водночас радіобіологи З. Бак і А. Ерве із Бельгії і Г. Патт із США повідомили наукову громадськість світу про дві хімічні сполуки, введення яких лабораторним тваринам перед рентгенівським опроміненням підвищує їх виживання. Перші виявили, що таку дію має добре відома дуже сильна отрута ціанід натрію, ін'єкція якого мишам у дозі, в кілька разів меншій за летальну, безпосередньо перед опроміненням знижувала ступінь радіаційного ураження в 1,5 раза. Г. Патт навів дані про широко відому біологам і медикам амінокислоту цистеїн, яка приблизно такою самою мірою, як і ціанід натрію, 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 опроміненням або під час опромінення сприяє послабленню радіаційного ураження*.

Кількісною характеристикою дії радіопротекторів є величина, названа фактором зміни дози (ФЗД). **Фактор зміни дози** — це відношення ефективної дози при опроміненні

організму з радіопротектором до ефективної дози, що зумовлює такий самий радіобіологічний ефект у контролі, тобто без радіопротектора.

Радіосенсибілізація — це штучне збільшення радіочутливості біологічних об'єктів, яке супроводжується посиленням шкідливої дії іонізуючого випромінювання.

Післярадіаційне відновлення може відбуватись на рівні молекул, клітин, тканин, органів. На молекулярному рівні уражуються і відповідно відновлюються такі біологічно важливі молекули, як нуклеїнові кислоти, білки. Відновлення цих молекул, а також таких елементів клітини, як хромосоми, внутрішньоклітинні мембрани та інші, сприяє відновленню всій клітині і, головне, здатності її до поділу. Це, в свою чергу, зумовлює відновлення тканин, окремих органів і в кінцевому підсумку одужання всього організму.

Безперечно, здатність до післярадіаційного відновлення мають клітини, що активно діляться, тобто клітини критичних тканин і органів з найвищою радіочутливістю серед клітин усіх типів, що визначають реакцію організму на дію іонізуючого випромінювання.

Завдання

1. Назвіть фізичні протипроменеві фактори, що впливають на дію іонізуючого випромінювання на організм людини.
2. Які хімічні речовини належать до радіозахисних.
3. Як класифікують радіопротектори? Наведіть приклади найефективніших радіопротекторів.
4. Яке значення поживних речовин у формуванні радіостійкості?
5. Дайте визначення поняттю «радіосенсибілізація». Наведіть приклади радіосенсибілізаторів.
6. В чому полягає післярадіаційне відновлення організму? За яким механізмом воно відбувається?

Література

Базова:

1. Григор'єва Л.І. Іонізуюче випромінювання та його вплив на людину. / Л.І. Григорєва, Ю.А. Томілі, І.М. Рожков. – Миколаїв : МДГУ ім. Петра Могили, 2008. – 208 с.
2. Гродзинский Д.М. Радиобиология и биологическое действие ионизирующих излучений / Д.М. Гродзинский – М. : Агропромиздат, 1966. – 232 с.
3. Константинов М.П., Журбенко О.А. Радіаційна безпека: Навчальний посібник. – Суми: ВТД “Університетська книга”, 2003. – 151с.
4. Константинов Н.П., Журбенко А.А. Методические указания к лабораторной работе „Методы обнаружения и измерения ионизирующих излучений”. – Одесса: ОГАПТ, 1999. – 43с.
5. Кічно В.О. Основи радіобіології та радіоекології. Навчальний посібник / В.О. Кічно, С.В. Поліщук, І.М. Гудков – К. : Хай-Тек Прес, 2007. – 320 с.

Рекомендована:

1. Акоев И.Г. и др. Количественные закономерности радиационного синдрома / И.Г. Акоев – М. : Энергоатомиздат, 1981.
2. Алексахин Р.М. Сельскохозяйственная радиозэкология / Р.М. Алексахин, А.В. Васильев, В.Г. Дикарев – М. : Колос, 1992. – 400 с.
3. Анненков Б.Н. Основы сельскохозяйственной радиологии / Б.Н. Анненков, Е.В. Юдинцева – М. : Агропромиздат, 1991. – 287 с.
4. Гофман Джон Чернобыльская авария: радиационные последствия для настоящего и будущих поколений / Джон Гофман – Минск : Высшая школа, 1994. – 574 с.
5. Гродзинський Д.М. Радіобіологія / Д.М. Гродзинський – К. : Либідь, 2001. – 448 с.
6. Гудков И.Н. Основы общей и сельскохозяйственной радиобиологии / И.Н. Гудков – К. : УСХА, 1991. – 326 с.
7. Іванов Є.А. Радіоекологічні дослідження: Навч. посібник.

- Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2004. – 149 с.
8. Ильченко А.И. Концентрирование животными радионуклидов и их влияние на популяцию / А.И. Ильченко – М. : Наука, 1974. – 168 с.
 9. Карташов П.А. Лучевая болезнь сельскохозяйственных животных / П.А. Карташов – М. : Колос, 1978. – 98 с.
 10. Корогодин В.И. Проблемы пострадиационного восстановления / В.И. Корогодин – М. : Атомиздат, 1964. – 233 с.
 11. Кузин А.М. Стимулирующее действие ионизирующего излучения на биологические процессы. – М. : Атомиздат, 1977. – 250 с.
 12. Ли Д. Действие радиации на живые организмы / Д. Ли – М. : Госатомиздат, 1963. – 278 с.
 13. Никберг И.И. Ионизирующая радиация и здоровье человека / И.И. Никберг – К. : Здоровье, 1989. – 160 с.
 14. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). – К.: МОЗ, 1997. – 121 с.
 15. Тиунов Л.А. Противолучевые средства / Л.А. Тиунов, Г.А. Васильев, В.П. Парибок – Москва-Ленинград : Изд-во АН СССР, 1961. – 172 с.
 16. Ткаченко Г.М. Основи радіаційної безпеки та протирадіаційного захисту при роботі з джерелами іонізуючих випромінень (методичні вказівки) / Г.М. Ткаченко, М.М. Лазарев, В.О. Кіцно – К. : НАУ, 2005. – 52 с.
 17. Шевченко В.А., Генетические последствия ионизирующего излучения / В.А. Шевченко, М.Д. Померанцева – М. : Наука, 1985. – 279 с.

**Значення ВБЕ і регламентовані коефіцієнти якості для
випромінювань невідомого складу**

ЛПЕ, кеВ/мкм	ВБЕ	К
3,5	1	1
3,5-7	1-2	2
7-23	2-5	5
23-53	5-10	10
53-175	10-20	20

**Коефіцієнти якості різних видів іонізуючих
випромінювань**

Види випромінювань	К
Рентгенівське і γ -випромінювання	1
Електрони і позитрони, β -випромінювання	1
Протони з енергією 10 МеВ	10
Нейтрони з енергією 20 кеВ	3
Нейтрони з енергією 0,1-10 МеВ	10
α -випромінювання з енергією 10 МеВ	20
Важкі ядра віддачі	20

Стимулюючі дози гамма-опромінення для деяких родів
сільськогосподарських рослин ті інших організмів, Гр

Рід рослини	Доза	Організми	Доза
Боби (насіння)	1—1.5	Клітини люди-	
Боби (проростки)	0.2	ни в культурі	0.05
Горох (насіння)	3	Яйця курячі	0.01—0.05
Горох (проростки)	0.35—0.5	Курчата	0.05—1
Кукурудза (насіння)	5—10	Кури	0.05
Кукурудза (проростки)	0.5—1.0	Ікра риби	0.1—0.5
Пшениця (насіння)	5—8	Сперма риби	0.25—0.5
Пшениця (проростки)	1.0—1.5	Поросята	0.1—0.25
Томати (насіння)	5—10	Лабораторні	
		щури	0.1—0.3
Томати (розсада)	0.5—1.5	Лабораторні	
		миші	0.2—0.4
		Комахи	10—45
Редис (насіння)	10	Найпростіші	5—50
Редис (проростки)	3.0	Мікроорганізми	10—100

Радіочутливість рослин деяких родів
до гамма- або рентгенівського опромінення
(І.М. Гудков, Г.М. Ткаченко), ЛД₅₀ Гр

Рід	Насіння	Ве- гетуюча росли- на	Рід	Насіння	Ве- гетуюча росли- на
Лілія	10	0,5—1	Томат	200—400	—
Сосна	10—50	1—3	Кріп	250	—
Ялина	20—60	3—5	Люпин	250—300	15—20
Яблуня	20—70	—*	Липа	300	—
Виноград	20—90	—	Коноплі	300—350	—
Груша	30—40	—	Овес	250	—
Смородина	30—40	—	Буряки	350—400	25—30
Слива	40—100	—	Картопля	350—500	—
Вишня	50	—	Огірок	500	—
Боби	50—100	3—5	Гарбуз	500	—
Береза	50—100	—	Морква	500—1000	—
Горох	50—250	7—9	Люцерна	500—1000	20—25
Клен	100—150	—	Конюшина	500—1500	25—30
Кукурудза	100—150	18—22	Капуста	700—800	—
Цибуля	100—150	—	Ріпа	700—1000	—
Салат	100—150	—	Буркун	700—1000	—
Жито	100—180	—	Ріпак	750—1000	—
Гречка	100—200	—	Гірчиця	800—1500	—
Сочевиця	120—200	—	Льон	1000	—
Квасоля	150—250	10—13	Редька	1000—	—
Соя	150—170	—		1500	—
Пшениця	150—250	13—18	Бруква	2000	—
Ячмінь	150—250	13—18	Редис	2000	50
Перець	190—360	—			

* Означає, що немає даних.

**Коефіцієнти радіаційного ризику Кр різних органів (тканин)
при рівномірному опроміненні всього організму людини**

№	Органи, тканини	Кр
1	Яєчники або сім'яники	0,24
2	Молочні залози	0,15
3	Легені	0,12
4	Червоний кістковий мозок	0,12
5	Щитоподібна залоза	0,03
6	Інші органи і тканини	0,34
7	Організм у цілому	1,0

**Характерні порушення в організмі людини залежно
від сумарної поглинутої дози при одноразовому загальному
опроміненні**

Сумарна поглинута доза, Гр	Порушення в організмі людини
До 0,25	Помітних порушень немає
0,25-0,50	Можливі зміни в крові
0,5-1,0	Зміни в крові, нормальний стан працездатності порушується
1,0-2,0	Погіршується самопочуття, можлива втрата працездатності
2,0-4,0	Втрата працездатності, можливий смертельний наслідок
4,0-5,0	Смертельні випадки становлять 50 % від загальної кількості уражених людей
6,0 і більше	Смертельні випадки становлять 100 % від загальної кількості уражених людей

Дози опромінення для різних груп критичних органів осіб категорії А та Б, мЗв/рік

Група критичних органів	Гранично допустима доза для осіб категорії А, мЗв/рік	Гранично допустима доза для осіб категорії Б, мЗв/рік
I	50	5
II	150	15
III	300	30