

Поливаний С.В.

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК
«РАДІОБІОЛОГІЯ»



Вінниця – 2026

УДК 577.43

П 50

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради
Вінницького державного педагогічного університету
Імені Михайла Коцюбинського
(протокол № 16 від 27 травня 2026 р.)

Рецензенти:

Доцент кафедри біології Вінницького державного педагогічного університету імені М. Коцюбинського к.с-г.н. Ходаніцька О.О.

Професор, завідувач кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля Вінницького національного технічного університету д.т.н. Іщенко В.А.

Професор кафедри ботаніки та зоології Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка д.с-г.н. Пида С.В.

Поливаний С.В.

П50 Навчальний посібник «Радіобіологія» для здобувачів ступеня вищої освіти Бакалавр спеціальностей Е1 Біологія та біохімії; А4 Середня освіта (Біологія та здоров'я людини) / Упорядник: к.б.н., доцент С.В. Поливаний – Вінниця: ТОВ Твори, 2026. – 218 с.

ISBN

Навчальний посібник «Радіобіологія» висвітлює основні теоретичні та практичні аспекти дії іонізуючих випромінювань на живі організми та навколишнє середовище. У виданні розглянуто історію становлення і розвитку радіобіології як науки, наведено базові відомості з ядерної фізики, необхідні для розуміння природи радіоактивності та механізмів утворення іонізуючих випромінювань.

Особливу увагу приділено джерелам радіаційного забруднення довкілля, закономірностям взаємодії іонізуючого випромінювання з біологічними системами, механізмам формування радіаційних ушкоджень на молекулярному, клітинному, організмовому та популяційному рівнях. Розкрито особливості біологічної дії різних видів випромінювань, висвітлено питання радіочутливості рослин, тварин, мікроорганізмів і людини. Окремий розділ присвячено використанню радіаційних технологій у біології, екології, сільському господарстві, медицині та інших природничих сферах діяльності людини.

Видання призначене для студентів закладів вищої освіти природничих, біологічних, екологічних, аграрних і педагогічних спеціальностей, а також усіх, хто цікавиться проблемами радіобіології, радіоекології та радіаційної безпеки.

© С.В. Поливаний, 2026

© Вінницького державного педагогічного університету

імені Михайла Коцюбинського, 2026

ISBN

ЗМІСТ

Тема 1	Вступ. Історія розвитку радіобіології. Елементи ядерної фізики	с. 6
Тема 2	Джерела радіаційного забруднення навколишнього середовища	39
Тема 3	Вплив радіації на живі організми	56
Тема 4	Біологічні ефекти іонізуючих випромінювань у рослин і тварин	85
Тема 5	Радіочутливість рослин, тварин та інших організмів	109
Тема 6	Радіоактивне забруднення навколишнього середовища	134
Тема 7	Захист населення від іонізуючого випромінювання	143
Тема 8	Використання іонізуючих випромінювань у біолого-природничих сферах діяльності людини	194
	Список використаної літератури	218

ВСТУП

Дисципліна «Радіобіологія» є складовою підготовки фахівців з біології і базується на курсах фізики та загальної екології.

Основним завданням радіобіології є вивчення закономірностей дії іонізуючих випромінювань на живий організм з метою пошуку можливостей щодо керування його реакціями на цей фактор, вивчення чутливості рослин, тварин та інших організмів, в т.ч. і людини, до іонізуючих випромінювань; розробка способів підвищення стійкості до радіаційного ураження, тобто протирадіаційного захисту та після радіаційного відновлення; поширення масштабів використання іонізуючих випромінювань у радіаційно-біологічних технологіях сільськогосподарського виробництва, харчовій промисловості, медицині; дослідження шляхів міграції радіоактивних речовин у навколишньому середовищі і специфіки біологічної дії інкорпорованих рослинами і тваринами радіонуклідів.

Ознайомлення з проблемами радіаційного забруднення у навколишньому середовищі дає можливість студентам вміти оцінювати радіаційну ситуацію місцевості та її загальний екологічний стан. Курс лекцій ознайомлює з основними поняттями радіобіології, типами та шляхами забруднення біосфери радіонуклідами, а також методами захисту від впливу іонізуючих випромінювань. Розглядаються методи знешкодження радіаційних відходів, засобів їх поховання.

Засвоївши матеріал навчальної дисципліни, студент буде знати: джерела іонізуючих випромінювань у навколишньому середовищі, механізми дії випромінювань на живі організми, радіочутливість основних видів рослин та тварин, принципи захисту живих організмів від випромінювань та забруднення радіоактивними речовинами, шляхи застосування радіаційно-біологічних технологій у різних сферах господарювання, теоретичні та прикладні основи застосування радіоактивних ізотопів в еколого-біологічних дослідженнях; основні ядерні реакції; основні дозиметричні величини; природні та техногенні джерела радіації; особливості впливу на екосистеми та організм людини окремих видів іонізуючих випромінювань; правила захисту людини від впливу радіації; методи та засоби контролю доз радіації; методи дезактивації; правила поводження з радіоактивними відходами.

Тема 1

Вступ. Історія розвитку радіобіології. Елементи ядерної фізики

1. Історія розвитку радіобіології як науки.
2. Будова атома. Поняття радіоактивності.
3. Типи ядерних перетворень.
4. Взаємодія іонізуючого випромінювання з речовиною.
5. Закон радіоактивного розпаду.

1. Історія розвитку радіобіології як науки.

Радіобіологія – це наука про дію всіх видів іонізуючого випромінювання на живі організми, починаючи з біологічно важливих макромолекул, бактеріофагів, вірусів і закінчуючи високоорганізованими організмами, популяціями і біосферою в цілому, що сформувалася в першій половині ХХ століття.

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

Виникнення радіобіології пов'язане з відкриттям радіації (І. Пуллой, 1881; В.К. Рентген, 1895; Беккерель, 1896). Вплив радіації на організм людини і тварин почали досліджувати після відкриття явища радіоактивності у 1896 році Анрі Беккерелем, П'єром Кюрі, Марією Склодовською-Кюрі.

Іонізуюче випромінювання (ІВ) – випромінювання, що створюється при радіоактивному розпаді, ядерних перетвореннях, гальмуванні заряджених частинок у речовині та утворює при взаємодії із середовищем іони різних знаків.

Радіація – іонізуюче випромінювання, що виникає у процесі мимовільного розпаду ядер нестабільних хімічних елементів.

Виявлення закономірностей, що лежать в основі процесів радіоактивного розпаду, має велике значення для багатьох галузей народного господарства. Так, особливий практичний інтерес становлять: міграція радіонуклідів у харчових ланцюгах організмів (у т.ч. сільськогосподарських тварин і людини); обрив або ослаблення екологічних зв'язків; дезактивація сільськогосподарських земель, водойм і т.п., забруднених радіонуклідами; пошук родовищ радіоактивних руд (за радіоактивністю рослин-індикаторів); виявлення територій суходолу й акваторій, забруднених штучними радіонуклідами.

Результати радіобіологічних досліджень дуже вплинули на прийняття міжнародних конвенцій, спрямованих на обмеження випробувань ядерної зброї й відмову від його застосування в умовах війни. На основі рекомендацій радіобіології у промисловості розробляються й впроваджуються замкнені цикли охолодження ядерних реакторів, уловлювачі радіоактивних аерозолів, методи зберігання й знешкодження радіоактивних відходів, що виключають їх потрапляння в навколишнє середовище.

Сьогодні можна виділити такі етапи розвитку радіобіології:

I-й етап - з 1881 до 1920 років

- виявлення катодного випромінювання І.П. Пулюєм і демонстрація на Міжнародній електротехнічній виставці в Парижі «лампа Пулюя», за яку він одержав срібну медаль,
- вивчення уражаючої дії радіації на різні системи організму;
- пізнання природи і сутті радіації;
- вивчення радіоактивного гальмування поділу клітин;
- встановлення уражаючої дії радіації на субклітинні елементи, клітини, тканини.

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

Про біологічну дію іонізуючих випромінювань стало відомо майже відразу після їх виявлення. Вони були шкідливими для здоров'я тих, хто працював з рентгенівськими апаратами та радіоактивними речовинами. Однією з перших жертв випромінювання став сам А.А. Беккерель.

Від променевої хвороби померла М. Склодовська-Кюрі і її дочка І. Кюрі та її чоловік Ф. Жоліо-Кюрі — визначні французькі фізики, що відкрили у 1934 р. явище штучної радіоактивності елементів, за що також були вшановані Нобелівською премією. Лише рання загибель П. Кюрі внаслідок катастрофи позбавила його тієї ж долі. Незважаючи на заходи щодо безпеки роботи з радіоактивними речовинами та випромінюваннями, до 80-х років вже було відомо близько 500 дослідників, що загинули від іонізуючої радіації.

Перші наукові дослідження щодо впливу іонізуючого випромінювання на живі організми були проведені практично відразу після відкриття рентгенівських променів та явища радіоактивності. Серед найперших випробувачів — відомий російський фізіолог І.Р. Тарханов, який вже в 1896 р., будучи доцентом Петербурзького університету, показав уражуючу властивість рентгенівських променів при опроміненні комах і жаб.

Глибокі дослідження щодо дії рентгенівських променів та променів радіо на рослини і тварин провів видатний російський фізіолог і біохімік Ю.С. Лондон. Він вперше описав гальмування росту рослин під впливом дії цих-променів та смертельну дію на мишей. Його книга «Радій в біології та медицині», опублікована в 1911 р., є першою у світі працею з радіобіології.

Наприкінці 19 і в перші два десятиріччя 20 століття було відкрито багато різноманітних ефектів іонізуючих випромінень. Зокрема, описано явище радіаційної стимуляції рослин, яка полягає в тому, що на відміну від високих доз радіації, які гальмують ріст і розвиток живих організмів, малі дози можуть, навпаки, прискорювати ці процеси. Виявлено також порушення поділу клітин при опроміненні, гальмування окремих процесів обміну речовин. За цей час було встановлено багато фактів, які підтвердили дію рентгенівського випромінювання та випромінень радіоактивних елементів на різні біологічні об'єкти. Радіобіології, як

самостійної науки, ще не існувало. Для її становлення не було головного — теорії, яка б пояснювала природу дії радіації на організм. Потреба, в такій теорії була цілком очевидною. Нагально потребував пояснення так званий «радіобіологічний парадокс» — явище, що полягає у великій невідповідності між дуже малою величиною поглинутої при опроміненні енергії іонізуючого випромінювання та ступенем прояву реакцій біологічного об'єкта, що нерідко призводить до його загибелі.

Народження радіобіології як самостійної науки пов'язане з великими відкриттями в галузі фізики, а формування і становлення її як самостійної галузі науки відбувалося за кілька періодів. Початковий період розпочався у 1895 році, коли німецький фізик В.К. Рентген описав і опублікував праці про невідомі Х-промені, які потім були названі його ім'ям. Рентгену допоміг випадок. 8 листопада 1895 року він закінчив пізно ввечері експеримент у лабораторії фізичного інституту Вюрцбургського університету і, погасивши лампу, побачив у темряві зеленувате свічення. Воно виходило від кристаликів платиносинеродистого барію, що містився поблизу загорнутої у щільний чорний папір газорозрядної катодної трубки, яку Рентген забув вимкнути, і виникало знову при її включенні. У Рентгена з'явилася геніальна здогадка, що під час проходження струму в трубці виникає невідоме випромінювання, яке він назвав Х-променями. Упродовж 2 років Рентген дослідив властивості відкритих ним променів, створив перші «рентгенівські» трубки. Публікації щодо Х-променів привернули увагу вчених всього світу. Про це свідчить той факт, що протягом 1896 року було опубліковано понад тисячу робіт щодо дослідження їхніх властивостей і застосування. За це відкриття Рентгену в 1901 році була присуджена перша Нобелівська премія з фізики.

У цей час професор фізики Паризького музею природної історії А. Беккерель досліджував індуковане сонячним світлом свічення різних мінералів і встановив, що найбільш інтенсивно воно виникає у солей урану. У березні 1896 року була опублікована перша стаття А. Беккереля про деякі властивості невидимих випромінювань уранових солей. Він довів, що якщо покласти сіль урану на фотопластинку, загорнуту в щільний чорний папір і помістити на сонячне світло, то пластинка засвічується в тому місці, де була сіль. Потім він загорнуту в чорний папір пластинку із сіллю залишив у темному ящику. Через кілька днів Беккерель проявив пластинку. На ній він побачив чіткі контури солі у вигляді хреста. Так були відкриті уранові або «беккерелеві» промені. Фактично це було відкриття природної радіоактивності і в 1903 році А. Беккерель був удостоєний також Нобелівської премії, що є свідченням великої значимості цього наукового досягнення. Аналізуючи відкриття В. Рентгена і А. Беккереля, вчені зрозуміли, що мова йде про невидимі промені, які здатні проникати через світлонепроникний бар'єр.

Тому увага вчених різних лабораторій була сконцентрована на пошуках нових променів-невидимок. У кінці 1897 року відкритими урановими, «беккерелевими» променями зацікавилась М. Склодовська-Кюрі. Нею було

встановлено здатність випромінювати ураном і торієм «беккерелевих» променів. З цього приводу вона писала: «Я назвала радіоактивністю способность испускать такие лучи и создала новый термин, принятый с тех пор в науке». Випромінюючі елементи були названі радіоелементами від слова radius – промінь. Таким чином, роком народження поняття «радіоактивність», введеного М.Склодовською–Кюрі вважається 1898 рік. Цілеспрямовано досліджуючи цю проблему, подружжя Кюрі в липні 1898 року відкрили властивість радіоактивності у зовсім нового елемента, першого відкритого саме за радіоактивністю і названого полонієм, а в грудні цього самого року ще у одного нового елемента – радію. Ці елементи в періодичній системі елементів Д.І. Менделєєва зайняли порожні місця під порядковими номерами 84 і 88. Це було третє велике відкриття, за яке в 1903р. подружжя Кюрі було удостоєне також Нобелівської премії.

Про негативну біологічну дію іонізуючого випромінювання на здоров'я людей стало відомо практично відразу ж після його відкриття. Першою жертвою радіаційного впливу став сам Беккерель. Для демонстрації властивостей урану засвічувані фотопластики він носив ампулу з препаратом радіоактивної солі в кишені жилету. Невдовзі він побачив на шкірі проти цього місця виразку, яку довго лікував. Таким чином він описав дію радіоактивних речовин на людину. Від раку, внаслідок променевого ураження, померла М. Склодовська–Кюрі. Від цієї хвороби загинули її донька І. Кюрі та чоловік Ф. Жоліо–Кюрі – видатні фізики, лауреати Нобелівської премії за відкриття штучної радіоактивності елементів у 1934 році.

Слід підкреслити, що наукові експерименти щодо впливу іонізуючої радіації на живі організми почали проводити одразу ж після відкриття X– променів і явища радіоактивності. Першим дослідником був російський учений І.Р. Тарханов, який вже у березні 1896 року провів досліди з дії цих променів на жаб та комах. Він показав ушкоджуючу властивість X–променів. На початку ХХ століття (1903) фундаментальні дослідження дії X–променів і променів радію провів на тваринах і рослинах відомий російський патофізіолог і біохімік Ю.С. Лондон. Він розкрив механізм ушкоджуючої дії іонізуючого випромінювання на різні системи організму. Ю.С.Лондон вважається основоположником радіобіології в Росії, а його монографія «Радий в биологии и медицине», опублікована у 1911 році, є першим у світі виданням з радіобіології.

У 1904 році німецький вчений Г. Петерс виявив порушення клітинного поділу під впливом іонізуючої радіації. У 1905 році М. Корніке встановив, що найбільше ушкоджується радіацією ядро клітини. Він описав різні типи порушень поділу ядра і хромосом. Саме він вважається засновником нового напрямку науки – радіаційної цитології.

До такого ж висновку – надзвичайно високої радіочутливості клітинного ядра – приходять француз Г. Боні, що працював з ікрою і сперміями морського їжака і німецький зоолог О. Гетрвіг, що опромінював рентгенівською радіацією статеві клітки і зародки земноводних. Ще далі у своїх дослідженнях пішли французькі натуралісти І. Бергоньє і Л. Трибондо, що знайшли неоднакову

чутливість до іонізуючої радіації окремих типів сім'яродних клітин. Вони показали, що найбільш радіочутливими є сперматогонії, а найрадіостійкішими – сперматозоїди. На підставі своїх експериментів в 1906 р. вчені сформулювали положення про те, що чутливість клітин до іонізуючих випромінювань прямо пропорційна їхньої здатності до поділу і обернено пропорційна ступеню їхньої диференціації. Ця залежність, що одержала назву положення, або закону Бергоньє і Трибондо, є однією з найфундаментальніших закономірностей у радіобіології.

На зорі розвитку радіобіології в 1898 р. французькими фізіологами М. Мальдинеєм і К. Тувиненом було зроблено ще одне важливе відкриття – явище радіаційної стимуляції. Вони показали прискорення проростання насіння, росту проростків опромінених у невеликих дозах рентгенівських променів. Згодом була доведена універсальність цього явища – можливе прискорення росту і розвитку будь-яких організмів.

Останні роки 19-го і перші два десятиліття 20-го століття (1895–1920) можна вважати першим етапом розвитку радіобіології. У цей час нагромадилася безліч фактів про дію рентгенівських випромінювань і випромінювань радіоактивних елементів на різні біологічні об'єкти. Ці дослідження проводилися фізіологами, зоологами, ботаніками, лікарями, мікробіологами в межах своїх наук і хоча, безперечно, мали фундаментальне значення для розвитку радіобіології, носили в основному описовий характер. Підсумок зазначеному періодові підвів у 1920 р. російський мікробіолог і ботанік Георгій Адамович Надсон, який, до речі, народився у Києві, котрий працював у Державному рентгенологічному і радіологічному інституті в Петрограді. На основі узагальнення результатів власних досліджень і більш ста наукових джерел про вплив іонізуючих випромінювань на рослини, тварин, бактерії, гриби він проаналізував загальне і відмінне в реакціях клітин різних організмів на дію радіації, описав явище загибелі клітин після декількох поділів, відоме зараз як інтерфазна загибель, або апоптоз, явище відновлення опромінених клітин.

Формування радіобіології в Росії проходило в дні великих потрясінь -перша світова війна, революція, громадянська війна. Незважаючи на це вже у 1918 році, за пропозицією професора М. Неменова, Наркомпрос РСФРР в особі А.В. Луначарського організує в Ленінграді науковий центр для всебічного вивчення дії рентгенівських променів і радію на організм людини, тварин і рослин і для навчання науковоосвідчених рентгенологів і радіологів. Слід підкреслити, що завдяки класичним роботам Г.А. Надсона, Г.С. Філіпова та інших учених створеного нового центру, радіологія розвивалась на твердій фундаментальній основі. Таким чином, останні роки XIX ст. і перші два десятиріччя XX ст. стали першим етапом розвитку радіобіології. За ці роки було нагромаджено численну кількість фактів про дію X–променів і випромінювання радіоактивних елементів на біологічні об'єкти. Хоча вони носили описовий характер, але мали велике фундаментальне значення. Умовно це був кінець першого і початок другого періоду розвитку радіобіології як самостійного напряму науки.

II-й етап - починаючи з 1920 до 1945 років

- розвиток дозиметрії, вивчення зв'язку між дозою і ефектом, розробка атомної бомби;

- вивчення впливу радіації на живі системи у залежності від її дози та якості;

- розробка заходів захисту і лікування від радіації.

Найбільш яскраві представники вчених другого періоду Ф. Дессауер, Л.Грей, М.В. Тимофєєв-Рясовський, Д.Ли та інші.

20-30-ті роки 20 ст. відомі низкою великих винаходів та нових ідей, які прискорили становлення радіобіології як науки. Було сформульовано теорію «мішені», згідно з якою не всі частини живої клітини однаково ушкоджуються випроміненням. У ній є особливо чутливі об'єми «мішені», ураження яких призводить до ушкодження всього об'єкта. Нині доведено, що такою мішенню є молекула ДНК. Великий внесок у розвиток цієї теорії зробив видатний радіобіолог і генетик М.В. Тимофєєв-Рясовський.

В цей період сформувалась теорія прямої дії випромінення, що доводили можливість безпосередньої взаємодії випромінень з мішенню, та непрямой дії, яка підтверджувала, що головну роль у радіаційному ушкодженні відіграють процеси взаємодії продуктів радіолізу води, з якої на 90 % складаються клітини, з мішенню. В цей час відкрито «кисневий ефект», суть якого в тому, що при зменшенні в середовищі концентрації кисню ступінь променевого ушкодження знижується.

Ці роки ознаменувалися ще одним великим відкриттям – встановленням мутагенної дії іонізуючої радіації, її властивості впливати на спадковий апарат живого організму. Першими це продемонстрували в 1925 р. на найпростіший грибах російські вчені Г.А. Надсон та Г.С. Філіпов. В 1927 р. американський генетик Г. Мьоллер показав ці можливості на дрозофілі – плодовій мушці, а в 1928 р. – Л. Стедлер на вищих рослинах.

З відкриттям радіаційного мутагенезу почали активно проводитись роботи з виведення за допомогою іонізуючих випромінень нових сортів культурних рослин. В 1930 р. такі роботи розпочали українські вчені Л.М. Делоне та А. О. Сапегін.

На початку другої світової війни був нагромаджений великий експериментальний матеріал, зроблені деякі узагальнення, створені теорії, проте ні радіобіологія, ні радіоекологія як науки ще не сформувались. Навіть термін «радіобіологія» існував лише у колі вузьких спеціалістів.

У 20-х – 30-х роках ХХ ст. було зроблено низку важливих відкриттів, з'явилися нові ідеї. У 1923 році німецький фізіолог рослин Є. Петрі показав, що за рентгенівського опромінення насіння і паростків пшениці в атмосфері вуглекислого газу радіаційне ушкодження знижується порівняно з опроміненням у повітрі. Наступні дослідження підтвердили факт загально- біологічного значення цього явища, названого «кисневим ефектом». Ці роки ознаменувалися ще одним значним відкриттям – встановленням мутагенної дії іонізуючої радіації. Вперше це зробили російські вчені Н.В. Тимофєєв – Рясовський, Г.А. Надсон і Г.С. Філіпов у 1925 році на нижчих грибах. Працями цих видатних учених в експериментах на

дріжджах було показано, що під впливом випромінювання радіо і X-променів виникають нові мікроорганізми, які вони назвали радіо-і рентгенорасами. Виникаючі раси відрізнялись від вихідних форм як за своєю будовою і розвитком, так і за життєвими властивостями, наприклад, інтенсивністю росту, здатності утворювати пігмент, накопичувати жир, посиленою властивістю спричиняти спиртове бродіння та ін. „Эти новые расы оказались стойкими и в течение ряда лет передавали по наследству свои способности следующим поколениям; они носят характер «сальтантов», что соответствует мутантам высших организмов. Такого рода расообразование под влиянием лучей представляет не только значительный теоретический интерес, но и открывает некоторые перспективы для практики” – стверджував Г.А. Надсон.

На початку 20-х років минулого століття німецький фізик Ф. Десауер почав досліджувати так званий «радіобіологічний парадокс», тобто велику невідповідність між дуже малою величиною поглинутої при опроміненні енергії іонізуючого випромінювання і ступенем прояву реакцій біологічного об'єкта, що нерідко призводить до його загибелі. Він припустив, що електрони, вирвані з атому речовини клітини, не віддаляються від нього, а вступають у рекомбінацію, тобто утворюють нейтральні атоми і молекули. У результаті поглинута енергія виділяється у формі теплоти і температура в цьому місці різко підвищується. Якщо це проходить у відповідальних місцях, наприклад у хромосомах, таке локальне ушкодження може призвести до пошкодження всієї клітини. Так виникла перша теорія, що якоюсь мірою пояснювала дію іонізуючої радіації на організм, і одержала назву теорії прямої дії.

У наступні роки дослідженнями Д. Кроутера в Англії (1924–1927), Ф. Хольвека у Франції (1928–1938) та іншими були розвинуті уявлення про дискретність дії іонізуючого випромінювання, процес поглинання енергії як суму одиничних актів взаємодії фотона з окремими молекулами чи структурами клітини. У подальшому ці погляди були розвинуті в теорії мішені, сформульовані в 1935 році видатним російським радіобіологом М.В. Тимофєєвим–Ресовським та німецьким дослідником К. Ціммером у класичній роботі „О природе генных мутаций и структуры гена”. У 30-х роках ХХ століття на основі радіаційно-хімічних досліджень О. Рісе (1929) і Г. Фріка (1934) одержала життя теорія непрямої дії радіації.

Але, попри численні дослідження, нагромадження великого експериментального матеріалу, зроблені узагальнення, появу теорій в кінці 30-х років ХХ ст., радіобіологія як самостійна наука не оформилась. Радіобіологією займались в основному ентузіасти-біологи, фізики, медики-рентгенологи і радіологи. Ще не були відомі потенційні можливості атомної енергії, не існувало атомної енергетики, не було створено ядерної зброї, а значить, не існувало загрози радіаційної небезпеки. Але фізики-ядерники вже здогадувались про незвичайні енергетичні можливості атома і його небезпеку.

Наш співвітчизник, видатний радіобіолог і біогеохімік В.І.Вернадський

однозначно застерігав і писав про глобальну радіаційну загрозу, що несуть подальші дослідження фізиків–ядерників та закликав їх до обережності і відповідальності. Він наголошував: «Недалеко время, когда человек получит в свои руки атомную энергию, такой источник силы, который даст ему возможность строить свою жизнь, как он захочет. Это может случиться через столетия. Но ясно, что должно быть. Сумеет ли человек воспользоваться этой силой, направит её на добро, а не на самоуничтожение? Дорос ли он до умения использовать силу, которую неизбежно должна дать ему наука?» Ці слова великого вченого справді стали пророчими. У другій половині ХХ ст. у світі були створені і ядерна зброя, і атомна промисловість, і атомна енергетика.

III-й етап починається з 1945 до 1986 років

- вивчення впливу радіації на навколишнє середовище;
- розробка методів використання радіації в науці, промисловості, сільському господарстві, медицині;
- досліджуються ураження радіацією соматичних та генеративних клітин;
- атомної енергетики до Чорнобильської аварії тощо.

Найбільш яскраві представники вчених третього періоду Ярмоленко, Дубинін.

Використання США в 1945 р. атомної бомби в Японії, масові випробування в наступні роки атомної зброї в ряді країн, в тому числі і у колишньому СРСР, призвели до реальної загрози радіаційного ушкодження біосфери. Цей період, коли різко зріс інтерес до наслідків біологічної дії іонізуючої радіації, знаменує початок третього етапу розвитку радіобіології.

Саме в ці роки радіобіологія остаточно формується як самостійна галузь науки. Актуальним для неї стає таке практичне завдання, як пошук засобів захисту організму від іонізуючого випромінення. В 1949 р. були винайдені радіозахисні властивості амінокислоти цистеїну, ціаніду натрію, амінів. У 1951 р. бельгійський радіобіолог З. Бак показав високу протипроменеву ефективність синтезованої ним сполуки цистеаміну, який і нині залишається одним з найбільш дієвих радіозахисних препаратів.

У багатьох країнах Європи, Азії, США, СРСР при великих атомних центрах створюються радіобіологічні лабораторії, науково–дослідні інститути. Імена видатних радіобіологів того часу добре відомі. Це - А. Холендер, А. Сперроу, Ш. Вольф, Г. Куртіс, Р. Кімбол (США), П. Александер, Т. Альпер, Д. Доєрти, Л. Грей, Л. Лайсі (Великобританія), Р. Латарж (Франція), К. Ціммер, Б. Раєвський (Німеччина), З. Бак (Бельгія) та багатьох інших.

В СРСР у цей період також сформувався великий загін вітчизняних радіобіологів при створених і діючих радіологічних центрах в Інституті біофізики АМН СРСР (Москва), Інституті біофізики АН СРСР (Москва–Пушіно), Московському державному університеті ім. М.В. Ломоносова, Інституті хімічної фізики АН СРСР (Москва), Всесоюзному онкологічному центрі АМН СРСР (Москва), Ленінградському інституті ядерної фізики АН СРСР, Інституті медичної радіології АМН СРСР (Обнінськ), Інституті фізіології рослин АН УРСР (Київ).

Слід зазначити, що у ці роки досягнення радіобіології широко використовуються для розв'язання практичних завдань медицини щодо діагностики і лікування хвороб, одержання нових сортів рослин, стимуляції їх росту і продуктивності, боротьби з комахами – шкідниками, знезараження та консервування продуктів. У 50–х роках ХХ ст. було експериментально доведено явище післярадіаційного відновлення клітин. У 60–70–х роках ХХ ст. у радіобіології розширюється використання біофізичних методів досліджень, ідей молекулярної біології. Накопичені і узагальнені нові експериментальні дані дали можливість сформулювати теорії прямої і непрямой дії іонізуючих випромінювань. Остаточно було зроблено висновок про те, що основною мішенню іонізуючого випромінювання є ДНК. Показано явище молекулярної репарації ДНК, повністю впорядковується схема променевого ураження організму.

50-ті рр. була експериментально доведена властивість клітини відновлюватись після ушкоджень, завданих опроміненням. Для тих років характерним є також широке використання досягнень радіобіології для вирішення практичних завдань. Розширюється фронт використання іонізуючих випромінень у медицині, їх починають ефективно використовувати в сільському господарстві. В радіобіології виділяються багато самостійних напрямів.

Ще до війни було розпочато дослідження з використання іонізуючого випромінювання у невеликих дозах для підвищення врожайності рослин. Було показано, що опромінене в стимулюючих дозах насіння швидше проростає, енергійніше сходить. Нерідко це проявляється і в наступному прискоренні росту та розвитку рослин і збільшує їх продуктивність. В 50-70-ті рр. одержано певні результати в галузі практичної стимуляції рослин. У деяких країнах технологію передпосівного у-опромінення насіння, живців, розсади змогли довести до рівня широкомасштабних випробувань і навіть до впровадження у практику. Пристрасним пропагандистом та ініціатором випробувань цього методу в Україні був відомий учений в галузі агрохімії та фізіології рослин П.А. Власюк.

Успішно впроваджувався у сільськогосподарське виробництво метод опромінення насіння та іншого садивного матеріалу для виведення нових сортів рослин. Всього за цей період у світі одержано за допомогою іонізуючої радіації понад тисячу сортів рослин, майже половину яких становлять сорти сільськогосподарських культур. В Україні за допомогою опромінення одержано високоврожайні, стійкі проти різних захворювань сорти кукурудзи, люпину, сої та інших культур. Автором деяких сортів гречки, виведених за допомогою цього методу, є відомий селекціонер професор О.С. Алексеєва.

На основі досягнень радіобіології в агропромислове виробництво впроваджуються багато інших радіаційних методів і технологій: для запобігання проростанню цибулин, бульбо- та коренеплодів при тривалому зберіганні, для подолання несумісності тканин рослин при прищепках, для боротьби з шкідниками сільськогосподарських рослин і збудниками інфекційних хвороб тварин, для стерилізації, консервації, знезараження продукції рослинництва і тваринництва.

У зв'язку з випробуванням багатьма країнами в 50-ті і на початку 60-х рр. ядерної зброї та глобальним забрудненням Землі штучними радіоактивними речовинами перед радіобіологією постають нові завдання у вивченні закономірностей їх міграції в біосфері, шляхів надходження в рослини, організми тварин та людини, особливості дії на організм інкорпорованих радіоактивних речовин, що нерівномірно розподіляються по тканинах, з різною швидкістю виводяться з нього. У цей період бурхливо розвивається радіоекологія, великий внесок у розвиток цих досліджень в 50-80-ті рр. внесли українські радіоекологи Д.М. Гродзинський, О.О. Городецький, А.І. Даниленко.

Слід підкреслити, що після заборони в 1963 році випробувань ядерної зброї, спостерігається тенденція до зменшення радіобіологічних досліджень. Причиною цього деякою мірою було самозаспокоєння, зумовлене заборонаю випробувань ядерної зброї та необхідністю зниження радіаційного фону, успіхами руху прихильників миру. Але головна причина – недалекоглядність деяких керівників науки.

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

Це сучасний період розвитку радіобіології. Відлік його почався 26 квітня 1986 р. В радіобіологію прийшов численний загін спеціалістів із суміжних наук. Відкрито багато нових інститутів, лабораторій, кафедр радіобіологічного профілю, що покликані вирішити старі проблеми і нові завдання, які постали перед радіобіологією і радіоекологією в зв'язку з аварією на Чорнобильській АЕС.

Основними з них є:

- 1) специфіка дії на живі організми малих доз іонізуючих випромінень;
- 2) особливості дії на живі організми хронічного опромінення;
- 3) профілактика й терапія гострих та хронічних променевих ушкоджень;
- 4) радіаційне порушення імунітету;
- 5) віддалені наслідки опромінення;
- 6) спільна дія на організм іонізуючих випромінень та інших факторів;
- 7) міграція штучних радіоактивних речовин в об'єктах навколишнього середовища;
- 8) особливості дії на живі організми випромінення інкорпорованих радіоактивних речовин;
- 9) запобігання надходженню і нагромадженню радіоактивних речовин у рослинах, організмах тварин і людини;
- 10) виведення радіоактивних речовин з організму людини.

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

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

Становлення і розвиток радіобіології в Україні

До числа перших дослідників біологічної дії X-променів в Україні в кінці XIX ст. належить професор Київського університету фізик Г.Г. Де-Метц, лікарі-радіобіологи С.З. Гольберг, М.І. Ісаченко, К.П. Серапіна та ін. Дані дослідження мали в основному прикладний характер і були спрямовані на вирішення проблем діагностики і лікування низки захворювань, терапії злоякісних новоутворень. Серед українських радіобіологів були вчені, які вивчали дію X-променів і радіоактивних речовин на розвиток клітин у тканинних культурах, шкідливість їхньої поліференції, властивості опромінення клітин і тканин. До них належать дослідники С.П. Григор'єв, О.О. Кронтовський, М.А. Магат.

Вже в 1920 році, ще до закінчення громадянської війни, були створені Українська рентгенівська академія (м. Харків), Київський рентгенівський інститут та Одеський рентгено-онкологічний інститут ім. проф. Я.В. Зільберберга. Вони стали центрами розвитку в Україні досліджень у галузі практичного застосування X-променів, а потім і радію та інших радіоактивних елементів у діагностиці і терапії грибкових, запальних хвороб і злоякісних пухлин. Так, у 1924 році в Українській рентгенівській академії (м. Харків, перший директор С.П. Григор'єв), була створена біологічна лабораторія. У Київському рентгенівському інституті (експериментальний відділ) під керівництвом О.О. Кронтовського було розгорнуто дослідження впливу X-променів і радіоактивних речовин на розвиток клітин у тканинних культурах, на проникність клітин і тканин, клітинну поліференцію.

Після смерті О.О. Кронтовського у 1929 році цей напрям пошуків продовжив М.А. Магат. З іменем М.А. Магата пов'язані роботи з вивчення фізико-хімічних властивостей опромінених тканин, експериментальне з'ясування переваги методу пролонгованого опромінення при променевої терапії злоякісних новоутворень.

У біологічній лабораторії Одеського рентгено-онкологічного інституту ім. проф. Я.В. Зільберберга С.О. Нікітіним вперше була доведена залежність радіочутливості від процесу тканинної диференціації. Ним встановлено, що тканини із закінченим морфогенезом резистентніші до дії радіації, ніж ті, що розвиваються.

Світове значення мають роботи Г.О. Надсона, Г.С. Філіпова і Л.Н. Делоне виконані в 1925-1930 роках у Харкові, Маслівському селекційному інституті на Київщині. В них показано виникнення мутацій у дріжджів, пшениці під дією променів радію та X-променів. На жаль, тоді ці роботи не були оцінені і вони істотно не вплинули на розвиток науки. І лише після того, як у 1927 році Г. Меллер, на дрозофілі, а С. Стадлер на кукурудзі одержали чітку кількісну залежність виходу мутацій від дози опромінювання, було закладено фундамент радіаційної генетики.

Піонерськими роботами Л.Н. Делоне (1891–1969) було встановлено виникнення мутацій у пшениці під дією X–променів. Результати цих досліджень Л.Н. Делоне видав у серії робіт під загальною назвою «Опыты по рентгенизации культурных растений».

Світове значення мають і роботи А.О. Сапегіна (1883–1946), що проводились в Інституті ботаніки (м. Київ) щодо вивчення природи виникнення мутації у твердих і м'яких пшениць під впливом X-променів. Він першим побачив перспективи створення нових сортів, використовуючи радіаційні мутації, під дією опромінення X–променями.

У 50-х роках минулого століття під впливом досягнень фундаментальних наук – таких як ядерна фізика, радіаційна хімія та інших радіобіологія як наука і медична радіологія як сфера практичного її застосування вступили в новий етап свого розвитку. У ці роки в Україні перспективні дослідження були сконцентровані у кількох наукових колективах. Найбільш продуктивним і чисельно найбільшим був колектив, очолюваний О.П. Городецьким. Спочатку цю роботу він розпочав на кафедрі рентгенології і медичної радіології Київського інституту удосконалення лікарів, яка була організована в 1936 році за рішенням Наркомату охорони здоров'я України в складі завідувача кафедри доцента М.І. Шора і двох асистентів. В 1944 році кафедру очолив О.П. Городецький. Експериментальною базою кафедри, де проводили дослідження, був Київський науково–дослідний рентген–радіо–онкологічний інститут (КРРОІ). У 1954 році кафедра була реорганізована в кафедру рентгенології і радіології. Під керівництвом професора О.П. Городецького було підготовлено та захищено 3 дисертації на ступінь доктора медичних наук і 15 на ступінь кандидата наук. У 1957 році вченого обрали член-кореспондентом АН УРСР. Пізніше діяльність О.П. Городецького була пов'язана з Інститутом фізіології ім. О.О. Богомольця АН УРСР, Інститутом фізики АН УРСР, сектором молекулярної біології і генетики Інституту мікробіології АН УРСР, Інститутом експериментальної і клінічної онкології Міністерства охорони здоров'я УРСР. Була створена Наукова Рада АН УРСР з проблеми «Радіобіологія» під головуванням О.П. Городецького.

Під його керівництвом розгорнулись дослідження у кількох найактуальніших напрямках, які з успіхом продовжують його учні та послідовники. Тут досліджуються способи і засоби стимуляції виведення із організму радіоактивних речовин (цезію, стронцію, фосфору, кальцію). Активно розробляються засоби хімічного захисту від променевого ураження, особливості дії на живі організми щільної іонізуючої радіації, дозиметрії радіації, біофізичних, біохімічних та морфофункціональних процесів в опроміненому організмі. Проводяться також порівняльні дослідження дії зовнішнього і внутрішнього опромінення, нейтронів та радіоіонізуючих випромінювань. Результати цих досліджень відображені в монографіях, численних наукових працях і збірниках за редакцією О.П. Городецького, після Чорнобильської катастрофи набули особливої актуальності. Таким чином, наукова діяльність А.О. Городецького сприяла

широкому розгортанню досліджень з радіобіології в Україні. Він вніс вагомий внесок у розвиток і становлення радіобіології в Україні на початку 50-х років ХХ ст.

Широке вивчення основних проблем загальної та рослинної радіобіології розгорнулося в той час у відділі, а пізніше секторі радіобіології та біофізики Інституту фізіології рослин та Інституту клінічної біології та інженерії АН України під керівництвом академіка АН України Д.М. Гродзинського.

Академік Д.М. Гродзинський – засновник Української школи радіобіологів рослин. У 50-х роках ХХ ст. в Інституті фізіології рослин АН У РСР починає формуватися українська школа радіобіологів рослин. У витоків народження цієї наукової школи став молодий вчений Д.М. Гродзинський.

Головним напрямом наукової діяльності Д.М. Гродзинського є фундаментальні дослідження біофізичних аспектів фізіологічних реакцій та механізмів дії іонізуючого випромінювання на вищі рослини. Ідеї Д.М. Гродзинського з проблем надійності біологічних систем, природної радіоактивності ґрунтів та рослин, його розуміння внутрішньоклітинної організації метаболічних фондів та законів живої природи зробили його живим класиком біологічної науки.

У 1947 році Дмитро Михайлович з золотою медаллю закінчив середню школу, а в 1952 році з відзнакою агрономічний факультет Білоцерківського сільськогосподарського інституту і розпочав трудову діяльність старшим агрономом навчально-дослідного господарства. Водночас у 1948 році навчався на заочному відділенні механіко-математичного факультету Московського державного університету ім. М.В. Ломоносова. Як учений-фізіолог рослин Д.М. Гродзинський формувався навчаючись в аспірантурі Інституту фізіології рослин та агрохімії АН УРСР під керівництвом академіка АН УРСР і ВАСГНІЛ П.А. Власюка. Тут він розпочав фундаментальні дослідження в галузі радіобіології та застосування методу мічених атомів у рослинництві. У цей час, закінчив у 1954 році мехмат Московського університету. В аспірантурі читав лекції з атомної енергетики, поповнював знання з біології і фізики, розгорнув фундаментальні та прикладні дослідження. Уже тоді, у далекі 50-ті роки ХХ століття, молодого дослідника зацікавили механізми впливу малих доз іонізуючого випромінювання на живі організми – проблема, яка нині, після Чорнобильської катастрофи набула особливої гостроти. Саме тоді проявився властивий Д.М. Гродзинському талант нетрадиційного підходу до проведення експериментів та глибокого теоретичного осмислення здобутих результатів. Як наслідок - блискучий захист у 1955 році кандидатської дисертації на тему «Действие малих доз ионизирующих излучений на растения». Висловлені в цій праці ідеї та підходи стали основою формування ряду проблем радіобіології рослин, механізмів їх радіостійкості, протипроменевого захисту та післярадіаційного відновлення, успішна розробка яких здійснювалась у наступні роки. Водночас молодого вченого захопили дослідження в галузі фізіології та біохімії рослин із застосуванням радіоізотопного методу.

У 1962 році вийшла у світ перша книга під назвою «Методика применения радиоактивных изотопов в биологии». У 1963 році був написаний і опублікований «Краткий справочник по физиологии растений» у співавторстві з братом А.М. Гродзінським, в якому зібрані різноманітні матеріали. Це була перша спроба скласти словник термінів з фізіології рослин. У 1962-1963 рр. на запрошення Всесвітньої організації з продовольства й харчування ООН (ФАО) Д.М. Гродзінський працював в Югославії експертом із застосування нових методів досліджень, зокрема методу мічених атомів у фізіології рослин.

У 1965 році захистив докторську дисертацію, присвячену вивченню фізіологічної ролі природної радіоактивності в житті рослин, значенню радіоактивних властивостей одного з основних елементів живлення рослин -калію, ролі радіоактивності у виникненні життя на Землі та в еволюції видів.

Ще у 1962 році організував Відділ біофізики і радіобіології. В Інституті фізіології рослин АН УРСР Д.М. Гродзінський пройшов всі етапи шляху від аспіранта і молодшого співробітника до директора цього інституту, яким керував з 1974 року до 1986 року.

Наукові напрями Відділу були досить різноманітними: тут зосереджувались дослідження фотосинтезу і метаболізму рослин за допомогою методу мічених атомів на підставі яких була сформульована теорія компартментальності фондів різних метаболітів на окремі підфонди, що відрізняються функціональними значеннями та інтенсивністю участі в обміні речовин у рослинній клітині. Однак основна увага надавалась вивченню реакції рослин на дію іонізуючої радіації. Надзвичайною подією у житті Відділу було проведення 1-го всесоюзного симпозіуму з радіобіології рослин.

У 1966 році у серії науково-популярної літератури друком вийшла книга «Модели живого и ботаническая бионика», в якій автор розказав про нову науку ботанічну біоніку і дослідження тих явищ в рослинах, що можуть лягти в основу подальшої розробки та удосконалення різноманітних технічних пристроїв і систем.

У 1969 році Д.М. Гродзінському було присвоєне вчене звання професора зі спеціальності «Фізіологія рослин». У 1970 році виходить монографія «Естественная радиоактивность растений и почв», в якій отримали подальший розвиток ідеї про біологічне значення природної радіоактивності та механізмів дії малих доз іонізуючого випромінювання. Глибока наукова ерудиція та енциклопедичні знання дозволили професору Д.М. Гродзінському найбільш повно узагальнити вже існуючий в світовій науці матеріал у галузі теоретичної біології, біологічної фізики та радіаційної біології та підготувати першу в світі фундаментальну монографію «Биофизика растений», яка вийшла з друку у 1972 році та була переведена англійською та польською мовами.

На формування чітких наукових напрямів Відділу біофізики та радіобіології, підготовку наукових кадрів для забезпечення реалізації ідей спрямовував основні зусилля Д.М. Гродзінський. Ширшало коло проблем над яким працював Відділ. Серед них розкриття репопуляційних механізмів післярадіаційного відновлення та

захисту від променевого ураження, системний підхід у дослідженнях явищ репарації та репопуляції, розробка радіобіологічних методів для вивчення міжклітинної взаємодії. У Відділі працювали над розробками, які мали практичне значення. Саме при безпосередній участі Д.М. Гродзинського впроваджено у практику нові способи радіаційного мутагенезу та ядерного бездеградаційного аналізу насіння пшениці на вміст білку, які дозволили значно прискорити отримання високопродуктивних форм сільськогосподарських рослин. Успішно пройшла виробничі випробування та запатентована радіаційна технологія обробки чубуків винограду перед щепленням, що дозволяє значно збільшити вихід високоякісних стійких до філоксери виноградних саджанців і здешевіти їх виробництво.

Результати цього періоду діяльності Відділу були узагальнені у монографіях і збірниках: «Противолучевая защита и пострadiaционное восстановление растений» (1972), «Защита растений от лучевого поражения» (1973), «Механизмы радиоустойчивости растений» (1976), «Формы пострadiaционного восстановления растений» (1980), «Формирование радиобиологической реакции растений» (1984), «Клеточные механизмы пострadiaционного восстановления растений» (1985). У цей період Дмитро Михайлович став лауреатом премії ім. М.Г. Холодного АН УРСР. У 1975 році відбувся 1-ий симпозіум, присвячений надійності клітин. Основні положення теорії надійності біологічних систем було висвітлено у серії книг з теорії надійності, а саме: «Надежность растительных систем» (1983), «Надежность и старение биологических систем» (1987). Ця ідея Д.М. Гродзинського виявилась евристичною, тому досить швидко опанувала багатьма розділами в біології.

Серед наукових працівників та студентів широкою популярністю користується капітальна праця «Радиобиология растений», яка вийшла з друку в 1988 році. Підручник «Біофізика» (1988) був удостоєний у 1992 році Державної премії в галузі науки і техніки.

Після трагічних подій 1986 року, Чорнобильської аварії, відразу були розгорнуті дослідження, пов'язані з упередженням негативних радіоекологічних і радіобіологічних наслідків аварії. Була розроблена система перепрофілювання сільськогосподарського виробництва в районах з підвищеним рівнем забруднення радіонуклідами, а також рекомендації щодо зниження їх вмісту в продуктах харчування. Результати комплексних досліджень віддалених радіоекологічних, радіобіологічних та медичних наслідків Чорнобильської катастрофи, як основи їх прогнозування та корекції вийшли під редакцією Д.М. Гродзинського у монографіях «Антропогенная радионуклидная аномалия и растения» (1991) та «Віддалені радіобіологічні та радіоекологічні наслідки Чорнобильської аварії» (1996). Вперше створено цілісну картину причинно-наслідкових зв'язків між перерозподілом радіонуклідів в екосистемах, формування дозових навантажень.

Д.М. Гродзинський – один із засновників Української екологічної асоціації «Зелений світ». Читав лекції з проблем екології та захисту рослин в університетах

Великобританії, США, Югославії. До 10-річчя Чорнобильської катастрофи виступав з Темами в Колумбійському та Гумбольтському університетах (1996). Він є автором близько 700 наукових праць, серед яких 20 монографій. Відома у світі наукова школа Д.М. Гродзинського у галузі радіобіології рослин, яка нині становить понад 50 кандидатів та 10 докторів наук. Чудовий педагог, він вмів захопити молодих дослідників творчим задумом. Від 1957 року викладає у Київському університеті ім. Т. Шевченка, завідувач та професор кафедри радіобіології, водночас професор Національного університету Києво-Могилянська Академія та Міжнародного Соломонового університету.

Від 1990 року Д.М. Гродзинський – дійсний член національної АН України із спеціальності «Радіобіологія». У 1998 році до 80-річного ювілею Національної АН України академікові Д.М. Гродзинському було присвоєне державне звання «Заслужений діяч науки і техніки України». Водночас його було обрано на посаду академіка-секретаря Відділення загальної біології НАН України. Від 2001 року Д.М. Гродзинський входить до складу науково-консультативної ради науково-популярного журналу «Країна знань». На його сторінках він пише: «Наука – це надійний шлях у впевнене майбутнє справді чарівних можливостей епохи, в яку вже сьогодні вступає нове покоління юнацтва». Високообдарований, високоосвічений, делікатний, улюбленець багатьох – ось такий він академік Дмитро Михайлович Гродзинський. Він є учителем, радником та прикладом для всіх. Ім'я Д.М. Гродзинського занесене до Золотої книги української еліти.

Узагальнюючи численні дослідження вітчизняних і зарубіжних радіобіологів, можна стверджувати, що розвиток в Україні загальної і сільськогосподарської радіобіології, функціонування наукових шкіл зокрема О.П. Городецького, Д.М. Гродзинського відкрив широкі перспективи для використання виявлених закономірностей. На даний час створені і використовуються радіаційно-біологічні технології в різних галузях сільського господарства.

У рослинництві використовуються такі технології: передпосівне опромінення насіння та передпосівне опромінення органів вегетативного розмноження і розсади для прискорення їхнього росту, розвитку та підвищення продуктивності рослин, опромінення насіння та іншого садивного матеріалу (бульби, живці, кореневища) з метою виведення нових сортів і вихідного матеріалу для їх одержання. Використання методу радіаційного мутагенезу дало можливість створити в світі понад 3 тисяч сортів культурних рослин, серед яких половина – сільськогосподарські культури; радіаційна біотехнологія подолання несумісності тканин і стимуляції зростання при вегетативних щепленнях рослин; радіаційна технологія запобігання проростанню бульб, коренеплодів та цибулин при зберіганні; технологія подовження строків зберігання ягід, фруктів та овочів; радіаційна консервація продукції рослинництва і плідництва; радіаційні способи боротьби з комахами – шкідниками сільськогосподарських культур.

У тваринництві: радіаційна технологія консервування кормів та поліпшення їх якості; подовження строків зберігання м'яса та м'ясних продуктів; технологія

зnezараження продукції тваринництва; технологія зnezараження стічних вод тваринницьких комплексів.

У наукових дослідженнях також використовуються досягнення радіобіології. Розроблено метод ізотопних індикаторів у дослідженнях сільськогосподарської біології; мічені сполуки і добрива; радіоавтографія; методики використання радіоактивних ізотопів у вегетаційних та польових дослідженнях.

Академік Української академії аграрних наук, доктор біологічних наук, професор Ігор Миколайович Гудков, найближчий учень і послідовник академіка Д.М. Гродзинського, зробив значний особистий внесок у розвиток радіобіології рослин і радіаційної цитології. Його наукові праці відомі не лише в нашій країні, а і за її межами. Вони отримали міжнародне визнання.

Народився І.М. Гудков 27 липня 1940 року. Після закінчення школи в 1957 році вступив на факультет агрохімії і ґрунтознавства Української сільськогосподарської академії і в 1962 році отримав диплом ученого-агронома за спеціальністю агрохімік-ґрунтознавець. Наукові інтереси І.М. Гудкова формувались під впливом видатного вченого академіка П.А. Власюка.

Після закінчення академії він працює в 1962-1964 роках молодшим науковим співробітником Миронівської селекційно-дослідної станції в Київській області. Тут він проводив дослідження з вивчення впливу іонізуючої радіації на процеси обміну і продуктивність рослин, по модифікації радіаційного ураження.

З 1964 року по 1987 рік доля пов'язала його з Інститутом фізіології рослин АН УРСР, де він подолав шлях від аспіранта, молодшого, а потім старшого наукового співробітника, завідувача науковим відділом, до заступника директора інституту з наукової роботи. Тут він став кандидатом (1967) і доктором біологічних наук (1979).

Під керівництвом П.А. Власюка і Д.М. Гродзинського досліджував радіозахисні властивості солей заліза, цинку, марганцю, кобальту і фітогормонів. Цими дослідженнями І.М. Гудков вперше довів радіозахисні властивості солей цих металів і ефективність цих з'єднань не тільки при гострому, а і хронічному гамма випромінюванні. Разом із Д.М. Гродзінським і Є.Ю. Фіалковою ним встановлена висока протипроменева ефективність ненасичених вуглеводнів. З кінця 60-х років ХХ ст. І.М. Гудков починає дослідження механізмів пострадіаційного відновлення рослин. Ним вперше було досліджено методом авторадіографії і продемонстровано позаплановий синтез ДНК у клітинах рослин, доведена можливість їх відновлення шляхом репарації цієї макромолекули.

Особливо важливе значення мають дослідження І.М. Гудкова щодо впливу іонізуючого випромінювання на поліферацію клітин рослин. Детально вивчивши пофазну радіочутливість меристемних клітин у спокої, а також кінетику їх розмноження в пострадіаційний період, він показав роль клітинної гетерогенності в радіостійкості і пострадіаційному відновленні утворювальних тканин. Його дослідження засвідчили, що меристеми тканин як специфічні утворювальні тканини являють собою популяцію стовпових і напівстовпових клітин, мають

властивості високої радіочутливості, що може бути зіставлена з радіочутливістю проліферуючих клітин ссавців. Тому він запропонував називати їх критичними тканинами рослин. Дослідник довів, що закономірності порушення клітин цих постійно відновлюваних тканин, їхніх змін під впливом випромінювання і відновлення однакові для всіх високоорганізованих багатоклітинних організмів та меристеми і можуть слугувати зручною моделлю для вивчення цих процесів.

Праці І.М. Гудкова одержали визнання не тільки серед радіобіологів рослин, а і спеціалістів у галузі радіобіології тварин і людини. У 60 - 70-х роках минулого століття разом з академіком Д.М. Гродзинським він організовує роботу з індукції радіаційного мутагенезу у рослин, проводить масове опромінення селекційного матеріалу для використання в закладах, що працюють у цьому напрямі. Він провів дослідження на гамма-полі одного з відділень Всесоюзного інституту рослинництва, якими було доведено можливість протипроменевого захисту рослин в умовах хронічного опромінення.

У 1987 році І.М. Гудков повертається в Українську сільськогосподарську академію і організовує першу в Україні кафедру радіобіології. Після аварії на Чорнобильській АЕС перед радіобіологічною наукою постали нові завдання, пов'язані із запобіганням негативним радіоекологічним та радіобіологічним наслідкам аварії. На кафедрі започатковуються дослідження з оцінки радіонуклідного забруднення ґрунтів і продукції агропромислового виробництва, пошуку шляхів мінімізації накопичення радіонуклідів у рослинах і організмі тварин. На основі вивчення механізмів взаємодії елементів живлення і радіонуклідів встановлена можливість деяких мікроелементів блокувати надходження радіостронцію і радіоцезію в рослини, були створені форми складних органо-мінеральних добрив, які знижують накопичення радіонуклідів. Досліджуються можливості використання у тваринництві ентеросорбентів з метою зниження коефіцієнтів переходу радіонуклідів у продукцію тваринництва.

І.М. Гудков – автор понад 320 наукових праць з радіобіології, зокрема 8 монографій, 6 підручників, має 8 авторських свідоцтв і патентів на винаходи. Під його науковим керівництвом підготовлено 8 кандидатів і 3 доктори наук. За досягнення в галузі науки і підготовки кадрів І.М. Гудков удостоєний звання лауреата премії ім. М.Г. Холодного НАН України і міжнародного звання Соросовського професора. Він є членом редакційної ради журналу «Радиационная биология. Радиоэкология», ряду спеціалізованих учених рад.

Отже, як учень і послідовник ідей академіка НАН України Д.М. Гродзинського академік НААН І.М. Гудков робить вагомий внесок у розвиток радіобіології в Україні. Під його керівництвом численні учні та послідовники примножують досягнення радіобіологічної науки України.

Історія ядерних і радіобіологічних досліджень

1895 Відкриття X-променів В. Рентген

1896 Відкриття природної радіоактивності А. Беккерель

1897 Відкритий електрон і змряний його заряд (1898) Д. Томсон

- 1898 Виділені радій і полоній П. Кюрі, М. Складовська-Кюрі:
 1900 Ідентифіковані компоненти іонізуючого випромінювання
 1903 Запропонована перша модель атома Д. Томсон
 1905 Запропонована теорія відносності А. Енштейн
 1910 Відкриття ізотопів Ф. Содді
 1911 Запропонована ядерна (планетарна) модель атома Е. Резерфорд
 1912 Відкриті космічні промені В. Гесс
 1913 Запропоновані постулати квантової механіки Н. Бор
 1927 Розроблена теорія квантової механіки Е Шредінгер, Борн, Гейзенберг, П. Дірак
 1930 Теоретично передбачене існування нейтрино В. Паулі
 1930 Відкриття берилієвого випромінювання В. Боте, Е. Беккер
 1932 Відкриття нейтрона Дж. Чедвик
 1932 Проведена перша ядерна реакція за допомогою прискорених частинок. Д. Кокрофт, Е. Уолтон
 1932 Відкриття позитрона К. Андерсон
 1933 Запропонована кількісна теорія розпаду Э. Фермі
 1934 Відкриття штучної радіоактивності І. Кюрі, Ф. Жоліо-Кюрі
 1934 Відкритий ефект Черенкова – Вавилова С. Вавілов, П. Черенков
 1935 Запропонована обмінна теорія ядерних сил Х. Юкава
 1937 Відкриття К-захвату Л. Альварец
 1938 Відкриття вимушеного ділення важких ядер О. Ган, Ф. Штрассман
 1940 Одержані перші трансуранові елементи Е. Фермі
 1940 Відкриття спонтанного ділення важких ядер К. Петржак, Г. Флеров
 1942 Запущений перший ядерний реактор Е. Фермі
 1945 Підірвана перша атомна бомба групою вчених США
 1947 Виявлені мезони в космічних променях Ч. Латтес, С. Пауелл
 1952 Підірвана перша термоядерна бомба групою вчених США
 1954 Пущена перша промислова АЕС групою вчених СРСР
 1956 Експериментальне виявлення нейтрино Ф. Рейнес, К. Коуен
 1970 Відкрита протонна радіоактивність Дж. Черні
 1984 Відкрита ^{14}C – радіоактивність Х. Роуз, Дж. Джоунс

2. Будова атома. Поняття радіоактивності.

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

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

Електрон – стійка елементарна частка з масою спокою, рівною 0,000548 атомної одиниці маси (а.о.м.) або $9,1 \times 10^{-28}$ грам. Електрон несе один елементарний

негативний заряд електрики, рівний $1,6 \times 10^{-19}$ Кл, який у ядерній фізиці прийнятий за одиницю.

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

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

Ми знаємо, що атом схожий на Сонячну систему в мініатюрі: навколо маленького ядра рухаються по орбітах «планети»-електрони. Розміри ядра в сто тисяч разів менші за розміри самого атома, але щільність його дуже велика, оскільки маса ядра майже дорівнює масі всього атома. Ядро, як правило, складається з декількох більш дрібних частинок, які щільно зчеплені одна з одною.

Деякі із цих частинок мають позитивний заряд і називаються протонами. Число протонів у ядрі й визначає, до якого хімічного елемента належить даний атом: ядро атома водню містить усього один протон, атома кисню – 8, урану – 92. У кожному атомі число електронів точно дорівнює числу протонів у ядрі; кожний електрон несе негативний заряд, що дорівнює за абсолютною величиною заряду протона, тому в цілому атом нейтральний.

У ядрі, як правило, наявні й частинки іншого типу, що називаються нейтронами, оскільки вони електрично нейтральні. Ядра атомів того самого елемента завжди містять те саме число протонів, але число нейтронів у них може бути різним. Атоми, що мають ядра з однаковим числом протонів, але відрізняються за числом нейтронів, належать до різних різновидів того самого хімічного елемента і називаються **ізотопами** даного елемента. Щоб відрізнити їх один від одного, до символу елемента приписують число, що дорівнює сумі всіх частинок у ядрі даного ізотопу. Так, уран-238 містить 92 протони й 146 нейтронів; в урані-235 теж 92 протони, але 143 нейтрони. Ядра всіх ізотопів хімічних елементів утворюють групу «**нуклідів**».

Деякі нукліди стабільні, тобто без зовнішнього впливу ніколи не зазнають ніяких перетворень. Більшість же нуклідів нестабільні, вони увесь час перетворюються в інші нукліди.

Як приклад візьмемо хоча б атом урану-238, у ядрі якого протони й нейтрони ледь утримуються разом силами зчеплення. Час від часу з нього виривається компактна група із чотирьох частинок: двох протонів і двох нейтронів (α -частинка). Уран-238 перетворюється таким чином у торій-234, у ядрі якого утримуються 90 протонів і 144 нейтрони. Але торій-234 також нестабільний. Його перетворення відбувається, однак не так, як у попередньому випадку: один з його нейтронів перетворюється в протон, і торій-234 перетворюється в протактиній-234,

у ядрі якого 91 протон і 143 нейтрони. Ця метаморфоза, що відбулася в ядрі, позначається й на електронах, що рухаються по своїх орбітах: один з них стає неспареним і вилітає з атома. Протактиній дуже нестабільний і йому потрібно зовсім небагато часу на перетворення. Далі відбуваються інші перетворення, що супроводжуються випромінюваннями, і весь цей ланцюжок зрештою закінчується стабільним нуклідом свинцю.

При кожному такому акті розпаду вивільняється енергія, яка й передається далі у вигляді випромінювання. 1 г урану при розпаді може виділити 24 тис. кВт теплової енергії. Необхідно зазначити (хоча це й не зовсім строго), що випущення ядром частинки, що складається із двох протонів і двох нейтронів, – це альфа-випромінювання; випущення електрона, як у випадку розпаду торію-234, – це бета-випромінювання. Часто нестабільний нуклід виявляється настільки збудженим, що випущення частинки не приводить до повного зникнення енергії збудження; тоді він викидає порцію чистої енергії, що називається гамма-випромінюванням (гамма-квантом). Як і у випадку рентгенівських променів (багато в чому подібних до гамма-випромінювання), при цьому не відбувається випущення яких-небудь частинок.

Ядра нестабільних атомів виділяють надлишкову енергію у вигляді іонізуючого випромінювання. Такі атоми називають радіоактивними. У міру розпаду радіоактивних ядер рівень активності зменшується. Увесь процес мимовільного розпаду нестабільного нукліда називається **радіоактивним розпадом**, а сам такий нуклід – радіонуклідом. Але хоча всі радіонукліди нестабільні, одні з них більш нестабільні, ніж інші. Наприклад, протактиній-234 розпадається майже моментально, а уран-238 - дуже повільно. Половина всіх атомів протактинію в якому-небудь радіоактивному джерелі розпадається за час трохи більше хвилини, у той же час половина всіх атомів урану-238 перетвориться в торій-234 за чотири з половиною мільярди років.

Час, за який розпадається в середньому половина всіх радіонуклідів даного типу в будь-якому радіоактивному джерелі, називається **періодом піврозпаду** відповідного ізотопу. Цей процес триває безупинно. За час, що дорівнює одному періоду піврозпаду, залишаться незмінними кожні 50 атомів із 100, за наступний аналогічний проміжок часу 25 із них розпадуться, і так далі за експоненціальним законом.

Кількісною характеристикою будь-якого джерела іонізуючих випромінювань є його активність (радіоактивність), якісною - вид і енергія випромінювання, проникна здатність, період піврозпаду.

Число розпадів за секунду в радіоактивному зразку називається його **активністю**. Одиницю вимірювання активності (у системі СІ) назвали беккерелем (Бк) на честь вченого, що відкрив явище радіоактивності. Один беккерель дорівнює одному розпаду за секунду.

Радіоактивні випромінювання, що відбуваються в природі без зовнішнього впливу, називаються природньою радіоактивністю, а в штучно отриманих під

впливом альфа-, нейтронного випромінювань речовинах (через ядерні реакції) – штучною або наведеною радіоактивністю. У цей час відомі 3 природніх радіоактивних родини:

1. Урану-Радію – ${}_{92}^{238}\text{U}$ і ${}_{88}^{226}\text{Ra}$, які через 8 альфа- і 6 бета-розпадів перетворюються в стабільний ізотоп свинцю – ${}_{82}^{208}\text{Pb}$.

2. Торію – ${}^{232}\text{Th}$, який через 6 альфа- і 4 бета-розпадів перетворюється в стабільний ізотоп свинцю.

3. Актинію-Урану – ${}_{92}^{235}\text{U}$ і ${}_{89}^{235}\text{Ac}$, які в результаті 7 альфа- і 4 бета- розпадів також перетворюються в стабільний ізотоп свинцю.

3. Типи ядерних перетворень.

Ядра атомів у стабільному стані стійкі, але змінюють свій стан при порушенні певного співвідношення протонів і нейтронів. Якщо в ядрі занадто багато протонів або нейтронів, то такі ядра нестійкі й піддаються радіоактивним перетворенням, у результаті яких змінюється склад ядра, тобто ядро атома одного хімічного елемента перетворюється в ядро атома іншого хімічного елемента – це явище називається **радіоактивністю**, а сам процес – **ядерним (радіоактивним) розпадом** або **ядерним перетворенням**.

Розрізняють корпускулярне і фотонне іонізуючі випромінювання. У першому випадку при радіоактивному перетворенні ядра атома з нього вилітають частинки - альфа, бета, нейтрони, протони, мезони і т.д. При фотонному (електромагнітному) випромінюванні утворюється квант енергії - рентгенівське або гамма-випромінювання радіоактивних елементів.

Різні види випромінювань супроводжуються вивільненням різної кількості енергії і мають різну проникну здатність.

Іонізуюче випромінювання – це електромагнітне і корпускулярне випромінювання яке при взаємодії з речовинами прямо або непрямо викликає іонізацію (*появу вільних позитивних та негативних іонів*) і збудження її атомів і молекул.

Іонізуюче випромінювання (радіація) – потік часток або квантів електромагнітного випромінювання, взаємодія якого з речовиною приводить до іонізації та збудження його атомів і молекул. До іонізуючого випромінювання відносяться потоки електронів, позитронів, протонів, дейтронів, α -часток і ін. заряджених часток, а також потоки нейтронів, рентгенівське й гамма-випромінювання

Поняття «**іонізуюче випромінювання**» об'єднує різні за своєю фізичною природою види випромінювання.

Подібність між ними полягає в тому, що всі вони характеризуються високою енергією, реалізують свою біологічну дію через **ефекти іонізації**, що в біологічних структурах призводить до загибелі клітин.

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

Розрізняють такі види іонізуючого випромінювання – **корпускулярне і фотонне** (електромагнітне).

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

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

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

Опосередковано іонізуюче випромінювання (**нейтронне, фотонне**) складається з незаряджених частинок, взаємодія яких середовищем до виникнення заряджених частинок здатних викликати іонізацію.

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

Перехід ядра із збудженого стану в незбуджений супроводжується випусканням гамма-випромінювання.

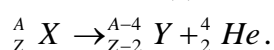
Іонізуюче випромінювання має ряд спільних ознак. За характером впливу на об'єкти навколишнього середовища найбільш цікавими є дві з них: здатність проникати через різні товщі матеріалів (проникаюча здатність) і здатність іонізувати атоми і молекули речовини, у якій вони поширюються (іонізуюча здатність)

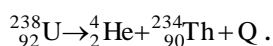
Чим більша маса частинок, тим більша їх іонізуюча здатність і тим менша довжина пробігу в навколишньому середовищі, тобто менша проникаюча здатність.

Отже: *альфа-частинки* мають найбільшу іонізуючу і найменшу проникаючу здатність; *гамма-промені*, нейтрони мають найбільшу проникаючу і найменшу іонізуючу здатність тому, основну небезпеку для людей при **зовнішньому** опроміненні становлять **гамма-промені** і нейтрони, а при **внутрішньому** опроміненні (при попаданні радіоактивних речовин усередину організму) - **альфа- і бета-частинки**.

Альфа-розпад характерний для радіоактивних елементів з великими порядковими номерами (урану, плутонію, америцію), за рідкісним винятком, альфа-активні (^{60}Co і ін.) При цьому з ядра атома вилітає α -частинка, яка складається з двох протонів і двох нейтронів і являє собою ядро атома гелію. Альфа-розпад призводить до зменшення порядкового номера атома на дві одиниці, а масового числа – на чотири.

Схема альфа-розпаду має такий вигляд:



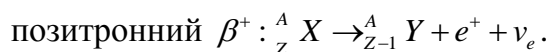
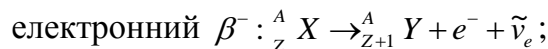


Альфа-частинки мають позитивний заряд, швидкість поширення 20000 км/с, мають велику масу – 4,003 а.о.м., велику енергію – 2-11 Мев (мегаелектронвольт) поширенн, у повітрі 2-10 см, у біологічних тканинах – кілька десятків мікрометрів.

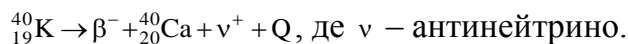
Альфа-випромінювання, що являє собою потік важких частинок, що складається із нейтронів і протонів, практично не здатне проникнути через зовнішній шар шкіри, утворений відмерлими клітинами, і затримується, наприклад, аркушем паперу. Тому воно не становить небезпеки до того часу, поки радіоактивні речовини, що випускають α -частинки, не потрапляють усередину організму через відкриту рану, з їжею або з повітрям. Тоді вони стають надзвичайно небезпечними. У повітрі на 1 см шляху альфа-частинка утворює 100-250 тис. пар іонів, при влученні в організм вони вкрай небезпечні для людини й тварин (щільне іонізуюче радіоактивне випромінювання).

З рядом природніх і штучних радіоактивних елементів відбувається розпад з випускненням електронів і позитронів. Електрони й позитрони, що випускаються ядрами, називаються бета-частинками або **бета- випромінюванням**, а самі ядра – бета-активними.

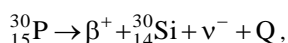
Бета-розпад існує у двох різновидах - електронний і позитронний. У першому випадку з ядра радіоактивного атома вилітає електрон, що має негативний заряд, у другому - позитрон, що несе позитивний заряд. Схематично бета-розпад можна подати так:



Якщо в ядрі є надлишок нейтронів, то відбувається **електронний бета-розпад**. При цьому виді ядерних перетворень один з нейтронів перетворюється в протон, а ядро випускає **електрон і антинейтрино** й виникає ядро нового елемента при незмінному масовому числі. Виліт електронів супроводжується викидом антинейтрино – елементарної частки з масою менш 1/2000 маси спокою електрона, дочірній елемент зрушать у таблиці Д.І. Менделєєва на 1 поле. Наприклад:



При надлишку протонів відбувається **позитронний (β^+) бета-розпад**. Він супроводжується утворенням нового елемента, розташованого в періодичній таблиці Д.І. Менделєєва на 1 позицію вліво від материнського; протон перетворюється в нейтрон, енергія виділяється також у вигляді елементарної частки – нейтрино. Позитрон зриває з електронної оболонки електрон, утворює пари позитрон – електрон, при взаємодії яких утворюються 2 гамма-кванта (процес аннігіляції). Наприклад:



де Q – енергія двох гамма-квантів. Взаємодія між електронами й речовиною також приводить до процесів іонізації й збудження атомів і молекул. При взаємодії

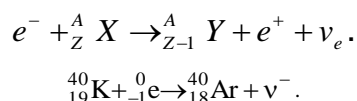
з орбітальними електронами бета-частинка відхиляється від первісного шляху (однойменні заряди відштовхуються), тому глибина проникнення бета-частинок у речовину менше, ніж довжина пробігу.

Пробіг бета-частинки в повітрі - до 1 м, у біологічній тканині - від 0,2 до 3 см. Щільність іонізації в сотні і тисячі разів менша, ніж у альфа-випромінювання. Цим обумовлюється і менший негативний ефект бета-випромінювання.

Маючи меншу іонізуючу здатність, бета-частинки мають більшу проникну здатність. Однак одяг людини поглинає до 50% бета-частинок, а віконне або автомобільне скло і металеві екрани товщиною в кілька міліметрів затримують їх практично повністю.

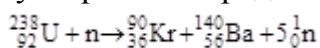
До радіоактивних перетворень поряд з альфа- і бета-розпадом відносять також К-захоплення, поділ ядер і ядерний синтез.

К-захоплення – захоплення ядром одного з електронів з найближчої К-оболонки атома. У цьому випадку має місце таке саме перетворення ядра, як і при позитронному розпаді:



При К-захопленні єдиною часткою, що вилетіла, є антинейтрино, виникає також характеристичне рентгенівське випромінювання.

Поділ ядер (мимовільний і вимушений) характерний для елементів з великим атомним номером при захопленні їхніми ядрами нейтронів. У результаті поділу утворюються радіоактивні уламки і надлишкова кількість нейтронів.



Нейтрони не несуть заряду (електронейтральні) проникаюча здатність у повітрі й у біологічних тканинах дуже велика, вони є щільно іонізуючими, атомні ядра при поглинанні нейтронів стають нестійкими, розпадаються з випускненням протонів, альфа-частинок, фотонів гамма-випромінювання, осколків ядра.

У результаті взаємодії з речовинами повільні нейтрони (0,025-0,1 Мев) проникають у ядро атома, де вони «захоплюються» або втримуються. Швидкі нейтрони (з енергією більш 0,1 Мев) взаємодіють шляхом пружного зіткнення з ядром.

Переважаючий внесок того або іншого виду ядерної взаємодії в поглинання нейтронного випромінювання залежить від складу речовини, що опромінюється, і від кінетичної енергії нейтронів. Залежно від енергії нейтрони можуть бути розділені на наступні групи:

- надшвидкі або релятивістські ($E > 103 \text{ MeV}$);
- дуже швидкі ($E = 10-103 \text{ MeV}$);
- швидкі ($E = 0,1-10 \text{ MeV}$);
- проміжні ($E = 0,5-100 \text{ keV}$);
- повільні ($E = 0,1 \text{ eV} - 0,5 \text{ keV}$);
- теплові ($E < 0,1 \text{ eV}$).

Ядерний синтез відбувається при температурі більше декількох мільйонів градусів. У цих умовах ядра легких елементів об'єднуються в ядра більш важких. Прикладом штучно створеної ядерної реакції синтезу є воднева бомба.

Гамма-випромінювання являє собою потік електро-магнітних хвиль, що випускаються окремими порціями (квантами) і поширюються зі швидкістю світла. Гамма-промені не несуть електричного заряду, але завдяки високій швидкості переміщення здатні выбивати електрони з атомів будь-яких хімічних елементів (фотоелектрична дія). Маючи велику проникну здатність, гамма-промені становлять небезпеку для живих організмів, насамперед при зовнішньому опроміненні.

Джерелами гамма-випромінювання є ядерні реакції і розпад багатьох радіоактивних речовин.

Рентгенівське випромінювання належить також до електромагнітних і являє собою потік електромагнітних хвиль.

Відкриття рентгенівського випромінювання приписується Вільгельму Конраду Рентгену. Він був першим, хто опублікував статтю про рентгенівські промені, які він назвав ікс-променями (x-гау). Вважається, однак, доведеним, що рентгенівські промені вже були отримані до цього. Катодопроменева трубка, яку Рентген використовував у своїх експериментах, була розроблена Й. Хітторфом і В. Круксом. При роботі цієї трубки виникають рентгенівські промені. Однак ніхто з них не усвідомив значення зробленого ними відкриття й не опублікував своїх результатів. Із цієї причини Рентген не знав про зроблені висновки і відкрив промені незалежно — при спостереженні флюоресценції, що виникає при роботі катодопроменевої трубки.

На деяких мовах (включаючи російську і німецьку) ці промені були названі його іменем, незважаючи на його заперечення. За відкриття рентгенівських променів Рентгену в 1901 році була присуджена перша Нобелівська премія з фізики, причому нобелівський комітет підкреслював практичну важливість його відкриття.

Фотони рентгенівського випромінювання мають енергію від 100 еВ до 250 кеВ, що відповідає випромінюванню із частотою від $3 \cdot 10^{16}$ Гц до $6 \cdot 10^{19}$ Гц і довжиною хвилі 0,005-10 нм (загально визнаної межі діапазону рентгенівських променів на шкалі довжин хвиль не існує). М'який рентген характеризується найменшою енергією фотона та частотою випромінювання (і найбільшою довжиною хвилі), а жорсткий рентген має найбільшу енергію фотона та частоту випромінювання (і найменшу довжину хвилі). Жорсткий рентген використовується переважно у промислових цілях.

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.

Рентгенівські промені виникають при сильному прискоренні заряджених частинок або при високоенергетичних переходах в електронних оболонках атомів або молекул. У процесі прискорення-гальмування лише близько 1% кінетичної енергії електрона йде на рентгенівське випромінювання, 99 % енергії перетворюється на тепло.

На Землі електромагнітне випромінювання в рентгенівському діапазоні утворюється в результаті іонізації атомів випромінюванням, яке виникає при радіоактивному розпаді, а також космічним випромінюванням. Радіоактивний розпад також приводить до безпосереднього випромінювання рентгенівських квантів, якщо викликає перебудову електронної оболонки атома, що розпадається (наприклад, при електронному захопленні). Рентгенівське випромінювання, яке виникає на інших небесних тілах, не досягає поверхні Землі, тому що повністю поглинається атмосферою.

Рентгенівські промені можуть проникати крізь речовину, причому різні речовини по-різному їх поглинають. Поглинання рентгенівських променів є найважливішою їх властивістю в рентгенівській зйомці.

Рентгенівське випромінювання є іонізуючим. Воно впливає на тканини живих організмів і може бути причиною променевої хвороби, променевих опіків і злоякісних пухлин. Через це при роботі з рентгенівським випромінюванням необхідно дотримуватися заходів захисту. Рентгенівське випромінювання є мутагенним чинником.

Рентгенівські промені здатні викликати у деяких речовин світіння (флюоресценцію). Цей ефект використовується в медичній діагностиці при рентгеноскопії (спостереження зображення на флюоресціюючому екрані) і рентгенівській зйомці (рентгенографії).

Виявлення дефектів у виробках (рейках, зварювальних швах і т.д.) за допомогою рентгенівського випромінювання називається рентгенівською дефектоскопією.

У матеріалознавстві, кристалографії, хімії й біохімії рентгенівські промені використовуються для з'ясування структури речовин на атомному рівні за допомогою дифракційного розсіювання рентгенівського випромінювання (рентгеноструктурний аналіз). Відомим прикладом є визначення структури ДНК.

Крім того, за допомогою рентгенівських променів може бути визначений хімічний склад речовини. В електронно-променевому мікрозонді (або ж в електронному мікроскопі) аналізована речовина опромінюється електронами, при цьому атоми іонізуються й випромінюють характеристичне рентгенівське випромінювання. Замість електронів може використовуватися рентгенівське випромінювання. Цей аналітичний метод називається рентгенофлуоресцентним аналізом.

4. Взаємодія іонізуючого випромінювання з речовиною.

Процес проходження **іонізуючого випромінювання**, що несе великий запас енергії, через речовину, залишає свій слід у вигляді змін структури речовини.

Характер взаємодії випромінювання з речовиною залежить від його виду, енергії, щільності потоку, а також від фізичних і хімічних властивостей самої речовини.

Взаємодія іонізуючого випромінювання з речовиною буває двох типів: пружна й непружна.

Пружне розсіювання частинок – процес зіткнення частинок, у результаті якого змінюються тільки їх імпульси, а внутрішні стани залишаються незмінним.

Непружне розсіювання частинок – зіткнення частинок, що призводить до зміни їх внутрішнього стану, перетворенню в інші частинки або додатковому виникненню нових частинок.

Іонізуючі випромінювання у вигляді α - і β -частинок при непружній взаємодії з електронними оболонками атомів середовища супроводжується втратою енергії іонізуючого випромінювання на іонізацію й збудження атомів середовища, тобто виявляє пряма іонізуюча дія на речовину, у якому поширюється. Взаємодія β -випромінювання з електронними оболонками атомів середовища іноді називають побічно іонізуючим випромінюванням.

При проходженні іонізуючих випромінювань, основну роль у їхній взаємодії з речовиною відіграють взаємодії з електронами атомів речовини й меншою мірою з ядрами, оскільки ядро займає 10^{-12} - 10^{-15} частину об'єму. Ядерні сили не приймають участі в такій взаємодії через коротку дію зазначених сил (10^{-13} см). При непружному зіткненні спостерігається втрата енергії частинки, яка витрачається на іонізацію й збудження атомів середовища (іонізаційні втрати енергії). При пружному зіткненні з електричним полем ядра заряджена частинка гальмується й міняє напрямок свого руху. При цьому відбувається випуск електромагнітного випромінювання, що називається гальмівним. Зменшення кінетичної енергії заряджених частинок у процесі взаємодії з електричним полем ядра називають радіаційними втратами енергії.

У міру проходження через речовину енергія альфа-частинок і бета-частинок поступово зменшується. Процес іонізації закінчується тоді, коли енергія іонізуючої частки стає нижче порогу роботи (34 еВ). Альфа-частинка при цьому приєднує до себе 2 електрона й перетворюється в атом гелію, бета-частинка (електрон) стає електроном середовища.

Число пар іонів, утворене зарядженими частинками на своєму шляху через речовину» називається повною іонізацією.

Іонізаційні втрати частинки залежать від:

1) властивостей середовища (густини речовини, або числа електронів в одиниці об'єму);

2) швидкості й заряду частинки, що пролітає; залежність від середнього іонізаційного потенціалу логарифмічна, тобто досить слабка.

Таким чином, для частинок однакової енергії повна іонізація буде однакова, але щільність іонізації для бета-частинок значно менше, ніж для альфа-частинок.

Величина енергії, яку втрачає бета-частинка на одиниці довжини шляху,

набагато менше, ніж для альфа-частинки й тому пробіг бета-частинок у речовині значно більше.

Довжина пробігу:

Пробігом (або довжиною пробігу) іонізуючої частки називають шлях, на якому дана частка робить іонізацію в речовині. Чим більше енергія частки, тим більше її пробіг. Пробіги альфа-частинки в повітрі досягають максимум 8-9 см, а в м'яких біологічних тканинах - кілька десятків мікрон. Пробіги бета-частинок у повітрі досягають 10-11 м, а в м'яких біологічних тканинах - до 1 см

Виявлені істотні відмінності в механізмі проходження через речовину заряджених часток легких заряджених часток (електронів, позитронів), важких заряджених часток (альфа-частинок, протонів, дейтронів, важких ядер і ін.) і електромагнітних випромінювань, хоча основна роль у їхній взаємодії з речовиною належить електромагнітним процесам. Ще більш істотні відмінності в механізмі взаємодії нейтронів з речовиною. На відміну від усіх інших випромінювань, для нейтронів характерні ядерні взаємодії.

Проходження важких заряджених часток через речовину

Важка заряджена частинка, проходячи через речовину, збуджує й іонізує атоми речовини, на що втрачає свою енергію. Розгубивши свою енергію, частинка зупиняється. Через дальню дію кулонівських сил частка, що пролітає, встигає провзаємодіяти із більшою кількістю атомів. У силу своєї великої маси (у порівнянні з масою електрона) частка при зіткненні з електроном мало відхиляється від свого шляху. Тому траєкторія важкої зарядженої частки в речовині прямолінійна.

Основними фізичними величинами, що характеризують проходження важких часток через речовину, є лінійні втрати енергії і повний пробіг частки в речовині.

Зустрічаючи на своєму шляху атоми, частинка втрачає свою енергію: 1) у процесі зіткнення з електронами, 2) у кулонівському відштовхуванні ядрами й 3) у ядерному зіткненні з ядрами.

Іонізаційні втрати. Для важких заряджених частинок основними є втрати енергії на іонізацію й збудження атомів середовища (іонізаційні втрати), тобто 1 тип взаємодії. Величина іонізаційних втрат енергії визначається як властивостями заряджених частинок (швидкість, заряд), так і властивостями речовини (числом електронів в одиниці об'єму й середнім іонізаційним потенціалом середовища). Втративши всю енергію, частинка зупиняється. Відстань, пройдена важкої зарядженою частинкою в середовищі, називають пробігом частинки.

Крім ефекту іонізаційного гальмування важких частинок при взаємодії альфа-частинок з речовиною спостерігається ще й ефект пружного розсіювання (2-й тип взаємодії).

Альфа-проміння повністю поглинаються листом паперу або шаром алюмінію 50 мкм. Протони з енергією 5 Мев мають пробіг в алюмінії, рівний 60 мкм.

Проходження легких заряджених часток через речовину

У силу того, що електрони й позитрони мають малу масу, їх проходження через речовину принципово відрізняється від такого у важких часток. Через малу

масу відносно велика зміна імпульсу електрона, що налітає. Це призводить до значного відхилення частинки від первісного напрямку її руху й породженню при зіткненнях з мішенями квантів електромагнітного випромінювання. Результатом цього є те, що електрон рухається в речовині по кривій і для нього істотні радіаційні втрати. Крім того, можливий процес анігіляції часток при зіткненні позитрона з електроном.

Механізм іонізаційних втрат для електронів у загальному випадку аналогічний такому в інших заряджених часток.

Заряджена частка, що рухається із прискоренням, відчуває гальмування при проходженні в полі ядра важкого елемента, що супроводжується появою квантів електромагнітного випромінювання. Втрати частки енергії на **гальмівне** випромінювання називається **радіаційними втратами**.

Взаємодія електромагнітних випромінювань із речовиною

До **електромагнітних іонізуючих випромінювань** відносяться гамма-випромінювання, рентгенівське, бетатронне, синхротронне.

Гамма-промені це короткохвильове електромагнітне випромінювання, що виникає у процесі розрядки збуджених станів атомних ядер. У цьому випадку стан збудження ядра знімається шляхом випромінювання одного або декількох гамма-квантів, що випускаються каскадно.

Збуджені ядра утворюються: а) при радіоактивному розпаді ядер, якщо α - або β -розпад відбувається на неосновному рівні дочірнього ядра; б) у ядерних реакціях; в) при розподілі ядер; г) після збудження ядра електричним полем частки, що налітає («Кулонівське збудження»).

Гамма-промені прийнято розглядати як потік часток (квантів). Хвильові властивості гамма-променів (дифракція, інтерференція) проявляються лише в самих довгохвильових гамма-променів, у той час як їхні корпускулярні властивості виражені більш чітко (фотоефект, комптоновське розсіювання). Енергія гамма-променів визначається по енергії вторинних електронів, створених ними.

Гамма-промені одне з найбільш проникаючих випромінювань у природі.

Рентгенівські промені це електромагнітне випромінювання виникаюче при гальмуванні електронів на ядрах атомів мішені, при цьому спектр гальмівних рентгенівських променів має безперервний характер.

Характеристичне рентгенівське випромінювання виникає при переходах електронів на внутрішні рівні електронної оболонки атома внаслідок е-захоплення. Тому спектри характеристичних рентгенівських променів дискретні й відповідають енергетичним рівням електронних оболонок дочірнього атома. При розгляді питань взаємодії електромагнітних випромінювань із речовиною ми будемо обмежуватися терміном гамма-кванти.

Проходячи в речовині, гамма-кванти можуть взаємодіяти з атомами, електронами, ядрами, що приводить до зменшення початкової інтенсивності квантів.

Подібно зарядженим часткам пучок гамма-квантів поглинається речовиною в основному за рахунок електромагнітних взаємодій, однак механізм поглинання

інший, оскільки гамма-кванти не мають електричного заряду, отже не піддані впливу віддаленодіючих кулонівських сил. Оскільки взаємодія гамма-променів з електронами відбувається в областях 10^{-11} см, що на три порядки менше міжатомних відстаней, то при проходженні через речовину гамма-кванти порівняно рідко зустрічаються з електронами і ядрами, але при зіткненні різко відхиляються від свого шляху.

Нульова маса спокою гамма-квантів обумовлює сталість їх швидкості, рівної швидкості світла, тобто гамма-кванти в середовищі не вповільнюються, вони або поглинаються, або розсіюються, причому розсіюються на більші кути. Для гамма-квантів не існує понять пробігу й втрат енергії на одиницю довжини.

Процеси, що відбуваються при проходженні гамма-квантів через речовину

Ослаблення потоку гамма-квантів при проходженні через різні речовини відбувається внаслідок їхнього поглинання й розсіювання за рахунок трьох процесів: 1) фотоефекту; 2) комптон-ефекту і 3) ефекту утворення електрон-позитронних пар. Кожний з відзначених ефектів характеризує взаємодію квантів відповідно з атомами, електронами і ядрами.

а) Фотоефект (фотоелектричне поглинання).

Це така взаємодія гамма-квантів з атомом, при якому гамма-квант поглинається (зникає), а з атома виривається електрон. Енергія гамма-кванта витрачається на розрив зв'язку електрона з ядром і на повідомлення електрону кінетичної енергії. Фотоефект спостерігається головним чином на внутрішніх електронних оболонках важких атомів при низьких енергіях гамма-квантів. Імовірність фотоефекта пропорційна четвертому ступеня атомного номера речовини (z^4) і різко падає при збільшенні енергії гамма-квантів.

б) Комптонівське розсіювання.

На слабкозв'язаних електронах атомів відбувається розсіювання гамма-квантів. Взаємодія квантів з електронами в цій системі можна представити як зіткнення двох пружних кульок, у якому гамма-квант передає частину своєї енергії електрону (електрону віддачі), а сам розсіюється. Після розсіювання електрон віддачі (комптонівський електрон) і змінений гамма-квант розлітаються під різними кутами. Довжина хвилі, і відповідно, енергія гамма-кванта стануть іншими. Імовірність комптон-ефекту пропорційна z речовини.

в) Ефект утворення електронно-позитронних пар.

При взаємодії гамма-квантів з полем ядра при досить великій їхній енергії може утворюватися пари часток: електрон і позитрон.

Уся енергія гамма-квантів перетвориться в енергію цих часток. Необхідною умовою утвору пари є енергія кванта, що налітає, не менш 1.02 Мэв, тобто суми енергій спокою електрона й позитрона (по 0.511 Мэв). Імовірність утвору пари росте зі збільшенням енергії гамма-квантів і пропорційна z^2 . Процес утворення пари характерний для важких речовин. У космічних променях практично все ослаблення потоку гамма-квантів обумовлене утвором електронно-позитронних пар.

Взаємодія нейтронів з речовиною

Нейтрон не має заряду, це приводить до того, що нейтрони не взаємодіють із електронними оболонками ядер атомів. Взаємодія їх відбувається тільки з ядрами й характер взаємодії нейтрона з ядром залежить від енергії нейтрона. Нейтрони можна умовно розділити на повільні (E до 1.0 Мев) і швидкі (E більше 1.0 Мев). Швидкі нейтрони розсіюються на ядрах, уповільнюються до теплових енергій і легко захоплюються ядрами, викликаючи ядерні реакції. Але залежно від типу ядра-мішені ядерні реакції можуть протікати й під впливом повільних нейтронів.

Біологічні тканини в силу великого вмісту водню ефективно сповільнюють нейтрони. У результаті послідовного зіткнення з ядрами нейтрони вповільнюються до надтеплових енергій (20 Кев і нижче) і легко захоплюються ядрами. Передаючи енергію ядрам елементів, нейтрон вибиває протон віддачі. Протон віддачі і ядра віддачі, наділені кінетичною енергією поводяться як звичайні заряджені енергетичні частки, викликаючи іонізацію й збудження, тому нейтрони називають, як і гамма-випромінювання, побічно іонізуючим випромінюванням.

5. Закон радіоактивного розпаду

Кількість будь-якого радіоактивного ізотопу згодом зменшується внаслідок радіоактивного розпаду (перетворення ядер). Для кожного радіоактивного ізотопу середня швидкість розпаду його атомів постійна. **Постійна радіоактивного розпаду** – λ для певного ізотопу показує, яка частка ядер розпадається в одиницю часу. Розмірність постійної розпаду виражають у зворотних одиницях часу: с^{-1} , хв^{-1} , год^{-1} і т.д., щоб показати, що кількість радіоактивних ядер зменшується.

Основний закон *радіоактивного розпаду* встановлює, що за одиницю часу розпадається завжди та сама частка ядер, що є в наявності. Математично цей закон виражається рівнянням:

$$N_t = N_0 \times e^{-\lambda t},$$

де N_t – кількість радіоактивних ядер, що залишилися по закінченні часу t ; N_0 – вихідна кількість радіоактивних ядер у момент часу $t = 0$; e – основа натуральних логарифмів ($e = 2,72$); λ – постійна радіоактивного розпаду; t – проміжок часу, рівний $t-t_0$.

Для характеристики швидкості розпаду радіоактивних речовин (РР) у практиці користуються періодом фізичного напіврозпаду.

Період фізичного напіврозпаду ($T_{\text{физ.}}$) – це час, протягом якого розпадається половина вихідної кількості радіоактивних ядер. Між постійною розпаду й періодом напіврозпаду є зворотна залежність, що виражається рівняннями:

$$\lambda = 0,693 / T; \quad T = 0,693 / \lambda.$$

Виходячи з даних рівнянь закон *радіоактивного розпаду* буде мати такий вигляд у математичному вираженні:

$$N_t = N_0 \times e^{-0,693 \times t / T}.$$

Таким чином, число ядер РР зменшується згодом за експонентним законом і графічно виражається експонентною кривою. Із закону радіоактивного розпаду виведене важливе правило: кожне десятикратне зниження активності осколків і

потужності дози гамма-випромінювання відбувається в результаті збільшення їх віку в 7 раз.

Число радіоактивних ядер одного типу постійно зменшується в часі завдяки їх розпаду. **Швидкість розпаду** прийнято характеризувати періодом *напіврозпаду*: цей час, за який число **радіоактивних ядер певного типу зменшиться в 2 рази**.

Абсолютно *помилковим* є наступне трактування поняття «період напіврозпаду»: «якщо радіоактивна речовина має період напіврозпаду **1 годину**, це означає, що через **1 годину** розпадеться його **перша половина**, а ще через **1 годину** - **друга половина**, і ця речовина повністю зникне (розпадеться)».

Для радіонукліда з періодом напіврозпаду **1 годину** це означає, що через **1 годину** його кількість стане менше первинного в **2 рази**, через **2 години** - в **4**, **через 3 години** - в **8 разів** і т.д., але повністю не зникне ніколи.

У такій же пропорції буде **зменшується і радіація**, що випромінюється цією речовиною. Тому можна прогнозувати радіаційну обстановку на майбутнє, якщо знати, які і в якій кількості радіоактивні речовини створюють радіацію в даному місці в даний момент часу.

У кожного радіонукліда - свій період напіврозпаду, він може складати як **долі секунди, так і мільярди років**. Важливо, що період напіврозпаду даного радіонукліда постійний, і змінити його неможливо. Ядра, що утворюються при радіоактивному розпаді, у свою чергу, також можуть бути радіоактивними. Так, наприклад, радіоактивний радон-222 зобов'язаний своїм походженням радіоактивному урану-238.

Іноді зустрічаються твердження, що радіоактивні відходи в сховищах повністю розпадуться за 300 років. Це не так. Просто цей час складе приблизно 10 періодів напіврозпаду цезію-137, одного з найпоширеніших техногенних радіонуклідів, і за 300 років його радіоактивність у відходах знизиться майже в 1000 разів, але, на жаль, не зникне.

Тема 2

Джерела радіаційного забруднення навколишнього середовища

1. Джерела іонізуючих випромінювань.
2. Радіаційна дозиметрія
3. Організація радіаційного контролю
4. Класифікація приладів радіаційного контролю
5. Порядок оцінки радіоактивного забруднення

1. Джерела іонізуючих випромінювань.

Джерелами радіації є природні і штучні радіоактивні речовини, космічний простір, ядерні реактори, рентгенівські трубки, різноманітні прискорювачі заряджених частинок – бетатрони, циклотрони, лінійні прискорювачі, синхротрони, мікротрони. Природне радіоактивне випромінювання створюють понад 60 радіонуклідів, наявних у біосфері Землі. Природній радіаційний фон на 30% представлений космічною радіацією і на 70% - земними джерелами.

Джерела радіації поділяють на закриті і відкриті. **Закриті джерела іонізуючого випромінювання (ДІВ)** – це ті, що виключають надходження радіоактивних речовин до зовнішнього середовища та їх інкорпорацію до організму. До них відносяться гама-опромінювачі, рентгенівські апарати, інші пристрої з використанням бета- і гама-випромінювання. Ці джерела можуть викликати тільки зовнішнє опромінення, тому розробляються заходи захисту з врахуванням цього. Закрите ДІВ – радіоактивна речовина, яка знаходиться у твердій захисній оболонці з неактивного матеріалу чи інкапсульована у тверду неактивну захисну оболонку - досить міцну, щоб запобігти будь-якому розповсюдженню речовини за нормальних умов експлуатації та зносу протягом установленого терміну служби, а також в умовах непередбачених неполадок.

Відкриті джерела іонізуючого випромінювання – це ті, що можуть потрапити до оточуючого середовища і бути інкорпорованими до організму рослин, тварин, людини. Це ізотопи, які використовуються у вигляді газів, аерозолів, рідин, розчинів, порошоків. Це високовольтні джерела постійного струму, поклади радіоактивних порід, теплові електростанції тобто все, що не підпадає від визначення «закриті ДІВ». При цьому можливе не лише зовнішнє, але й додаткове внутрішнє опромінення персоналу.

До джерел надходження радіонуклідів у навколишнє середовище належать виробництва, що використовують зразки проб чи реактиви, котрі містять РР в концентраціях, що дають змогу віднести їх до твердих або рідких радіоактивних відходів (РАВ), а також лабораторії, які проводять радіологічний моніторинг навколишнього середовища. Джерела радіації можна об'єднати в дві великі групи: **природні і штучні** (створені людиною).

Природні джерела іонізуючого випромінювання

Природну радіацію утворюють космічні промені, що падають на Землю з космосу, і радіоактивні речовини, що знаходяться в земних породах, повітрі, воді і

продуктах харчування. Потужність космічних променів, що досягають поверхні Землі, коливається залежно від висоти над рівнем моря і географічної широти. На рівні моря частка космічного випромінювання становить приблизно 15% річної дози всіх природних джерел.

Опромінення від природних джерел переважає багато інших джерел і є істотним фактором еволюції живих організмів у біосфері. У цілому, за даними спеціального наукового комітету ООН, середня еквівалентна доза опромінення населення в промислово розвинених країнах земної кулі за рахунок природних джерел випромінювання становить 2,5-3,0 мЗв/рік. До природних джерел ІВ належать: - космічні випромінювання; - природні натуральні джерела.

Космічне випромінювання. Космічне випромінювання складається з галактичного і сонячного, яке пов'язане з сонячними спалахами. Сонячне космічне випромінювання відіграє важливу роль за межами земної атмосфери, але через порівняно низьку енергію мало впливає на дозу випромінювання біля поверхні Землі.

Космічне випромінювання складається з протонів (90%), альфа-частинок, нейтронів, ядер атомів різних елементів та інших частинок.

Інтенсивність космічного випромінювання залежить від сонячної активності, географічного розташування об'єкта і висоти над рівнем моря (рис. 2.1).

Залежність від широти пояснюється тим, що Земля подібна до гігантського магніту, унаслідок чого заряджені частинки відхиляються від свого шляху і проходять повз планети, інші - змінюють курс над екватором і збираються у вигляді воронки біля полюсів, закручуючись відповідно до напрямку силових ліній прямо над геомагнітним полюсом (цим, до речі, і пояснюється феномен північного саява, що виникає при проходженні інтенсивних космічних променів біля полюсів).

Інтенсивність космічного випромінювання зберігається відносно постійною на географічній широті між $\pm 15^\circ$ по обидва боки від екватора, а далі у міру руху до північної або південної широти $\pm 50^\circ$ швидко зростає, після чого знову залишається практично незмінною аж до полюсів.

На вершині Евересту ($H = 8848$ м), найвищої точки земної поверхні, еквівалентна доза космічного випромінювання становить близько 8 мЗв/год.

Області поблизу екватора, які знаходяться на рівні моря, одержують найменшу дозу космічного випромінювання - близько 0,35 мЗв/год. У географічних областях на широті 50° доза космічного випромінювання становить близько 0,5 мЗв/год. Таку дозу отримують жителі, що проживають поблизу даної широти (Лондон, Нью-Йорк, Токіо, Торонто, Москва, Київ, Харків, Львів, Одеса).

Радіаційний фон, що створюється космічними променями, дає трохи менше половини зовнішнього опромінювання, що одержує населенням від природних джерел радіації.

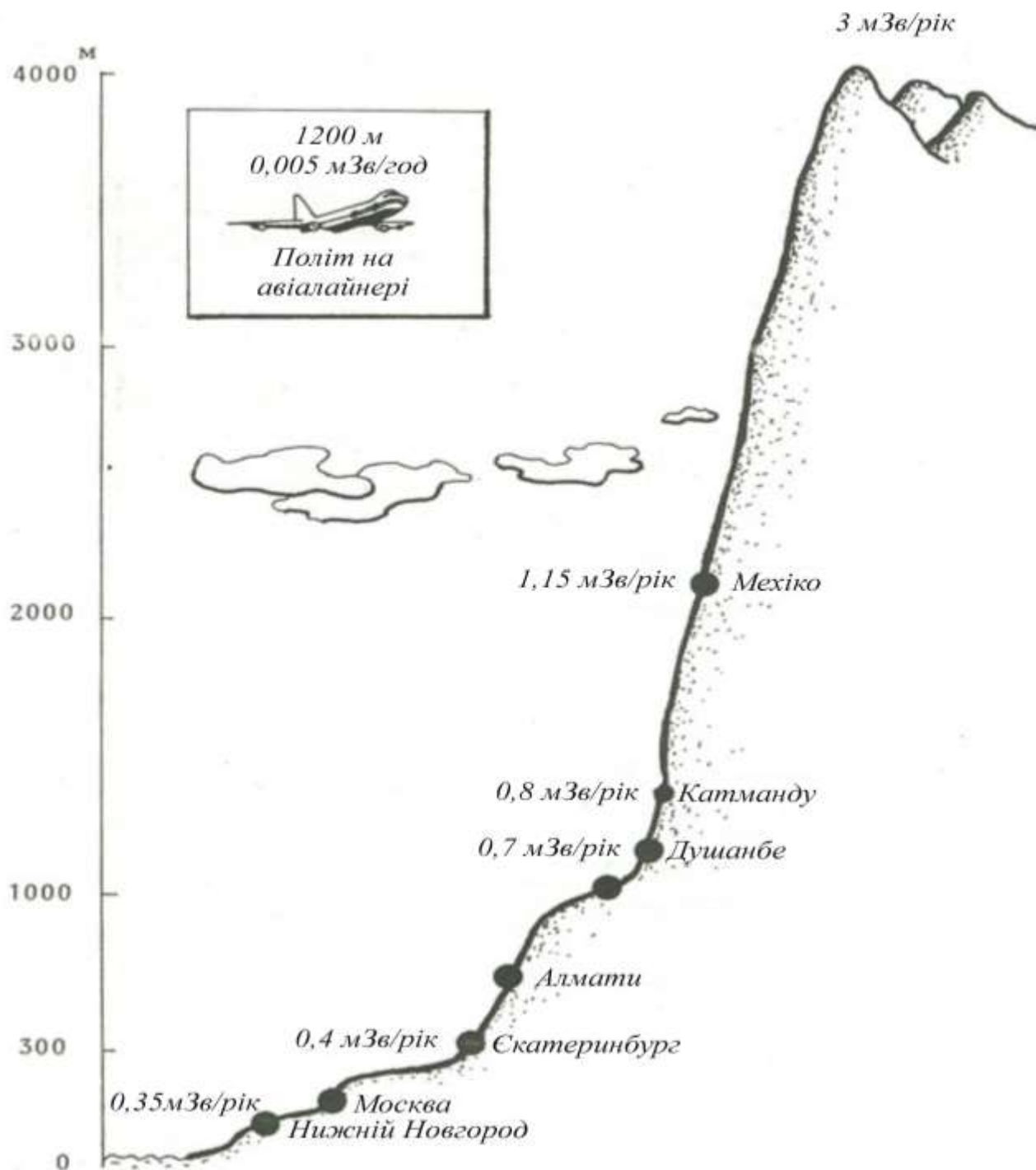


Рисунок 2.1 – Радіаційний вплив космічного випромінювання на людину

Космічне випромінювання поділяють на **галактичне** і **сонячне**. В свою чергу сонячне поділяється на первинне, вторинне і фотонне.

Фотонне випромінювання це є видиме світло. **Первинне** складає 90% всього космічного випромінювання і складається переважно з протонів. Первинне випромінювання складається з частинок легких елементів – водню, гелію, літію, берилію, бору та інших. **Вторинне** космічне випромінювання – це енергія, утворена в результаті взаємодії первинних космічних частинок з атмосферою Землі. Воно складається з електронів, протонів, мезонів, фотонів тощо.

Північний і Південний полюси одержують більше радіації, ніж екваторіальні області, через наявності у Землі магнітного поля, що відхиляє заряджені частинки (з яких в основному і складаються космічні промені). Рівень опромінювання росте з висотою. Чим вище над рівнем моря, тим інтенсивнішою є радіація, оскільки повітря значною мірою захищає Землю від космічної радіації. Наприклад, доза опромінення протягом року на рівні моря становить 0,3 мЗв, на висоті 4000 м над рівнем моря – 1,7 мЗв, а на висоті 12 км вона зростає у 25 разів. Тому опромінення при польотах залежить від висоти і тривалості польоту.

Природні натуральні джерела. У біосфері Землі є більше 60 природних радіонуклідів, які можна розділити на три групи.

Перша група – ряд довгоживучих радіонуклідів, які входять до складу Землі з часу її утворення, - природні радіоактивні ряди - так називається послідовність генетично пов'язаних радіонуклідів, у яких кожний наступний нуклід виникає у результаті альфа- або бета-розпаду попереднього.

Друга група – радіонукліди, що не утворюють радіоактивного ряду і генетично не пов'язані з ним. До цієї групи належать 11 довгоживучих радіонуклідів (^{40}K , ^{87}Rb , ^{40}Ca , ^{120}Te , ^{138}La , ^{147}Sm), що мають періоди піврозпаду від 10^7 до 10^{15} років.

Третя група – космогенні радіонукліди, які безперервно виникають у біосфері в результаті ядерних реакцій під впливом космічних випромінювань. Космогенні радіонукліди утворюються переважно в атмосфері у результаті взаємодії протонів і нейтронів з ядрами азоту, кисню і аргону, а далі потрапляють на земну поверхню з атмосферними опадами. До них належать ^3H , ^{14}C , ^7Be , ^{22}Na , ^{28}Mg , ^{32}P , ^{35}S , ^{39}Ar ,... - усього 14 радіонуклідів. Помітний внесок у дозу опромінення роблять ^3H , ^{14}C , ^7Be , ^{22}Na . При цьому ^3H і ^{14}C – це джерела внутрішнього опромінення, а основними джерелами зовнішнього опромінення є ^7Be , ^{22}Na і ^{24}Na .

Головне джерело надходження природних радіоактивних речовин у навколишнє середовище - гірські породи, що містять уран і торій. Їх період піврозпаду обчислюється мільйонами років. У міру радіоактивного розпаду випромінювання випускають не тільки вони самі, але і їх численні дочірні продукти з більш короткими періодами піврозпаду. Наприклад, при розпаді урану-238 утвориться 13 радіоактивних дочірніх ізотопів. Найбільш небезпечними продуктами розпаду торію-232 є радій-226 і радон-222, що забезпечують разом зі своїми дочірніми продуктами приблизно 75% річної дози опромінення, одержуваної населенням від усіх земних природних джерел радіації.

Найбільшою вагою з усіх джерел природної радіації володіє радон. Він дає приблизно половину дози опромінення людини, одержуваної від усіх природних джерел. Радон накопичується усередині приміщень, просочуючись через фундамент і підлогу із ґрунту або, рідше, вивільняючись з будівельних матеріалів. Близько 70-75% дози опромінення населення України від усіх джерел природної радіоактивності припадає на радон. Винним є Український щит - тектонічна

структура, яка проходить з півночі на південь майже посередині України і займає близько 30% усієї території. Складається щит з гранітів та інших кристалічних порід, що характеризуються підвищеною радіоактивністю.

Природна радіоактивність рослин, фуражу і харчових продуктів обумовлена в основному калієм-40. Живий організм, засвоюючи калій як необхідний для нормальної життєдіяльності організму елемент, накопичує і радіоактивний калій-40.

Невелика частина дози припадає на тритій і вуглець-14, що утворюються в атмосферному повітрі під впливом космічних променів.

Підвищену радіоактивність мають сланці, фосфорити. Тому фосфорні (а також азотні і калієві) мінеральні добрива часто є носіями радіоактивного забруднення ґрунтів і ґрунтових вод. Високу радіоактивність мають кальцієво-силікатний шлак, фосфогіпс, доменний шлак, вугільний шлак.

Аномалії природного фону. Рівні земної радіації також розподіляються нерівномірно по поверхні Землі і залежать від складу і концентрації радіоактивних речовин в земній корі. На планеті є місця, де рівні радіаційного фону підвищені внаслідок значних покладів радіоактивних мінералів. Виявлено п'ять основних населених місць, які мають істотно збільшений природний рівень радіації через певний склад ґрунту і гірських порід. Це Бразилія, Франція, Індія, о. Німує (Тихий океан) і Єгипет.

Так звані аномальні радіаційні поля природного походження утворюються у разі збагачення деяких типів гірських порід ураном, торієм, на родовищах радіоактивних елементів в різних породах, при проникненні урану, радію, радону в поверхневі і підземні води, геологічне середовище.

В Україні дещо вищий природний радіаційний фон у регіонах під якими залягає Український кристалічний щит (Житомирська, Хмельницька, Вінницька, Черкаська, Кіровоградська), а також гірські райони Криму і Карпат.

Аномальні райони в Україні – Хмельник, Миронівка, Жовті Води де знаходяться радонові джерела та грязі, а також Дніпропетровська, Кіровоградська і Миколаївська області, де знаходяться рудники з видобування урану. У цих місцях рівні природного фону в десятки і сотні разів більші, ніж на іншій території.

Штучні джерела іонізуючого випромінювання

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

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

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

До основних штучних джерел радіоактивних забруднювачів відносять:

- застосування радіонуклідів у народному господарстві (у різних галузях

промисловості і сільському господарстві) і побуті;

- уранова і радіохімічна промисловість, підприємства ядерної енергетики;
- ядерні вибухи при випробуваннях ядерної зброї;
- застосування РН у медицині.

Використання ІВ і РР у медицині для діагностики і радіотерапії – це основне джерело штучного опромінення людей, що перевищує вплив усіх інших штучних джерел. Ці дози створюються при рентгенівській діагностиці людей, діагностиці стану окремих органів (легенів, печінки, нирок, щитовидної залози та ін.) за допомогою радіоактивних препаратів, які вводяться всередину організму, а також радіаційної терапії з використанням радіоактивних джерел (^{60}Co , ^{137}Cs).

За даними наукового комітету ООН, ефективна еквівалентна доза від радіонукліда, що найбільш часто використовується ядерною медициною з метою діагностики, технецію-99 знаходиться у межах від 1 до 10 мЗв.

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

Персонал і хворі курортів, де лікують радоновими ваннами, одержують дозу опромінення порядку 300 мЗв/рік, що в 6 разів перевищує встановлені міжнародні норми.

У розвинених країнах на 1000 жителів потрібно від 300 до 900 обстежень на рік, не рахуючи рентгенологічних обстежень зубів і масової флюорографії. У середньому населення України внаслідок зазначених процедур одержує ефективну дозу опромінення всього тіла близько 1,8 мЗв/рік.

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

Індивідуальні річні дози опромінення можуть змінюватися в досить широких межах.

Про те, наскільки глибоко в побут людини увійшла радіація, свідчать такі фактори:

- для одержання стійкої фарби на банкнотах застосовується вуглець-14;
- для одержання гарної жовтої емалі на кераміці або коштовних прикрасах застосовують уран;
- для додання блиску штучним фарфоровим зубам широко використовують уран і цезій. Вони можуть бути джерелами опромінення тканин порожнини рота, тому рекомендують припинити їх застосування;
- уран і торій використовуються при виробництві оптичного скла, керамічного і скляного посуду;

- при виробництві люмінофорів використовуються радіоактивні матеріали;
- солі радію використовують при виготовленні фарб, які мають властивість світитися, такі фарби наносять на циферблати і стрілки годинників, застосовують у прицільних пристроях, у театрі, рекламі тощо. Такі годинники дають річну індивідуальну дозу, яка перевищує в 4 рази ту, що виникає внаслідок викидів на АЕС; При виготовленні такого годинника використовується радій.
- кольоровий телевізор. Наприклад, якщо дивитися передачі протягом року щоденно по 3 години, людина отримує дозу 0,05 мЗв;
- рентгенівські апарати, що використовуються в аеропортах для перевірки багажу пасажирів;
- пожежні димові детектори містять радій або плутоній (у США до кінця 1980 р. було встановлено більше 26 млн таких детекторів).

У промисловості за допомогою радіонуклідів здійснюється контроль якості виробів (дефектоскопія), контроль технологічних процесів. 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 обладнання, 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.

ІВ знайшло широке застосування і в сільському господарстві:

- для одержання мутацій і використання їх у селекційній роботі для виведення нових сортів у рослинництві. Цей метод дозволяє значно скоротити час виведення конкретних сортів;
- для підвищення продуктивності сільськогосподарських рослин шляхом передпосівного опромінення насіння. Картопля, вирощена з опромінених коренеплодів, містить більше крохмалю, білків і вітаміну С, ніж контрольні коренеплоди;
- для подовження термінів зберігання продукції рослинництва без істотної зміни її якості. Велике значення має гамма-опромінення ягід і фруктів, що швидко псуються. Це знижує їх зараженість мікроорганізмами, плісневими спорами і т.п.;
- використання методу радіоактивних індикаторів, який дозволяє вивчити ефективність різних термінів і методів внесення у ґрунт добрив;
- використання радіації для боротьби з комахами-шкідниками зерна, борошна, крупи. Якщо зерно перед завантаженням в елеватор пропустити через бункер з потужним джерелом гамма-випромінювання (^{60}Co), то розмноження комірною кліща виключається і зерно може зберігатися тривалий час без будь-яких втрат;
- застосування радіаційних технологій у тваринництві і ветеринарії. Великі

доза ІВ згубно діють на мікрофлору, що використовується при консервації тваринницької продукції (досягається практично повна стерилізація продукції).

Останнім часом з'явилася серйозна небезпека радіоактивного забруднення навколишнього середовища у зв'язку з використанням радіоактивних джерел у космічних дослідженнях. На космічних кораблях використовуються бортові атомні електростанції, у системі ПРО використовується рентгенівський лазер з ядерним накачуванням, різного роду прискорювачі елементарних частинок. У червні 1969 р. в результаті аварії американського супутника відбулося зараження атмосфери над Індійським океаном плутонієм-238, при цьому втричі збільшився вміст плутонію у навколишньому середовищі.

Внаслідок згорання вугілля в ТЕС або в житлових будинках відбувається і радіоактивне забруднення навколишнього середовища. У вугіллі містяться природні радіонукліди: калій-40, уран-238, торій-232 і їх продукти розпаду. Викид цих радіонуклідів 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.

Випробування ядерної зброї та аварії на ядерних реакторах становлять окрему небезпеку.

При ядерному вибуху утворюється понад 200 різних радіоізотопів, які є як безпосередніми уламками поділу ядер важких елементів (урану-235, плутонію-238, плутонію-239), так і продуктів їх розпаду. Частина з них розпадається в найближчі хвилини і години після вибуху, інші протягом декількох днів, а такі, як стронцій-90, цезій-137, сурма-126 і ін., мають період піврозпаду від 1 року до декількох десятків років. Як джерела внутрішнього опромінення найбільш небезпечні радіонукліди йоду, цезію, стронцію, плутонію, торію.

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

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

З точки зору безпеки забруднення біосфери продуктами ядерних вибухів, найбільш важливе значення мають наземні вибухи. У цьому випадку вогняна куля, що утворюється при ядерних вибухах, торкається поверхні Землі, і величезні маси ґрунту випаровуються і втягуються у вогняну кулю. Досить зазначити, що при наземному ядерному вибуху потужністю 20 кт на місцевості із супіщаним ґрунтом утворюється вирва діаметром 81 м і глибиною 19 м. Залежно від потужності ядерного вибуху і характеру ґрунту загальний викид ґрунту при наземному вибуху

потужністю 1 кт становить приблизно 5000 т, а при потужності 20 кт - 20000 т.

У результаті випробування ядерної зброї до 1963 р. у стратосфері (8-55 км) піднято більше 200 млн т радіоактивного пилу, який випадав по всій земній кулі протягом кількох років.

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

2. Радіаційна дозиметрія

Радіометрія (від грец. radio – промінь + metro – вимірювати) – виявлення і вимірювання кількості розпадів атомних ядер в радіоактивних джерелах або деякої їх частки за випромінюванням, що виділяється ядрами.

Дозиметрія (від грец. dosis – доза, порція + metro – вимірювати) – вимірювання розсіювання та поглинання енергії іонізуючого випромінювання в певному матеріалі.

Доза випромінювання залежить від енергії та виду падаючого випромінювання, а також від природи поглинаючого матеріалу. На практиці для характеристики швидкості розпаду радіоактивних елементів користуються не сталою розпаду, а періодом піврозпаду.

$T_{1/2}$ – це час, протягом якого розпадається половина всіх атомів даного радіонукліду. Період $T_{1/2}$ для кожного радіонукліду стала величина і коливається від частинок секунди до кількох мільярдів років.

При роботі з радіоактивними речовинами важливим параметром часто є не їх кількість, а загальна кількість випромінюваних частинок або пропорційна величина - кількість тих атомів, що розпадаються. Для кількісної оцінки джерел випромінювання радіонуклідів використовується поняття «активність», яке означає кількість радіоактивних розпадів ядер атомів за одиницю часу: чим більше радіоактивних перетворень зазнають атоми даного радіонукліду за одиницю часу, тим більша його **активність**.

Активність випромінювача (**A**) визначається числом атомних ядер, що розпадаються за одиницю часу. Одиниці **A**: вимірюються у **Беккерелях (Бк)** (СИ). $1\text{Бк}=1\text{розпад} / \text{секунду}$ (розп/с) (СИ)

Тому за **одиницю активності** прийнято одне **ядерне перетворення в секунду**. Позасистемною одиницею активності є **Кюрі (Ки)**, $1\text{Ки} = 3,7^{10}\text{Бк}$.

Експозиційна доза (X) це міра іонізаційної дії випромінювання на повітря. Одиниці **X**: вимірюються у **кулонах / кілограм (Кл/кг)** (СИ) Позасистемною одиницею є **Рентген (Р)**, $1\text{Р} = 2,58 \cdot 10^{-4}\text{Кл/кг}^{-1}$.

Це така доза випромінювання, при якій в 1 см^3 сухого повітря за нормальних умов утворюється приблизно **2,58 млрд. пар іонів**, що несуть одну електростатичну одиницю заряду кожного знаку.

Поглинена доза (D) визначається середньою кількістю радіоактивної енергії, що поглинена одиницею маси опромінюваної речовини або людиною. Поглинена доза

випромінювання є основною фізичною величиною, що визначає ступінь радіаційної дії. Із збільшенням часу вона і за однакових умов залежить від складу речовини. Поглинена доза порушує фізіологічні процеси і призводить до променевої хвороби різного ступеня тяжкості. Одиниці **D**: вимірюється у **Греях (Гр) (СІ)**. $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг (СІ)}$. Позасистемною одиницею є **Радій (рад)**, $1 \text{ радій} = 0,01 \text{ Гр}$.

Потужність поглиненої дози – приріст дози за одиницю часу. Вона характеризується **швидкістю накопичення дози** і може збільшуватися або зменшуватися в часі. Її одиниця в системі *СІ* – **грей/секунду**. Тобто за одну секунду в речовині створюється доза випромінювання, що становить **1 грей**.

На практиці для **оцінки поглиненої дози** випромінювання широко використовується *позасистемна одиниця* потужності поглиненої дози - **радій на годину (рад/год)** або радий на секунду (**рад/с**).

Еквівалентна доза (H) – це поняття ведене для кількісного обліку несприятливої біологічної дії різних видів випромінювання. Визначається добутком поглиненої дози певного виду випромінювання на коефіцієнт якості іонізуючого випромінювання.

Коефіцієнт якості іонізуючого випромінювання (Q_i) – це коефіцієнт який показує у скільки разів біологічний ефект даного випромінювання відрізняється від такої ж дії гама-випромінювання. $H = Q_i D$

Коефіцієнт якості іонізуючого випромінювання для різних видів становить. **1** - для рентгенівського, гамма - і бета – випромінювання. **5** - для повільних нейтронів. **10** - для протонів і швидких нейтронів. **20** - для альфа випромінювання. Одиниця **H**: визначається у **Зівертах (Зв) (СІ)**. У практиці використовують позасистемну одиницю **Бер (бер)**, $1 \text{ бер} = 0,01 \text{ Зв}$.

Зіверт рівний одному **грею**, поділеному на коефіцієнт якості. При $Q=1$ $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр}/Q = 1 \text{ Дж/кг}/Q$.

Бер (біологічний еквівалент рентгена) - це така поглинена доза будь-якого випромінювання, яка викликає такий біологічний ефект, що і один рентген гамма-випромінювання.

Оскільки коефіцієнт якості найбільш проникного бета- гамма-випромінювань рівний 1, то на місцевості, забрудненій радіоактивними речовинами при зовнішньому опромінюванні:

1 Зв = 1 Гр; 1 бер = 1 радій; 1 радій = 1 Р. У зв'язку з тим, що 1 Р доза досить значна то на практиці у дозиметрії користуються мікрорентгенами на годину мкР/год.

3. Організація радіаційного контролю

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

Радіаційний контроль здійснюють на всіх підприємствах, які

використовують джерела іонізуючого випромінювання.

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

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

Методи виявлення і реєстрації ІВ

Виявлення і вимірювання інтенсивності іонізуючих випромінюваних радіоактивних речовин і джерел випромінювання ґрунтуються на їх здатності іонізувати речовину середовища, в якій це випромінювання поширюється. Іонізація, у свою чергу, є причиною фізичних і хімічних змін у речовині, які можуть бути виявлені і виміряні. До таких змін середовища відносять зміну електропровідності речовин (газів, рідин, твердих матеріалів), люмінесценцію речовин, засвічування фотоплівок, зміну забарвлення, прозорості, опірності електричному струму хімічних розчинів та ін.

Залежно від того, які з цих змін реєструються, використовують такі основні методи:

- іонізаційний (за величиною струму іонізації);
- хімічний (за ступенем зміни кольору індикатора);
- фотографічний (за ступенем почорніння фотошару);
- сцинтиляційний (за ступенем світіння люмінофора).

Іонізаційний метод. Суть методу полягає в тому, що під впливом ІВ в ізольованому об'ємі відбувається іонізація газу, у результаті чого збільшується його електропровідність (утворюються позитивні і негативні іони). Якщо в цей об'єм помістити два електроди, на які подати сталу напругу, то між ними утвориться електричне поле, під дією якого в іонізованому газі виникне спрямований рух заряджених частинок, тобто через газ проходитиме іонізований електричний струм, величина якого визначається потужністю джерела випромінювання.

Хімічний метод ґрунтується на вимірюванні виходу радіаційно-хімічних реакцій, які відбуваються під впливом іонізуючого випромінювання. Кількісно результат впливу випромінювання оцінюється за радіаційно-хімічним виходом. Під виходом реакції розуміють кількість характерних перетворень (знову утворених атомів, іонів і т.д.) на 100 еВ поглиненої енергії.

Основним елементом приладу, який використовує даний метод, є хімічний детектор. Хімічні детектори використовують водні розчини (такі детектори прості, але мають низьку чутливість), сполуки на основі хлорзаміщених вуглеводів (більш висока чутливість забезпечується виникненням у речовині детектора ланцюгових реакцій).

Перевага методу полягає в можливості вибору для хімічних детекторів таких речовин, які за реакцією на випромінювання мало відрізняються від тканин людського організму.

Фотографічний метод спирається на властивість ІВ впливати на чутливий шар фотоматеріалів аналогічно видимому світлу. Для цього використовують спеціальні фотоплівки, які являють собою целулоїдну підкладку з нанесеною на неї з одного чи обох боків світлочутливою емульсією. До складу світлочутливої емульсії входить бромисте або хлористе срібло (AgBr , AgCl), рівномірно розподілене в шарі желатину. Якщо фотоплівку, поміщену у світлонепроникну камеру, піддати впливу гамма-променів, а далі проявити, відбувається її почорніння. Густина почорніння пропорційна інтенсивності опромінення. Дозу опромінення, одержану плівкою, визначають, порівнюючи густину почорніння з еталоном.

Перевагою фотографічних детекторів є можливість їх масового застосування для індивідуального контролю доз опромінення з документальною реєстрацією одержаної дози.

Сцинтиляційний метод базується на тому, що під впливом ІВ деякі речовини випускають фотони видимого світла. Спалахи світла, що виникають при цьому, можуть бути зареєстровані. Сцинтиляційний лічильник складається із сцинтилятора - речовини, здатної випускати видиме випромінювання під дією ІВ, і фотоелектричного множника (ФЕМ), у якому енергія світлових спалахів (сцинтиляцій) через посередництво фотоэффекту перетворюється в імпульси електричного струму, які, у свою чергу, надходять у реєструвальний пристрій.

Перевага сцинтиляційних лічильників, які зараз широко використовуються, полягає в можливості реєстрації ІВ практично всіх видів, високій розрізняльній здатності, високій ефективності реєстрації випромінювання. Недолік - лічильники непридатні для вимірювання великих доз.

4. Класифікація приладів радіаційного контролю

За функціональним призначенням прилади радіаційного контролю поділяються на два класи:

- дозиметри - прилади для вимірювання дози або потужності дози рентгенівського і гамма-випромінювання;

- радіометри - прилади для визначення активності радіонуклідів або її питомої (масової, поверхневої або об'ємної) величини. Застосовуються для визначення ступеня забруднення радіонуклідами різних об'єктів.

За конструктивними особливостями дозиметричні і радіометричні прилади поділяються на: кишенькові, переносні та стаціонарні установки.

Ці прилади характеризуються певними технічними параметрами: чутливістю, часом розрізнення, відтворенням результатів вимірювань, температурою і механічною стійкістю.

Чутливість приладу – величина нижньої межі випромінювання, яка стійко реєструється приладом.

Час розрізнення – найменший час, за який два імпульси, що йдуть один за одним, реєструються окремо.

Температурна стійкість – здатність приладу давати стійкі показання при

різних температурах.

Механічна стійкість приладу характеризує його здатність протистояти різним механічним впливам без зміни точності показань.

Індивідуальний дозиметричний контроль здійснюється за допомогою кишенькових приладів, у яких у ролі детектора використовуються іонізаційні камери.

Для вимірювання потужності дози широко застосовуються газорозрядні лічильники.

Найбільш поширеним видом ІВ є зовнішнє фотонне (рентгенівське і гамма-) випромінювання. Необхідність у контролі бета-частинок і нейтронного випромінювання виникає значно рідше.

У кожному конкретному випадку вимірювання необхідно проводити за методикою, наведеною в інструкції для експлуатації, яка додається до кожного приладу.

При роботі необхідно уникати контакту між вимірювальними приладами та досліджуваними речовинами і предметами, тим більше не торкатися їх руками, тому що це може привести до забруднення приладів і додаткового збільшення показань. Для запобігання забрудненню прилад можна вміщувати у тонкий поліетиленовий чохол, пакет тощо.

Разом з тим необхідно враховувати, що дозиметричні прилади для населення нечутливі до м'якого рентгенівського і гамма-випромінювання (кольорового телевізора, дисплеїв, рентгенівських установок з прискорювальною напругою на трубіці менше 60-80 кВ та ін.), альфа-частинок і нейтронів. Тому за допомогою зазначених приладів неможливо оцінити радіаційне випромінювання від усіх видів природних і техногенних джерел.

Прилади не підлягають застосуванню при медичних рентгенологічних і радіологічних процедурах і дослідженнях.

Для того щоб можна було одночасно з вимірюванням потужності дози гамма-випромінювання і оцінкою забруднення щодо гамма-випромінювання проводити оцінку ступеня забруднення поверхонь щодо бета-випромінювання, використовуються комбіновані дозиметричні прилади - побутові дозиметри-радіометри.

Детектори таких приладів містять торцеві бета- і гамма-лічильники з тонким вхідним вікном великої площі і знімну кришку-фільтр. Інтерпретація результатів оцінки забруднення щодо бета-випромінювання за допомогою таких приладів повинна проводитися фахівцями-професіоналами, що працюють в організаціях, які мають право на видачу офіційних висновків.

Наведемо приклади найпоширеніших приладів радіаційного контролю.

Портативні дозиметричні прилади для населення призначені для оцінки радіаційної ситуації та є засобами вимірювання індикаторного типу. Умовно їх можна розділити на декілька груп: сигналізатори-індикатори, вимірювачі-індикатори, комбіновані дозиметричні прилади (дозиметри-радіометри та

дозиметричні прилади вмонтовані в побутову техніку – годинники, приймачі тощо).

Основною особливістю дозиметрів, що випускаються (чи випускались) нашою промисловістю для населення, є простота у використанні та мінімум вимог до знань та технічної підготовки у користувача. Прилади мають досить великий рівень надійності та відносно низьку вартість.

Сигналізатори-індикатори дають можливість знаходити радіоактивне забруднення за допомогою світлової та звукової індикації, оцінювати рівень потужності дози гамма-випромінювання. Завдячуючи характерним звуковим сигналам, які індукують прилади при реєстрації імпульсів з детекторів, такі сигналізатори отримали назви: "цвіркун", "щебетун", "пискун", "соловей" та ін..

Вимірювачі-індикатори визначають радіоактивне забруднення та одночасно вимірюють та досить точно оцінюють потужність дози гамма-випромінювання. Для відображення інформації в сигнальних вимірювачах-індикаторах застосовують прилади, що обладнані аналоговими або цифровими індикаторами (дисплеями).

В дозиметричних приладах та в документації, яка прикладена до них, для зручності сприйняття рівнів сигналізації та показів паралельно наводять значення в мкЗв/год та мкР/год. У ряді приладів діапазон вимірів в мкЗв/год підібрано так, щоб користувач міг за допомогою додаткового перемикача, кнопки чи просто, не звертаючи увагу на кому на дисплеї, виконати оцінку результатів вимірювань в більш зручних та звичних одиницях мкР/год.

Вимірювачі-індикатори, які обладнані стрілочками або аналоговою шкалою, найбільш наочно відображають інформацію замірів. Окрім того, користувач, що користується приладом з аналоговою шкалою, візуально краще сприймає тенденцію зміни радіаційної обстановки.

У приладах, які обладнані стрілкою, сектор шкали, що відповідає потужності дози від 0,6 мкЗв/год (60 мкР/год) зазвичай фарбують в зелений колір, а в діапазоні від 0,6 мкЗв/год (60 мкР/год) до 1,2 мкЗв/год (120 мкР/год) - у жовтий, а сектор, який відповідає значенням, вищим 1,2 мкЗв/год (120 мкР/год), в червоний або рожевий колір. Таким чином використовують кольорове відображення інформації в аналогових дисплеях зі світло-діодними індикаторами.

Для запобігання ручному перемиканню піддіапазонів у деяких приладах застосовують логарифмічні шкали або забезпечено автоматичне перемикання піддіапазонів.

У наш час розроблено декілька десятків дозиметричних приладів для населення, з яких було відібрано найбільш вдалі моделі, що випускаються серійно на підприємствах країни.

Конструктивно дозиметричні прилади виконані у вигляді прямокутних коробочок або іншої форми, яка зручна для застосування приладу, або його перенесення в кишені та в руці. Габаритні розміри приладів та їх вагу здебільшого визначають детектор, дисплей, первинний та вторинний джерела живлення. Корпуси приладів, як правило, пофарбовані в яскраві кольори або світлі відтінки на

випадок, коли їх потрібно швидко знайти у разі втрати. Для робіт в умовах, коли є можливим радіоактивне забруднення поверхні приладів, у комплекті з дозиметром продають тонкі прозорі чохла, через які видно результати вимірів на табло, а також є можливим сприймати світлову або звукову сигналізацію. Температурний діапазон приладів (в основному від -10 до +40°C) визначається джерелами живлення, що застосовуються, а також засобами відображення інформації (індикаторами).

Варто відмітити, що кожен прилад має декілька подібних за характеристиками модифікацій, які були розроблені різними колективами конструкторів (спеціалістів). Це такі прилади як "Рось", "Фотон" "Польнь-101", ДБГПБ -02 - "Дон-1"; "Берег" та інші.

Перелічені дозиметричні прилади, що виготовляються вітчизняною промисловістю для населення, забезпечують вимірювання або оцінку потужності дози зовнішнього гамма-випромінювання та практично не чутливі до бета-випромінювання (якщо в приладах не реалізовані спеціальні пристрої для забезпечення реєстрації бета-частинок). Вони також не чутливі до м'якого рентгенівського та гамма-випромінювання (кольорові телевізори, кольорові дисплеї ЕОМ, рентгенівські установки з напругою прискорення на трубі менше 60-80 кВ та ін.), альфа-частинок та нейтронів. Тому за допомогою названих пристроїв неможливо оцінити радіаційну ситуацію від усіх видів природних та техногенних джерел опромінення.

Побутові дозиметри-радіометри

Промисловістю було освоєно випуск приладів, які дають можливість виконувати оцінку забруднення поверхонь за бета-випромінюванням з одночасним вимірювання потужності дози гамма-випромінювання та оцінкою забруднення за гамма-випромінюванням.

Це такі побутові дозиметри-радіометри, як "Поиск-2", "Сосна", "Припять", ИР-03 та ін. Детектори таких приладів містять торцевий бета- та гамма-лічильник з тонким вхідним вікном великою площею, що забезпечує реєстрацію бета-частинок, починаючи з малих енергій. Детектори таких приладів обладнані кришкою-фільтром, яка знімається.

Інтерпретація результатів оцінки забруднення за бета-випромінюванням за допомогою таких приладів повинна виконуватися спеціалістами-професіоналами, які працюють в установах, які мають право на видачу офіційних висновків.

Радіометр "Припять" призначений для індивідуального та колективного застосування при вимірюванні потужності еквівалентної дози фотонного іонізуючого випромінювання, щільності потоку бета-випромінювань, питомої активності в рідких та сипучих речовинах.

Радіометр дає можливість вимірювати: величину зовнішнього гамма-фону; рівні забруднення радіоактивними речовинами житлових та громадських приміщень, територій, різних поверхонь; сумарний вміст радіоактивних речовин (без визначення ізотопного складу) в продуктах харчування та інших об'єктах

зовнішнього середовища (рідких та сипучих).

5. Порядок оцінки радіоактивного забруднення

Оцінку радіоактивного забруднення (питома чи об'ємна активність) продуктів харчування, кормів, води за гамма-випромінювання виконують методом “прямого вимірювання” на відстані 1-5 см від досліджуваного об'єкта вагою не менше 1 кг або об'ємом не менше 1 літра. Визначення рівня забрудненості визначають за відмінністю результатів вимірювань випромінювання від об'єкта та радіаційного фону довкілля. При цьому рівень зовнішнього гамма-фону, як правило, не повинен перевищувати 0,1-0,2 мкЗв/год (10-20 мкР/год).

За умов гамма-фону більше 0,2 мкЗв/год (20 мкР/год) для оцінки забруднення продуктів харчування та кормів потрібно знайти місце з меншим фоном. Якщо це неможливо, то оцінку забруднення потрібно виконувати з більшою кількістю вимірювань та з більшою кількістю продуктів харчування та кормів. Але такі вимірювання вимагають спеціальних знань та навичок.

Необхідно знати, що окремі продукти харчування (наприклад, чай, сушені гриби та ін.) та речовини (наприклад, калійні добрива та ін.) можуть мати підвищену радіоактивність. У деяких із них вона може обумовлюватися підвищеним вмістом калію.

Оцінку рівня *потужності дози* довкілля, як правило, виконують на висоті 1 м над поверхнею землі і на відстані не менше 30 м від будівель. Орієнтовну перевірку (експрес-аналіз) на радіоактивне забруднення, пошук локальних місць, а також швидку оцінку рівнів потужності експозиційної дози виконують за умов коротких проміжків часу або при найменшому часі набору інформації (режим роботи дозиметра «Пошук»). Більш детальний контроль рівнів потужності дози або перевірки забруднення радіоактивними речовинами продуктів харчування та предметів виконують в умовах вимірювання в більш тривалих проміжках часу (більше часу набору інформації – в режимі роботи дозиметра «Вимірювання»), що забезпечує меншу помилку вимірювань.

Потужність дози для точкового гамма-джерела прямо пропорційно залежить від активності джерела радіоактивності і обернено пропорційно квадрату відстані до нього. Тому, виконуючи пошук локальних місць забруднення та втрачених, загублених радіоактивних джерел, а також для забезпечення безпеки, потрібно враховувати, що зі збільшення відстані від джерела в 10 разів потужність дози зменшується приблизно в 100 разів.

Якщо потужність дози перевищує 1,2 мкЗв/год (120 мкР/год), рекомендується покинути дане місце та перебувати в ньому не більше шести місяців на рік. Якщо потужність дози перевищує 2,5 мкЗв/год (250 мкР/год), перебування варто обмежити трьома місяцями (кварталом) на рік, а при перевищенні 7 мкЗв/год (700 мкР/год) - одним місяцем на рік.

За умови перевищення рівня реагування 3,7 кБк/кг (10^{-7} Ки/кг), що відповідає радіоактивному забрудненню продуктів харчування, рекомендується відмовитися від їх вживання або обмежити вживання вдвічі порівняно зі звичайним раціоном

харчування. Якщо випромінювання від продуктів харчування підвищить потужність дози до 0,3 мкЗв/год (30 мкР/год) понад рівень фону, то вживання цих продуктів повинно становити 0,25 (чверть) звичайного раціону. При 1 мкЗв/год (100 мкР/год) - не більше десятої частини раціону.

У разі перевищення рівнів реагування за зовнішнім гамма-випромінюванням або радіоактивним забрудненням продуктів харчування рекомендується сповістити про це працівників санітарно-епідеміологічної служби та отримати від них кваліфіковані свідчення про реальний рівень випромінювання або забруднення, ступені його безпеки та рекомендації про поведінку в даних умовах.

У роботі з дозиметром намагайтеся не торкатися речовин та предметів, що досліджуєте, оскільки це може привести до забруднення приладу та до додаткового збільшення результатів вимірів цим дозиметром. Для запобігання забрудненню приладу його необхідно помістити в тонкий поліетиленовий захисний чохол, пакет і т.д.

Поводитися з дозиметричними приладами потрібно акуратно. Необхідно відслідковувати стан джерел живлення, регулярно перевіряти працездатність приладу. В такому разі дозиметричний прилад дасть можливість правильно орієнтуватися в довкіллі та своєчасно попередити про вплив іонізуючого випромінювання.

Тема 3

Вплив радіації на живі організми

1. Біологічна дія іонізуючого випромінювання
2. Шляхи надходження іонізуючого випромінювання.
3. Дія іонізуючих випромінювань на мікроорганізми
4. Дія іонізуючих випромінювань на рослини
5. Дія іонізуючих випромінювань тварини
6. Токсичність радіонуклідів

1. Біологічна дія іонізуючого випромінювання

Біологічна дія іонізуючих випромінювань – зміни, що викликаються в життєдіяльності й структурі живих організмів внаслідок впливу короткохвильових електромагнітних хвиль (рентгенівського випромінювання й гамма-випромінювання) або потоків заряджених часток (альфа-частинок, бета-випромінювання, протонів) і нейтронів.

Дослідження впливу іонізуючих випромінювань на біологічні об'єкти були початі відразу після відкриття рентгенівського випромінювання (1895) і радіоактивності (1896). В 1896 фізіолог І.Р. Тарханов показав, що рентгенівське випромінювання, проходячи через живі організми, порушує їхню життєдіяльність. Особливо інтенсивно стали розвиватися дослідження біологічної дії іонізуючих випромінювань із початком застосування атомної зброї (1945), а потім і мирного використання атомної енергії.

Радіація за своєю природою шкідлива для життя. Малі дози опромінення можуть «запустити» не до кінця ще встановлений ланцюг подій, що призводить до раку або до генетичних ушкоджень. Випромінювання радіоактивних речовин виявляє дуже сильний вплив на всі живі організми. Навіть порівняно слабке випромінювання, яке при повному поглинанні підвищує температуру тіла лише на 0,001°C, порушує життєдіяльність клітин.

При великих дозах радіація може руйнувати клітини, пошкоджувати тканини органів і бути причиною загибелі організму. Ушкодження, викликані великими дозами опромінення, звичайно проявляються протягом декількох годин або днів. Ракові захворювання, однак, проявляються через багато років після опромінення, як правило, не раніше ніж через 1-2 десятиліття. А вроджені пороки розвитку й інші спадкові хвороби, викликані ушкодженнями генетичного апарату, за визначенням проявляються лише в наступних поколіннях: це діти, онуки й більш віддалені нащадки індивідуума, що підпав під дію опромінення.

Іонізуючі випромінювання, впливаючи на організм людини й тварин, іонізують атоми й молекули, з яких складається жива тканина, викликаючи радіаційні ураження життєво важливих органів. У першу чергу іонізується вода, що входить до складу тканин і органів людини, іони вступають у взаємодію з киснем тканин, утворюючи пероксидні сполуки, які самі є сильними окиснювачами й

приводять до змін і загибелі живих клітин.

Отже, в основі первинних, пускових механізмів уражаючої дії іонізуючих випромінювань лежать процеси іонізації й порушення атомів і молекул, їх руйнування, що дає початок утворенню хімічно активних уламків, що вступають згодом у реакції з різними структурами клітин організму. Надалі це призводить до порушення обміну речовин і зміни функцій органів і тканин.

Експериментально було переконливо доведено, що як і різноманітні тканини в організмі, клітини навіть у межах однієї тканини мають різноманітну чутливість. Ці ж фізіологічні закономірності, характерні для окремих клітин, правомірні і для окремих субклітинних структур.

Найбільш радіочутливим є ядро клітини. Це визначили експериментами по штучному обміні ядрами опромінених і неопромінених клітин одного клону. Виявилося, що найбільша летальність спостерігалася в тих клітинах, що мали опромінене ядро і неопромінену цитоплазму. Дані цих робіт свідчать, що головну відповідальність за летальний вихід при впливі іонізуючого випромінювання несе ядро. Вдалося виявити такі зміни в клітинах, що реєструються на 3-4 добу:

1. **вакуолізація** цитоплазми (поява нехарактерних вакуолів);
2. **підвищення проникності екзо- і ендомембран**, і порушення співвідношення іонів K і Na;
3. **збільшення в'язкості цитоплазми**;
4. **денатурація деяких білків цитоплазми**, що теж підвищує в'язкість цитоплазми;
5. порушення екзомембран призводять до втрати клітинами, що рухаються, **спроможності пересуватися**. Ці клітини приймають строго округлу форму;
6. **порушення ендомембран у мітохондріях** призводить до різкого зниження внутрішньоклітинного енергетичного обміну (це відзначається полярографом по значному зниженню внутрішньоклітинного потенціалу);
7. **ядро набухає** і збільшується в розмірах. Надалі змінюється форма ядра, з'являються гігантські ядра, порівняно рідко відбувається лізис ядер;
8. що стосується генного апарата - спостерігаються **одиначні і подвійні розірвання ДНК**, хромосомні аберації. Хоча останні порівняно швидко елімінують (клітини знищуються й утилізуються організмом як зламані, зіпсовані).

Вплив радіоактивного випромінювання на структури, відповідальні за ріст і динаміку поділу клітин.

У самих загальних рисах: опромінення в момент інтерфази тобто між двома розподілами, коли накопичуються матеріали, ресурси, сили для майбутнього ділення, призводить до втрати спроможності до поділу. Якщо ж під час променевого удару клітина знаходилася вже на етапі ділення, то різко гальмується динаміка, темпи цього процесу поділу і завершення, а також порушується структура хроматинової речовини, йдуть у гіршому випадку аберації і загибель.

Найбільше чутливими, і отже найбільше уразливими є найбільш мітотично активні клітини органів кровотворення (червоний кістковий мозок, селезінка,

лимфовузли, а також клітини епітелію ЖКТ, клітини статевих залоз, тобто скрізь у тих тканинах, де йде активний поділ.

Механізм гальмуючої дії іонізуючого випромінювання складний і до кінця не вивчений, не пояснений. Тут висловлюється декілька гіпотез, кожна з яких в остаточному підсумку може виявитися правомірною: 1. руйнувати речовини, що стимулюють процес мітозу (такі, наприклад, як ауксини у рослин); 2. руйнувати ферменти, що розщеплюють АТФ, що призведе до його накопичення в клітині. Підвищення концентрації АТФ вище норми призводить до гальмування мітозу; 3. порушувати проникність екзомамбран, що призводить в остаточному підсумку до порушення форми клітини і гнобленню спроможності до ділення; 4. порушувати самий процес синтезу ДНК; 5. ушкоджувати хромосоми, їхню структуру, порушуючи процеси редуплікації, і приводячи до хромосомних аберацій.

Підрахунок числа клітин периферичної крові, кісткового мозку й інших тканин із хромосомними абераціями є **основним методом кількісної оцінки ступеня променевого ураження організму.**

Радіоактивні випромінювання впливають на будь-які речовини за допомогою утворення з молекул і атомів цієї речовини іонів, тобто за допомогою іонізації цієї речовини. І в першу чергу це стосується біологічних об'єктів, організмів, органів, тканин, клітин і субклітинних структур. Іншими словами іонізуючого випромінювання викликають іонізацію будь-яких хімічних сполук, із яких складається і які містить біологічний об'єкт, викликаючи перетворення хімічно нейтральних атомів і молекул у хімічно високоактивні радикали. За допомогою подальшого включення, запуску активними радикалами несанкціонованих, ненормальних для даних клітин біохімічних реакцій, визивається розвиток багатокомпонентних тривалих ланцюжків фізіологічно шкідливих, патологічних і навіть смертельних для об'єкта процесів. Результатом біологічної дії випромінювань є порушення нормальних біохімічних процесів і реакцій, із витікаючими звідси функціональними і морфологічними змінами в клітинах і тканинах тварин.

У механізмі біодії іонізуючого випромінювання на живі об'єкти умовно можна виділити два основних підходи:

I - в основі всіх змін лежить безпосередня (первинна) дія випромінювання на біохімічні процеси, на функції і структури органів і тканин.

II - в основі всіх змін лежить уже дія, що обумовлюється нейрогеними і гуморальними зрушеннями, що виникають у результаті розвитку первинних патологічних процесів.

Практично всім радіобіологам, що бралися за рішення цього фундаментального питання про механізм дії випромінювань доводилося зіштовхуватися із самим підступним, самим непоясненим, самим незрозумілим **парадоксом** усієї радіобіології: «чому, по яких причинах, настільки важкі наслідки, результати впливу на стійкі саморегулюючі біологічні системи, що самовідновлюються, таких мізерних у енергетичному відношенні іонізуючих

випромінювань. Адже практично смертельна, летальна доза випромінювання в 1000 Р передає опромінену стільки енергії, що у тепловому відношенні може підняти температуру цього організму не більш ніж на 0,001°C.

В даний час усі теорії біологічної дії радіації прийнято ділити на дві великі групи: 1. теорії прямої дії, 2. теорії непрямой дії.

Під прямою дією іонізуючого випромінювання розуміють зміни, які виникають в молекулі чи певній структурі внаслідок поглинання енергії та іонізації у ній самій.

Непряма дія випромінювання – така, при якій молекула чи структура отримує енергію при взаємодії з іншою молекулою або продуктами, що виникають внаслідок прямої дії.

Первинна дія радіації довільного виду на будь-який біологічний об'єкт починається з поглинання енергії випромінювання, що супроводжується збудженням молекул і їх іонізацією. Іонізація органічних молекул обумовлює виникнення вільних радикалів, які, включаючись у хімічні реакції, що протікають в організмі, порушують плин обміну речовин і, викликаючи появу невластивих організму сполук, порушують процеси життєдіяльності в цьому проявляється **пряма дія випромінювання**.

При іонізації молекул води в живому організмі, що складається до 90% з води, у присутності кисню виникають активні радикали (ОН- і ін.), гідратовані електрони, а також молекули перекису водню, що включаються потім у ланцюг хімічних реакцій у клітині, що забезпечує **непряму дію випромінювання**.

Гіпотеза прямої дії іонізуючого випромінювання найбільш повно розроблена в двох теоріях:

це «**Теорія мішеней і влучень**» Тімофєєва-Ресовського, яка загалом стверджує, що частка або гамма-квант іонізуючого випромінювання одномоментно діє на чутливу частину – «мішень» у структурі клітини або біомолекули, викликаючи генетичні зміни або загибель клітини і певного ступеня деструкції біомолекули.

це і **Стохастична теорія** (імовірносна), яка постулює, що взаємодія випромінювання зі структурами клітини відбувається стохастично, за принципом випадку, і доза-ефект залежить в основному не від улучень, а від стану, на момент улучення, самого біооб'єкту.

Обидва механізми (прямої та не прямої дії) передбачають існування певного біологічно важливого елемента – *мішені*, ураження якого може призвести до ураження клітини. Згідно сучасним уявленням *мішенню дії іонізуючої радіації є молекула ДНК*, або так званий *ДНК-мембранний комплекс*. За прямої дії високоенергетична ядерна частинка або квант мають влучити безпосередньо у мішень, приводячи до її ураження. За непрямой дії вони влучають в іншу молекулу внаслідок чого утворюються певні високоактивні продукти, які взаємодіють з мішенню. Вирішальна роль у цьому процесі відводиться молекулі води, вміст якої в клітинах живих організмів може досягати 90% і більше.

Під дією іонізуючої радіації відбувається *радіоліз води* – її розпад з виникненням дуже активних у хімічному відношенні продуктів – вільних радикалів і перекисів:



Саме ці продукти радіолізу взаємодіють з мішенню, призводячи до розривів хімічних зв'язків у макромолекулах, ураженню мембран та іншим пошкодженням, які за певних доз можуть стати причиною загибелі клітини.

В присутності кисню кількість вільних радикалів збільшується і це призводить до посилення радіаційного ураження. Це явище, назване *кисневим ефектом*, є видатним відкриттям в радіобіології, яке відіграло велику роль в її становленні на теоретичну основу.

Перше глибоке вивчення кисневого ефекту було проведене в 1930-і рр. англійським фізиком і радіобіологом *Л.Х. Греєм*, саме тим, ім'ям якого названа одиниця поглинутої дози. В дослідях з кінськими бобами і горохом він показав, що максимум кисневого ефекту досягається при вмісті його в атмосфері близько 20% (рис. 3.1) вміст кисню в повітрі біля земної поверхні складає 20,9%). Потім це було підтверджено багатьма дослідниками на різних об'єктах

Існує два визначення кисневого ефекту. Перше характеризує його як *явище посилення радіаційного ураження організму при підвищенні в середовищі концентрації кисню у порівнянні з опроміненням в анаеробних умовах*. Друге – як *послаблення радіаційного ураження організму при зниженні в середовищі вмісту кисню*. Легко помітити, що обидва формулювання не суперечать одне одному, а тільки розглядають явище з різних боків.

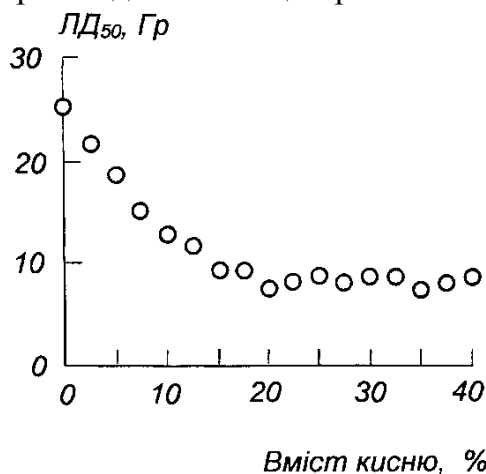


Рис. 3.1. Півлетальні дози γ - випромінювання для проростків гороху в залежності від кількості в атмосфері кисню.

Кисневий ефект – універсальне явище в радіобіології. Воно проявляється у всіх біологічних об'єктів і на всіх рівнях організації живої матерії. Його механізм пояснюється тим, що молекули кисню активно взаємодіють з вільними радикалами, які виникають при радіолізі води, внаслідок чого з'являються нові активні вільні радикали, які посилюють дію випромінювань на життєво важливі макромолекули і структури.

Кількісним вираженням зміни дії опромінення під впливом кисню є коефіцієнт кисневого підсилення ($K_{\text{КП}}$). Він являє собою відношення величини ефективної дози (звичайно LD_{50}) при опроміненні в умовах гіпоксії (дефіциту кисню) до дози, що зумовлює такий же ефект при опроміненні в повітрі. Наприклад, при опроміненні в анаеробних умовах проростків гороху LD_{50} складає 25 Гр, а при опроміненні в повітрі – 10 Гр. $K_{\text{КП}}$ у цьому випадку буде дорівнювати 2,5.

В опроміненій клітині процеси прямої і непрямой дії іонізуючого випромінювання ідуть водночас. Але за деякими оцінками на непрямую дію припадає до 90% ураження.

Цей підхід до механізму дії іонізуючої радіації на живі організми отримав назву *принцип влучення і мішені*. Згідно нього, щоб уразити клітину, необхідно влучити – потрапити у мішень. Попадання може бути пряме, коли високоенергетична ядерна частинка чи квант влучає у мішень, або непряме, коли ураження передається через продукти радіолізу води (рис. 3.2).

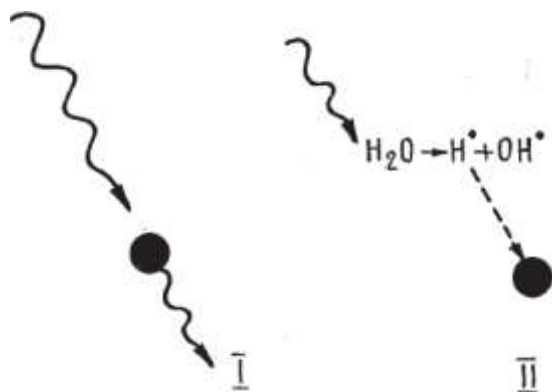


Рис. 3.2. Пряма (1) і непрямая дія (2) іонізуючої радіації (чорним кружечком позначена мішень).

До найбільш розроблених і аргументованих теорій непрямой дії відносяться такі:

це **Теорія ліпідних радіотоксинів** і ланцюгових реакцій. Вона стверджує, що під впливом іонізуючого випромінювання в тканинах (особливо в печінці) утворюються ліпідні (первинні) радіотоксини. У неопроміненій клітині вони утворюються теж, але в невеличких кількостях, і відразу інактивуються або інгібуються антиокислювачами (системою антиоксидантів). При опроміненні клітини, вільні активні радикали радіації, що утворилися, зв'язують, нейтралізують цю захисну антиоксидантну систему, а ліпідних радіотоксинів утворюється значна кількість. Починається процес перетворення, що самоприскорюється, нормальних ліпідів, що знаходяться в клітині або органі в ліпідні радіотоксини, у зв'язку з тим, що самі ж радіотоксини є як би каталізаторами цього лавиноподібного процесу, що припиняється тільки після вичерпання всіх запасів «нормальних» ліпідів. Ці первинні ліпідні радіотоксини по-перше самі дуже токсичні, по-друге запускають ланцюг подальших патологічних змін.

це **Структурно-метаболична теорія**, відповідно до якої динаміка і місце

порушення обмінних процесів при дії іонізуючого випромінювання обумовлені порушеннями цитоплазматичних структур під впливом первинних радіотоксинів. Але в даній теорії під первинними радіотоксинами припускаються не ліпідні біомолекули, що синтезуються в невеличких кількостях і в неопромінених клітинах, а цілком нефізіологічні хімічні сполуки, що цілком, цілком відсутні в неопромінених клітинах і тканинах, і як клітинні метаболіти з'являються тільки після опромінення у виді комплексів хінонів і ортохінонів, що мають токсичні властивості. Ці первинні хінонові й ортохінонові радіотоксини утворюють велику кількість найрізноманітніших вторинних радіотоксинів, які вже і грають превалюючу (найбільш істотну) роль у патогенезі і наслідків променевих уражень.

це **Імунобіологічна теорія**, яка стверджує, що реакція організму на дію випромінювання підкоряється загальнобіологічним закономірностям, як і при других подразниках. І ступінь відповідної реакції організму, або окремої тканини, клітини (у нормі) залежить від дози подразника.

І якщо доза подразника (у даному випадку це іонізуюче випромінювання) перевищує норму (фонові рівні), відповідь імунної системи буде неадекватно високою (аутоіммуна реакція). Крім усіх вищезгаданих теорій вірогідно встановлена участь нервової системи в опосередкованій дії іонізуючого випромінювання на організм у цілому.

При опроміненні в дозі 1000 Р (що відповідає поглиненій дозі порядку 10 Гр) у клітині середньої величини (10^{-9} г) виникає близько 1 млн. таких радикалів, кожний з яких у присутності кисню повітря може дати початок ланцюговим реакціям окиснення, що збільшують у багато разів кількість змінених молекул у клітині і викликають подальшу зміну надмолекулярних (субмікроскопічних) структур. З'ясування великої ролі вільного кисню в ланцюгових реакціях, що ведуть до променевого враження, т.зв. кисневого ефекту, сприяло розробці ряду ефективних радіозахисних речовин, що викликають штучну гіпоксію в тканинах організму.

Велику роль відіграє міграція енергії по молекулах біополімерів, у результаті якої поглинання енергії, що відбувається в будь-якому місці макромолекули, призводить до порушення її активного центру (наприклад, до інактивації білка-ферменту). Фізичні й фізико-хімічні процеси, що лежать в основі біологічної дії іонізуючого випромінювання, тобто поглинання енергії й іонізація молекул, займають частки секунд.

Біохімічні uszkodження, залежно від місця дії, можуть вплинути на організм, що одержав дозу, викликаючи соматичні ефекти, серед яких лейкоз, рак, зменшення тривалості життя й інші, або на регенеративні органи, у цьому випадку можлива передача генетичних uszkodжень (мутацій) віддаленим нащадкам.

Для дії іонізуючих випромінювань на біологічні об'єкти характерний ряд загальних закономірностей:

1) глибокі порушення життєдіяльності викликаються мізерно малими

кількостями енергії, що поглинається. Так, енергія, поглинена тілом ссавця тварини або людини при опроміненні смертельною дозою, при перетворенні в теплову привела б до нагрівання тіла всього на $0,001^{\circ}\text{C}$. Спроба пояснити «невідповідність» кількості енергії результатам впливу привела до створення **теорії мішені**, згідно з якою променеве ушкодження розбудовується при влученні енергії в особливо радіочутливу частину клітини - «мішень»;

2) дія іонізуючого випромінювання на біологічні об'єкти не обмежується організмом, підданим опроміненню, але може поширюватися й на наступні покоління, що пояснюється впливом на спадкоємний апарат організму. Саме ця особливість дуже гостро ставить питання вивчення біологічної дії іонізуючих випромінювань, захисту організму від випромінювань і обмеження поширення ядерних впливів на біосферу;

3) для дії іонізуючих випромінювань на біологічні об'єкти характерний схований (латентний) період. Розвиток променевого враження спостерігається не відразу й залежить від виду іонізуючого випромінювання, стану організму й ряду інших факторів. Тривалість латентного періоду може варіювати від декількох хв до десятків років залежно від дози опромінення, радіочутливості організму й спостережуваної функції. Так, при опроміненні в дуже великих дозах (тисячі Гр) можна викликати «смерть під променем», тривале ж опромінення в малих дозах веде до зміни стану нервової й інших систем, до виникнення пухлин через роки після опромінення.

Радіочутливість різних видів організмів різна. Смерть половини опромінених тварин (при загальному опроміненні) протягом 30 діб після опромінення (летальна доза - $LD_{50/30}$) викликається наступними дозами рентгенівського випромінювання: морські свинки 250 р, собаки 335 р, мавпи 600 р, миші 550-650 р, карасі (при 18°C) 1800 р, змії 8000-20000 р. Більш стійкі одноклітинні організми: дріжджі гинуть при дозі 30000 р, амеби - 100000 р, а інфузорії витримують опромінення в дозі 300000 р. Радіочутливість вищих рослин теж різна: насіння лілії повністю втрачають схожість при дозі опромінення 2000р, на насіння капусти не впливає доза в 64000 р.

Велике значення мають також вік, фізіологічний стан, інтенсивність обмінних процесів організму, а також умови опромінення. При цьому, крім дози опромінення організму, відіграють роль: потужність, ритм і характер опромінення (однократне, багаторазове, переривчасте, хронічне, зовнішнє, загальне або часткове, внутрішнє), його фізичні особливості, що визначають глибину проникнення енергії в організм (рентгенівське й гамма-випромінювання проникає на більшу глибину, альфа-частинки до 40 мкм, бета-частинки - на декілька мм), щільність іонізації, що викликається випромінюванням (під впливом альфа-частинок вона більша, ніж при дії інших видів випромінювання).

Усі ці особливості променевого фактору, визначають відносну біологічну ефективність випромінювання. Якщо джерелом випромінювання служать радіоактивні ізотопи, що потрапили в організм, то величезне значення для

іонізуючої дії, що випускається цими ізотопами, має їхня хімічна характеристика, що визначає участь ізотопу в обміні речовин, концентрацію в тому або іншому органі, а, отже, і характер опромінення організму.

Наступні біохімічні процеси променевого ушкодження розбудовуються повільніше. Активні радикали, що утворюються, порушують нормальні ферментативні процеси в клітині, що веде до зменшення макроергічних (багатих енергією) з'єднань. Особливо чутливий до опромінення синтез дезоксирибонуклеїнових кислот (ДНК) у клітинах, що інтенсивно діляться. Таким чином, у результаті ланцюгових реакцій, що виникають при поглинанні енергії випромінювання, змінюються багато компонентів клітини, у тому числі макромолекули (ДНК, ферменти й ін.) і порівняно малі молекули (аденозинтрифосфорна кислота, коферменти й ін.). Це приводить до порушення ферментативних реакцій, фізіологічних процесів і клітинних структур.

Вплив іонізуючого випромінювання викликає ушкодження клітин. Найбільш важливе порушення клітинного поділу. При опроміненні в порівняно малих дозах спостерігається тимчасова зупинка мітозу. Більші дози можуть викликати повне припинення поділу або загибель клітин. Порушення нормального ходу мітозу супроводжується хромосомними перебудовами, виникненням мутацій, що ведуть до зрушень у генетичному апараті клітини, а отже, до зміни наступних клітинних поколінь (цитогенетичний ефект).

При опроміненні статевих клітин багатоклітинних організмів порушення генетичного апарату веде до зміни спадкоємних властивостей організмів, що розвиваються з них. При опроміненні в більших дозах відбувається набрякання й пікноз ядра (ущільнення хроматину), потім структура ядра зникає. У цитоплазмі при опроміненні в дозах 10000 - 20000р (величина порядку 100-200 Гр) спостерігаються зміна в'язкості, набрякання протоплазматичних структур, утворення вакуолю, підвищення проникності. Усе це різко порушує життєдіяльність клітини.

Порівняльне вивчення чутливості ядра й цитоплазми до радіаційного впливу показало, що в більшості випадків чутливе до опромінення ядро (наприклад, опромінення ядер серцевого м'яза тритону в дозі декількох протонів на ядро викликало типові деструктивні зміни; доза в кілька тисяч разів більша не ушкодила цитоплазми). Численні дані показують, що клітини більш радіочутливі в період поділу й диференціювання: при опроміненні пошкоджуються насамперед тканини, що розвиваються. Це робить опромінення найнебезпечнішим для дітей і вагітних жінок. На цьому ж заснована й радіотерапія пухлин - зростаюча тканина пухлини гине при опроміненні в дозах, які менше ушкоджують навколишні нормальні тканини.

Виникаючі в клітинах, що опромінюються, зміни ведуть до порушень у тканинах, органах і життєдіяльності всього організму. Особливо виражена реакція тканин, у яких окремі клітини живуть порівняно недовго. Це слизова оболонка шлунка й кишечника, яка після опромінення запалюється, покривається виразками,

що веде до порушення травлення й усмоктування, а потім до виснаження організму, отруєнню його продуктами розпаду клітин і проникненню бактерій, що живуть у кишечнику, у кров.

Сильно ушкоджується кровотворна система, що веде до різкого зменшення числа лейкоцитів у периферичній крові й до зниження її захисних властивостей. Одночасно падає й вироблення антитіл, що ще більше послаблює захисні сили організму. (Зменшення здатності опроміненого організму виробляти антитіла й тим самим протистояти впровадженню чужорідного білка використовується при пересадженні органів і тканин - перед операцією пацієнта опромінюють.) Зменшується й кількість еритроцитів, із чим пов'язане порушення дихальної функції крові. Іонізуюче випромінювання також обумовлює порушення статевої функції та утворення статевих клітин аж до повної безплідності (стерильності) опромінених організмів.

Важливу роль у розвитку променевої хвороби тварин і людини відіграє нервова система. Так, у кроликів смертельний результат при опроміненні в дозі 10 Гр часто визначається порушеннями в центральній нервовій системі, що викликають зупинку серцевої діяльності й параліч дихання. Дослідження біоелектричних потенціалів мозку опромінених тварин і людей, що зазнають променевої терапії, показали, що нервова система раніше інших систем організму реагує на радіаційний вплив. Опромінення собак у дозі 5-20 р і хронічне опромінення в дозі 0,05 р при досягненні дози в 3 р веде до зміни умовних рефлексів. Більшу роль у розвитку променевої хвороби відіграють і порушення діяльності залоз внутрішньої секреції.

Для дії іонізуючого випромінювання на біологічні об'єкти характерна післядія, яка може бути дуже тривалою, тому що по закінченню опромінення ланцюг біохімічних і фізіологічних реакцій, що почалися з поглинання енергії випромінювання, триває довгий час. До віддалених наслідків опромінення відносяться зміни крові (зменшення числа лейкоцитів і еритроцитів), нефросклероз, цирози печінки, зміни м'язових оболонок судин, раннє старіння, поява пухлин. Ці процеси пов'язані з порушенням обміну речовин і нейроендокринної системи, а також ушкодженням генетичного апарату клітин тіла (соматичні мутації).

Променева ушкодження організму супроводжується також процесом відновлення, який пов'язаний з нормалізацією обміну речовин і регенерацією клітин. Тому опромінення дробове або з малою потужністю доз викликає менше ушкодження, ніж інтенсивний вплив. Вивчення процесів відновлення важливо для пошуків радіозахисних речовин, а також засобів і методів захисту організму від випромінювань. У невеликих дозах усі мешканці Землі постійно піддані дії іонізуючого випромінювання - космічних променів і радіоактивних ізотопів, що входять до складу самих організмів і навколишнього середовища. Випробування атомної зброї й застосування атомної енергії в мирних цілях підвищують радіоактивний фон.

У сільському господарстві радіаційні впливи застосовуються з метою виведення нових форм рослин, для передпосівної обробки насіння, боротьби зі шкідниками (шляхом виведення й випуску на плантації, що пошкоджуються, знепліднених опроміненням самців), для променевої консервації фруктів і овочів, збереження продуктів рослинництва від шкідників (доза, згубні для комах, нешкідливі для зерна) і ін.

Чутливість біологічних систем і організмів підвищується в міру збільшення маси тіла й ступеня організації організму. Найбільш стійкі до радіації спори, потім рослини, найпростіші організми, найбільш чутливі – тварини (рис. 3.3). Вертикальні риси ліворуч вказують рівні, при яких у більш чутливих видів даної групи можуть виникнути серйозні порушення функції розмноження. Риски праворуч вказують рівні, що викликають негайну загибель більшої частини організмів (осіб). Стрілки, спрямовані ліворуч, вказують нижні межі доз, які можуть викликати загибель або ушкодження чутливих стадій життєвого циклу, наприклад, ембріонів. Загалом ссавці мають найбільшу чутливість. А мікроорганізми - найбільш стійкі. Найбільш чутливі до опромінення - клітини, які діляться (цим пояснюється зниження чутливості з віком).

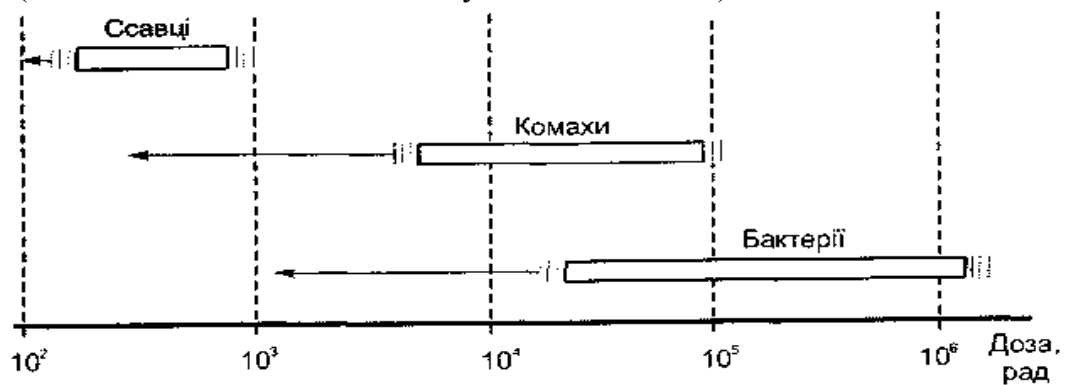


Рис. 3.3. - Порівняльна чутливість організмів

Людину відносять до одного з найбільш чутливих до радіації біологічних об'єктів. Загибель її в 50% випадків спостерігається при дозах опромінення 4 Зв (400 бер) (таблиця 1).

Таблиця 3.1

Дози, при яких 50% опромінених гине впродовж 30 діб

Біологічний об'єкт	Доза опромінення, Зв
Рослини	10-1500
Найпростіші	1000
Молюски	200
Змії	80-200
Комахи	10-100
Риби, птахи	8-20
Миші	6-15
Пацюки	7-9
Мавпи	2,5-6
Людина	4

Морські свинки	4
Собаки	2,4-4
Кози	3,5
Віслюки	3
Вівці	2

У результаті досліджень біологічної дії радіації на сім'яники щурів французькі вчені **Брегоньє та Трибонто** в 1906 році зробили перше фундаментальне узагальнення і сформулювали **закон**, що **найвищою радіочутливістю характеризуються клітини, котрі перебувають у стані активної проліферації, що супроводжується підвищенням напруженості метаболічних процесів**. Отже, рівень радіочутливості чи радіостійкості визначається не типом клітин, а їхньою проліферативною активністю. Чим вища проліферативна активність клітин, тим вища їхня радіочутливість. Наприклад, високою проліферативною активністю характеризуються стовбурні клітини кісткового мозку, меристема рослин, тому і радіочутливість їх дуже висока.

Радіочутливість тканин прямо пропорційна її мітотичній активності та обернено пропорційна ступеню диференціювання клітин, з яких вона утворена. Так, у ссавців печінка, м'язи, мозок, кістки, хрящі та сполучна тканина відносяться до резистентних, а кістковий мозок, генеративні клітини, епітелій кишківника та шкіри є високо радіо чутливими.

Закон Бергоньє-Трибонто відповідає зв'язку незворотних змін росту і розвитку окремих частин організму з їх енергією росту і факторами зовнішнього середовища, виявленого М.П. Чирвинським (1888) та А.А. Малігоновим (1925) – ті частини організму, які в даний період мають найвищу інтенсивність росту і розвитку найбільш чутливі до факторів зовнішнього середовища, в тому числі й до радіації.

Дія випромінювання на нуклеїнові кислоти. Ще на зорі розвитку радіобіології у 1905 р. німецький науковець М. Кьорнике в дослідях з кінськими бобами, які мають великі клітини і відносно невеликий набір хромосом, встановив, що найбільш чутливими до рентгенівського опромінення є меристематичні клітини, що знаходяться у стані поділу, а найбільш пошкоджуваною їх частиною – ядро. Під впливом опромінення відбувається порушення веретена поділу, спостерігаються розриви хромосом і порушення їх розходження, які в наступному отримали назву хромосомних аберацій, виникають двоядерні і багатоядерні клітини.

І досить важливо, що ці цитологічні ефекти можуть спостерігатися вже у найперші години після опромінення, коли ще відсутні будь-які інші візуальні порушення на рівні органів, організму в цілому.

У подальшому розвитку біологічних наук, по мірі проникнення в молекулярні основи життєвих явищ і біохімічну суть процесів метаболізму все більш виявлялася провідна роль і значення клітинного ядра в усіх процесах, що відбуваються у головній структурно-функціональній одиниці всіх живих

організмів, елементарній живій системі – клітині.

Натепер встановлено, що в хромосомах клітинних ядер зосереджена основна маса ДНК, яка містить в структурі своїх макромолекул закодовану генетичну інформацію, необхідну для реалізації програми розвитку організму. У клітинному ядрі здійснюється синтез ДНК, який завершується подвоєнням її вмісту, редуплікацією хромосом і наступним поділом клітини головних процесів, які забезпечують збереження спадкових ознак, ріст, розвиток і розмноження організмів. В ядрах статевих клітин відбуваються процеси злиття ДНК чоловічого і жіночого походження, процеси кросинговеру, які забезпечують завдяки обміну гомологічних ділянок молекул ДНК мінливість організмів та еволюцію форм життя на Землі. Він завершується мейозом, у результаті якого відбувається зменшення кількості хромосом і перехід клітин з диплоїдного стану у гаплоїдний.

В основному в клітинних ядрах, точніше у ядришках, здійснюється синтез різних РНК, відповідальних за утворення різноманітних білків. Якщо до того ж врахувати, що в клітинних ядрах знаходяться гликолітична система і система окислювального фосфорилування, які забезпечують енергетику усіхвищеперерахованих процесів, синтезується нікотинамідадениннуклеотид (НАД) – кофермент, необхідний для забезпечення дихання клітини, то стає зрозумілим виключно важлива роль ядра у найбільш суттєвих проявах життя клітини. Зрозумілий і інтерес радіобіологів до досліджень радіочутливості цих процесів, їх спроби пов'язати радіобіологічні ефекти з ураженням клітинного ядра, хромосом, молекули ДНК.

І дійсно, ДНК – найбільша за розміром і найбільш біологічно значима молекула є найбільш імовірною внутрішньо клітинною мішенню іонізуючої радіації. На теперішній час радіобіологія накопичила достатню кількість фактів, які доводять, що ураження у структурі і функціях ДНК, дезоксирибонуклеопротейного комплексу (ДНП), у складі якого головним чином знаходиться ДНК в клітинах еукаріотів, і більш складних утворень – хромосом, які складаються з цих макромолекул, є основною причиною виникнення радіобіологічних ефектів і в першу чергу таких, як морфологічні зміни, променева хвороба, генетичні зміни, загибель організму.

Чисельні дослідження з дії різних типів іонізуючої радіації на структуру ДНК дозволили виділити цілу низку різноманітних типів її ураження, котрі можуть призвести до порушень її функцій. Вже за мінімальних доз у полінуклеїдному ланцюгу двотяжевої молекули ДНК виникають поодинокі розриви як наслідок ураження зв'язків в молекулі дезоксирибози чи ефірних фосфорнокислих зв'язків (рис. 3.4, а). Такі поодинокі розриви, не змінюючи молекулярної маси ДНК, можуть призводити до змін у вторинній структурі молекули, ковалентному приєднанню по місцю розриву інших молекул. Проте, виникнення поодиноких розривів у більшості випадків не є драматичною подією для клітини. Але із збільшенням дози опромінення і зростанням кількості поодиноких розривів, збільшується імовірність появи в молекулі подвійних розривів (рис. 3.4, б). Це

може призводити до поперечних розривів молекули ДНК, тобто її деполімеризації, що є критичною реакцією і має вирішальне значення для виживання клітини.

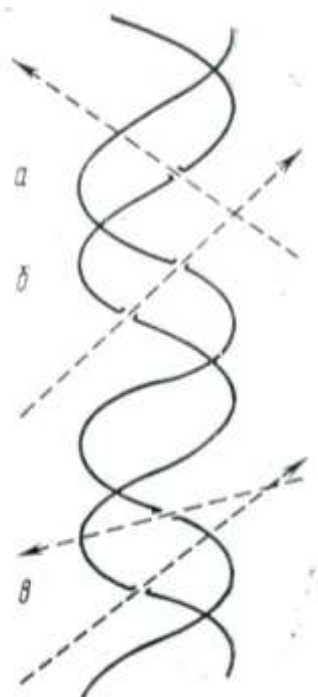


Рис. 3.4. Схема виникнення поодиноких і подвійних розривів в молекулі ДНК: *a* – поодинокий розрив, *б* – подвійний розрив, що виник від одного високоенергетичного кванту; *в* – подвійний розрив, що виник внаслідок попадання двох квантів.

Важливим типом радіаційного ураження структури ДНК є розриви водневих зв'язків між ланцюгами у подвійній спіралі, котрі можуть призводити до часткової її денатурації, ураженню основ та їх відщепленню від молекули, утворенню внутрішньо молекулярних і міжмолекулярних зшивок, виникненню зшивок основ і зшивок ДНК-білок, руйнуванню основ, виникненню перекисів тимину і цитозину, дезамінуванню, вивільненню основ та деяким іншим, і, зрештою, до зміни її фізико-хімічних властивостей і, відповідно, порушенню функцій.

Синтез ДНК являє собою унікальну подію в житті клітини, до якого вона готується протягом тривалого часу, після якого перестає існувати, давши початок життю двом новим клітинам. Синтез ДНК є дуже радіочутливим процесом. При опроміненні ссавців і деяких видів рослин (наприклад, кінських бобів) в дозах усього 0,5–1 Гр і навіть менших в клітинах їх постійно оновлювальних тканин (червоний кістковий мозок, епітелій кишечника, ендотелій судин у перших і в меристемах других) можна спостерігати достовірно зниження його інтенсивності вже через 1–2 год. А за летальних доз він, як правило, повністю припиняється через декілька годин після опромінення.

Головною причиною пригноблення синтезу ДНК слід вважати пошкодження чи зміну її структури, структури ДНП і надмолекулярної структури хроматину в цілому. Саме воно призводить до порушення нормального його перебігу, виникненню «помилки» при передачі інформації на РНК та іншим наслідкам, часом фатальними для клітини і усього організму.

РНК, яка представлена у клітині декількома формами – матричною, рибосомальною, транспортною – належить до масових структур клітини: вони повторюються у багатьох копіях і в разі необхідності можуть бути синтезовані у необхідній кількості. Тому радіаційне порушення структури РНК не так відповідальне за ураження клітини, як ураження структури унікальної молекули ДНК. Типи ж радіаційних уражень РНК схожі з такими для ДНК.

Синтез РНК вважається порівняно радіостійким процесом, хоча вплив опромінення на синтез окремих форм РНК неоднозначний. Безпосередньо під впливом опромінення в дозах, які повністю пригнічують синтез ДНК, сумарний синтез ДНК не змінюється протягом багатьох годин. Але у більш пізні строки (через добу) його швидкість знижується, що пояснюється звичайно вторинними причинами і, перш за все, пригніченням синтезу ДНК, безпосередньо пов'язаним з синтезом інформаційної та транспортної РНК.

Втім, порушення регуляції ранніх етапів транскрипції РНК, зупинка синтезу РНК на ланцюгу ДНК можуть відбуватися за досить невисоких рівнях опромінення і призводити до ураження клітини.

Радіаційно-хімічні зміни білків, амінокислот і вуглеводнів. Радіочутливість білків в основному визначається радіочутливістю амінокислот, що входять до їх складу. Ряд радіочутливості амінокислот по мірі її зниження виглядає так: сірковмісні (цистеїн, метіонін), деякі циклічні (тирозин, триптофан, гистидін), такі, що містять азотовмісні групи (аргінін, аспарагін, глутамін), амінокислоти, що не містять в остатку приєднані групи або містять –ОН (фенілаланін, пролін, валін, лейцин, ізолейцин, гліцин, серин, треонин). Безперечно, дані з радіочутливості окремих амінокислот, отримані, як правило, в модельних умовах, не можна переносити на білки – їх ураженість залежить від співвідношення амінокислот, розташування їх остатків, структури білкової молекули.

При дії іонізуючої радіації на білки, як і на інші високомолекулярні сполуки, виникають такі порушення:

- конфігураційні видозміни молекули, не зв'язані із зміною молекулярної маси, але такі, що призводять до змін фізико-хімічних і біологічних властивостей білка;
- утворення зшивок між молекулами, агрегація молекул, збільшення молекулярної маси;
- деструкція макромолекули з розривом пептидних або вуглеводних зв'язків, зменшення молекулярної маси;
- хімічні перетворення активних груп на поверхні та у глибині білкової молекули (глобули), у першу чергу окислювального або відновлювального характеру.

Деякі з цих змін (наприклад, хімічні перетворення активних груп) можуть бути пов'язані з іншими (наприклад, з конфігураційними перебудовами чи утворенням зшивок) і тоді всі зміни об'єднують під загальним поняттям денатурація білків.

В принципі ж вважається, що синтез більшості білків і ферментів відноситься до радіостійких процесів. Навіть при надлетальних дозах, за яких повністю і практично миттєво припиняється синтез ДНК, поділ клітини і наступає її репродуктивна загибель, не відбувається такого ж швидкого інгібування синтезу багатьох білків. Довгий час зберігається достатньо високою і активність багатьох білків-ферментів. Хоча, безперечно, до цього питання слід підходити достатньо диференційовано: ядерні білки, наприклад, менш радіостійки, ніж більшість білків цитоплазми; активність деяких білків-ферментів, таких як нуклеази, що приймають участь у регуляції синтезу і розпаду нуклеїнових кислот, подавляється при порівняно невисоких дозах. Але в цілому можна однозначно стверджувати, що переважна кількість білків має значно більш високу радіостійкість, ніж нуклеїнові кислоти.

З порушеннями структури і, відповідно, функцій білків пов'язане ослаблення здатності білків до молекулярного узнавання, що визначає здатність до самозбірки надмолекулярних структур, таких як мультиензимні комплекси, хроматин, цитоскелет, електронно-транспортний ланцюг мітохондрій (хлоропластів).

Враховуючи множинність молекул окремих білків, можливість їх синтезу *de novo* у випадку дефіциту, за помірних опроміненнях живих організмів іонізуючою радіацією пряме ураження білкових молекул не має вирішального значення для життєздатності клітин.

До вуглеводів, або сахаридів, належать речовини із загальною формулою $(C_nH_{2n}O)_n$. При дії іонізуючих випромінювань на моносахариди виникають як окислені, так і відновлені продукти, які містять або таку ж кількість атомів вуглецю, що і вихідна молекула, або її низьковуглеводні фрагменти, а також високомолекулярні продукти полімеризації.

При дії радіації на полісахариди спостерігаються складні зміни – порушення структури окремих мономерних одиниць, розриви глікозидних зв'язків. Розриви полімерних ланцюгів, що призводять до деполімеризації, є однією з основних реакцій на опромінення. Це стає причиною зміни їх фізико-хімічних властивостей: в'язкості, механічної пружності, набухання, розчинності, швидкості гідролізу.

Дія випромінювань на білково-ліпідні мембрани. Клітинні мембрани відділяють цитоплазму від навколишнього середовища, а також формують оболонки ядер, мітохондрій, пластид. Основу клітинної мембрани складає подвійний шар полярних ліпідів – фосфоліпідів. Приблизно половина поверхні ліпідного шару покрита білками. До складу мембрани входять також полісахариди. Їх розгалужені молекули ковалентно зв'язані з білками, утворюючи глікопротеїни, або з ліпідами – гліколіпіди. Плазматична мембрана, або плазмалема, – основна універсальна для всіх клітин мембрана. Вона являє собою тонку (близько 10 нм) плівку, що покриває усю клітину (рис. 3.5).

Важливою властивістю і функцією мембран є вибіркова проникність для молекул і іонів різних речовин. Ця властивість визначає плазматичну мембрану як осмотичний бар'єр, що розділяє різні компартменти (свого роду відсіки) клітини,

котрі призначені для тих чи інших спеціалізованих процесів і циклів. Окремі речовини переносяться через мембрану шляхом дифузії і активного транспорту. Молекули глікопротеїнів, що виступають з клітинної мембрани, приймають участь у розпізнаванні окремих речовин. Саме з розпізнаванням і пов'язана регуляція транспорту і переносу молекул і іонів через мембрану.

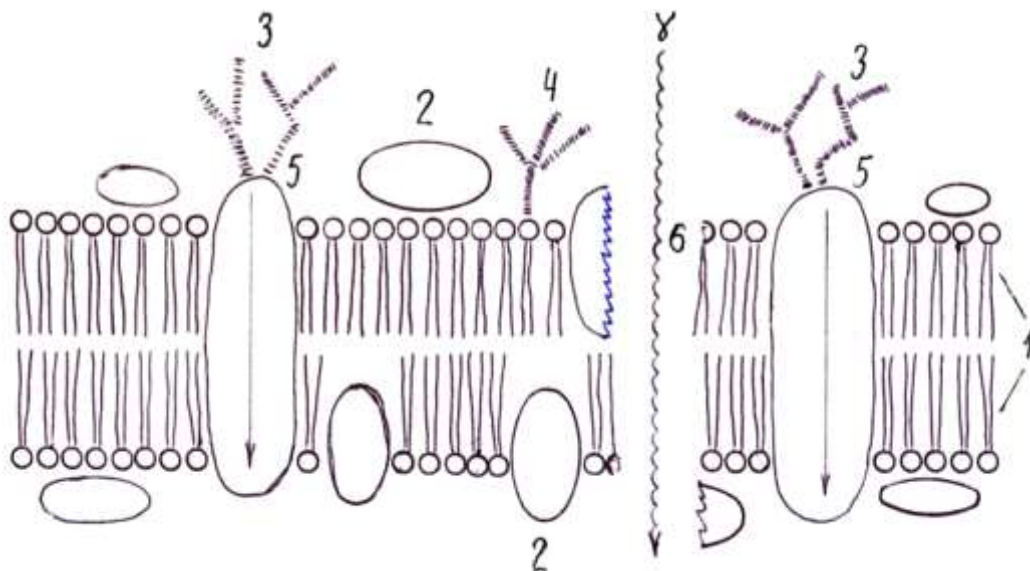


Рис. 3.5. Схема будови і радіаційного ураження плазматичної мембрани: 1 – шари молекул фосфоліпідів, 2 – білки, що примикають до фосфоліпідних шарів, 3 – глікопротеїни, 4 – гліколіпіди, 5 – канал, що функціонує як пора з вибірковою пропускну здатністю, 6 – розрив у мембрані, який виникає при дії іонізуючої радіації.

При дифузії речовини переносяться через пори мембрани за градієнтом концентрації, тобто з місця, де їх концентрація вища, до місця, де їх концентрація нижча.

Активний транспорт вимагає витрат енергії і слугує для переносу речовин проти їх градієнту концентрації. Він здійснюється за допомогою вузько спеціалізованих ферментів трансфераз – білків-переносчиків, які утворюють так звані іонні насоси.

Отже, біологічні мембрани як структурні елементи клітини є не просто фізичними кордонами між окремими її структурами, а являють собою динамічні функціональні поверхні, що регулюють обмін речовин між окремими частинами клітини. Крім того, на мембранах органел здійснюються чисельні біохімічні процеси, такі як синтез АТФ, перетворення енергії, активне поглинання речовин та інші.

При дії іонізуючого випромінювання у мембранах виникають отвори, що призводить до порушень регульованого транспорту різних речовин і обмінних процесів в клітині. При великих дозах такі порушення можуть призвести до її загибелі.

У жирних і жироподібних – ліпідних структурах опромінення іонізуючою радіацією в присутності кисню призводить до утворення вільних радикалів і перекисів. Ці активні продукти, взаємодіючи з нейтральними молекулами ліпідів,

поступово їх окислюють. Внаслідок розвиваються ланцюгові реакції окислення органічних сполук, в результаті чого утворюються високотоксичні продукти окислення – ліпоперекиси, ненасичені жирні кислоти, епоксиди, альдегіди, кетони та деякі інші. Встановлено, що при штучному введенні таких речовин в організм виникають симптоми отруєння, характерні для радіаційного ураження. Ці факти було покладено в основу *ліпідної теорії дії іонізуючого випромінювання* на живі організми.

Таким чином, мембрани можуть бути мішенню дії іонізуючого випромінювання, так як навіть незначне їх ураження може змінити перебіг процесів метаболізму. Саме тому, як вже підкреслювалося, більш правильно мішенню дії іонізуючої радіації вважати не просто молекулу ДНК, а ДНК-мембранний комплекс.

Дія випромінювання на деякі фізіолого-біохімічні процеси рослин. Поряд з радіочутливими процесами як в організмі тварин, так і рослин є багато таких, які мають значно більш високу радіостійкість порівняно з синтезом нуклеїнових кислот і білків. При опроміненні рослин в дозах у декілька разів вищих за летальні деякі фізіологічні процеси, зокрема фотосинтез, дихання, поглинання елементів живлення, протягом досить тривалого періоду можуть залишатися без змін.

Висока радіостійкість цих процесів свідчить про слабу ураженість іонізуючою радіацією елементарних структур клітин, які виконують певні функції. Так, фотосинтез є стійким до радіації внаслідок того, що для ураження хлоропластів необхідні надзвичайно високі дози опромінення. Це було встановлене в експериментах з ізольованими хлоропластами, які були здатні переносити дози γ -опромінення у тисячі грей (тут слід нагадати, що доза 100 Гр є летальною для вищих рослин найбільш радіостійкої родини капустяних).

Мітохондрії, які забезпечують організм енергією при диханні, більш радіочутливі, ніж хлоропласти. Проте й вони мають незрівняну, наприклад, з хромосомами, більш високу радіостійкість.

Надходження і транспорт у рослині елементів живлення пов'язане зі структурною цілісністю клітинних мембран і з функціонуванням систем конного транспорту, які забезпечують активний перенос окремих речовин. І хоча вже говорилося про високу радіочутливість мембран, в цілому транспортні системи мають досить високу стійкість щодо багатьох уражуючих чинників, у тому числі іонізуючій радіації. Особливо високу стійкість мають системи пасивного переносу речовин.

Безперечно, опромінення іонізуючою радіацією рослин чи тварин діє і на інші системи метаболізму, що може проявлятися у гальмуванні синтезу деяких речовин чи, навпаки, збільшенні кількості інших, зміни їх складу, співвідношення в клітині. Проте, на основі таких спостережень не завжди можна однозначно судити про порівняльну радіочутливість окремих процесів. Нерідко гальмування є вторинною функцією пригноблення, наприклад того ж синтезу ДНК, певних білків-ферментів, поділу клітин. Збільшення накопичення деяких речовин, наприклад сірковмісних

амінокислот, може бути захисною реакцією організму від радіаційного ураження.

2. Шляхи надходження іонізуючого випромінювання.

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

Зовнішнє опромінення

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

Зовнішнє гамма-опромінення людини поза приміщеннями (будинками) зумовлене наявністю радіонуклідів у різних природних середовищах (грунті, приземному повітрі, гідросфері і біосфері).

Основний внесок у дозу зовнішнього гамма-опромінення дають гамма-радіонукліди урано-радієвого і торієвого рядів і калій-40. При цьому головними джерелами зовнішнього гамма-опромінення в повітрі торієвої серії радіонуклідів є торій-228 і радій-224, а в урановому ряду 99% дози визначається гамма-випромінюванням свинцю-214 і вісмуту-214.

Так, щорічна доза, яку отримує населення від радіонуклідів, що знаходяться в зовнішньому середовищі, становить від 0,32 до 0,82 мЗв залежно від умов місцевості.

Середня щорічна еквівалентна доза зовнішнього опромінення для населення всієї земної кулі береться такою, що дорівнює 0,65 мЗв. Якщо людина знаходиться в приміщенні, доза зовнішнього опромінення змінюється під впливом двох протилежно діючих чинників: екранування зовнішнього випромінювання будинком і випромінювання природних радіонуклідів, що знаходяться в матеріалах, з яких збудовано будинок. Залежно від концентрації ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th у різних будівельних матеріалах потужність дози в будинках значно змінюється.

Якщо за одиницю взяти такий матеріал, як дерево, то мешканці, що проживають у будинках з іншого будівельного матеріалу, одержують річну дозу:

- з вапняку - в 1,3 раза більшу;
- з бетону, цегли - в 3 рази;
- з пемзового каменю - в 10 разів;
- з граніту - в 10-12 разів.

Внутрішнє опромінення

Внутрішнє опромінення людини створюється радіонуклідами, що потрапляють в організм разом із їжею, повітрям і водою. З них найбільш вагомий

вклад в ефективну еквівалентну дозу вносять ^{40}K , ^{14}C , ^{87}Rb , ^{210}Po , ^{226}Ra , а також радон-222 і радон-220 (торон).

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

Можливі чотири шляхи проникнення радіоактивних речовин в організм: через органи дихання, через шлунково-кишковий тракт (ШКТ), через ушкодження і розриви на шкірі і шляхом абсорбції через здорову шкіру.

Найбільш небезпечний перший шлях, оскільки об'єм повітря, що споживає людина, становить $20 \text{ м}^3/\text{добу}$, а з їжею людина споживає тільки 2,2 л води за добу (800 л/рік). В легенях цезій і стронцій всмоктуються на 100%. При цьому засвоєння і відкладання в організмі радіонуклідів, як правило, вище, ніж при заковтуванні. Засвоєння через ушкоджену шкіру у 200-300 разів менше, ніж через ШКТ, і не має істотного значення порівняно з цими двома шляхами.

При попаданні радіоактивних речовин в організм будь-яким шляхом вони вже через кілька хвилин виявляються в крові. Якщо надходження радіоактивних речовин було однократним, то концентрація їх у крові спочатку зростає до максимуму, а потім протягом 15-20 діб знижується.

Радіоактивні аерозолі залежно від дисперсності частинок по-різному затримуються в різних відділах дихальних шляхів. Так, аерозолі з розміром частинок більше 1 мкм переважно затримуються у верхніх дихальних шляхах і виштовхуються назовні; частинки до 1 мкм - у трахеобронхіальній ділянці, а частинки менше 0,1 мкм - у легеневої альвеолах. При цьому нерозчинні частинки зберігаються в легенях, і легенева тканина одержує певну дозу радіації, а розчинні радіонукліди потрапляють у кров і далі разом із нею надходять до різних тканин організму. Отже, частка радіонуклідів, які потрапляють з легень до інших органів, значною мірою залежить від дисперсності аерозолів, які вдихаються. Швидкість переходу радіонуклідів з легень до інших органів організму тим вища, чим краща розчинність аерозолів, що вдихаються, у фізіологічних рідинах організму і, зокрема, у лімфі крові.

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

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

Якщо радіонукліди не закріпилися в тканинах і органах тіла, вони через деякий час проходять через нирки і виводяться із сечею.

Процес виведення радіонуклідів характеризується такими показниками, як період біологічного напіввиведення та ефективний період напіввиведення.

Період біологічного піввиведення T_b – це час, протягом якого кількість (активність) даного радіонукліда в організмі зменшується вдвічі внаслідок його фізіологічного обміну.

Ефективний період піввиведення T_{ef} – це час, протягом якого кількість (активність) радіонукліда в організмі зменшується вдвічі внаслідок радіоактивного розпаду і біологічного виведення:

$$T_{ef} = \frac{T_{1/2} \cdot T_b}{T_{1/2} + T_b}.$$

Одним з важливих показників є коефіцієнт всмоктування. Всмоктуваність радіоактивних речовин у шлунково-кишковому тракті визначається в основному їх розчинністю у біологічних середовищах (кров, лімфа), а також потребою організму в них або в їх аналогах. Добре всмоктуються ізотопи елементів, необхідних організму, – натрій, калій, магній, цезій, кальцій, стронцій, барій, рутеній та ін.

Величина дози, що визначає тяжкість ураження, залежить від того, одержує її організм відразу або в декілька прийомів. Більшість органів встигає тією чи іншою мірою залікувати радіаційні ушкодження й тому краще переносить серію дрібних доз, ніж таку ж сумарну дозу опромінення, отриману за один прийом.

Зрозуміло, якщо доза досить велика, опромінена людина загине. В усякому разі дуже великі дози опромінення (порядку 100 Гр) викликають настільки серйозні ураження центральної нервової системи, що смерть, як правило, настає протягом декількох годин або днів. При опроміненні всього тіла в дозах від 10 до 50 Гр ураження центральної нервової системи може виявитися не настільки серйозним, щоб привести до летального результату, однак опромінена людина швидше за все однаково загине через 1-2 тижні від крововиливів у шлунково-кишковому тракті.

При ще менших дозах може не відбутися серйозних ушкоджень ШКТ або ж організм із ними впорається, проте смерть може настати через 1-2 місяці з моменту опромінення головним чином через руйнування клітин червоного кісткового мозку - головного компонента кровотворної системи організму: від дози в 3-5 Гр при опроміненні всього тіла помирає приблизно половина всіх опромінених.

Слід зазначити, що найбільш уразливими до опромінення органами людини є червоний кістковий мозок та інші елементи кровотворної системи, репродуктивні органи, легені й кровоносні судини.

Тяжкість виникаючих наслідків для людини залежить від дози опромінення. Чим більша доза, тим важчі наслідки. При цьому існує мінімальна доза, при якій негативний вплив не виникає. Вона називається граничною дозою. Так, при дозі опромінення всього тіла в 1 Зв (100 бер) і вище, як правило, виникає гостра променева хвороба. У людини з'являються нудота, блювання, зміни параметрів крові і т.д. Нижче цієї дози опромінення зазначені ефекти не виявляються.

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

У тканинах дитячого організму концентрація найбільш радіочутливих

молекул і клітин вища, ніж у дорослого, тому зростає можливість прямої дії радіації, а внаслідок великого питомого вмісту радіолізованої води - і побічного впливу. З іншого боку, дитячий організм має високу здатність до відновних процесів.

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

Гостре короткочасне опромінення більш небезпечне, ніж опромінення такою ж сумарною дозою, але протягом тривалого часу. Наприклад, якщо доза загального гострого (короткочасного) опромінення людини, що дорівнює 4 Зв (400 бер), в 50% випадків може призвести до смертельного результату, то загальне опромінення такою самою дозою протягом десятків років не дає ніяких безпосередніх негативних ефектів.

При систематичному опроміненні дозами нижче 1 Зв (викликає гостру променеву хворобу), але в сумі набагато більшими за гранично допустимі, спостерігаються зміни складу крові (недокрів'я) і ряд симптомів розладу нервової системи (лейкози, злоякісні пухлини різних органів і тканин, катаракти, ураження шкіри, скорочення тривалості життя). Віддалені наслідки, зумовлені впливом ІВ, можна оцінити тільки статистичними методами.

При відносно низьких дозах опромінення, навіть в умовах проживання населення в зонах, що підпали під радіоактивне забруднення внаслідок аварії на атомних станціях, з дозовими навантаженнями до 5 мЗв/рік змін стану здоров'я, що прямо залежать від іонізуючого опромінення, як правило, не спостерігається.

Усі ефекти радіації пов'язані тільки з дозою радіації й не залежать від джерел опромінення. Організм не розрізняє дози від природних джерел, рентгенівського опромінення або викидів АЕС.

3. Дія іонізуючих випромінювань на мікроорганізми

Мікроорганізми, по чутливості до радіаційної дії, звичайно розташовують у такому порядку: - найбільш чутливі бактерії, потім цвілі, дріжджі, спори бактерій, віруси. Однак цей поділ не абсолютний, тому що серед бактерій є види більш радіостійкі, ніж віруси.

Радіочутливість мікроорганізмів модифікують різні фактори, як внутрішні: генетична природа самої клітини, життєва фаза клітини й інші, так і зовнішні: температура, концентрація кисню й інших газів, склад і властивості середовища в якому проводиться опромінення, а також тип радіаційного впливу і його потужність і інші фактори. Радіочутливість мікроорганізмів значно нижче, ніж у рослин і тварин на 1-2 порядки, у ряді випадків бактерицидний ефект для деяких видів може бути досягнутий тільки при значних дозах: 1-2 Мрад.

Уже на перших етапах дослідження радіаційної чутливості мікроорганізмів було показано, що при дозі 5000 Р значно знижується виживаність кишкової

палички, а при дозі 20 кР гине 95 % бактерій. Культура мікроорганізмів кожного виду містить суміш клітин, різних по чутливості до радіації. Наприклад для культури кишкової палички 66% LD₅₀ відповідала доза 1,2 крад, а для 34 % бактерій – 3,5 крад. При опроміненні бактерій кишкової групи гама променями, їх інактивація відбувається в межах від 24 до 168 крад, а загибель усіх клітин при дозах близько 300 крад.

Для одержання однакового біологічного ефекту в різних видів мікроорганізмів потрібні різні дози випромінювання. Ці відмінності залежать від ряду біологічних особливостей бактерій, що опромінюються, умов опромінення, впливу зовнішнього середовища й інших факторів. Особливе значення надається неоднаковій чутливості нуклеїнового обміну й ДНК різних організмів до радіаційного опромінення.

Чутливість бактерій до радіації значно змінюється усередині того самого виду й, навіть, популяції бактеріальних клітин. Популяція клітин складається з бактерій, що розташовуються по стійкості до радіації у варіаційний ряд, так само, як і по інших біологічних ознаках. Тому в популяції завжди присутні особливо радіорезистентні клітини, для того, щоб їх убити, потрібно опромінювати надвеликими дозами, ніж ті, при яких гине основна маса клітин більш радіочутливих. Грампозитивні бактерії менш чутливі до опромінення, ніж грамнегативні.

Спори бактерій мають дуже низьку радіочутливість, але й серед неспорутоутворюючих мікроорганізмів відомі організми радіостійкості яких може перевищувати стійкість спор. Найчастіше вони належать до коків або сарцинів. Відомі мікрококи, у яких напівлетальна доза рівна 400 крад (4 кгр). При променевої стерилізації м'яса, риби й інших продуктів найбільш часто після опромінення в дозах від 600 до 1500 крад виявляли коків. Прикладом високої радіостійкості можуть бути також бактерії, що виділяються з вод атомних реакторів.

4. Дія іонізуючих випромінювань на рослини

У цілому, рослини більш стійкі до радіаційного впливу, ніж птахи та ссавці. Опромінення в невеликих дозах може стимулювати життєдіяльність рослин - проростання насіння, інтенсивність росту корінців, накопичення зеленої маси й ін. Потрібно відзначити, що дозова крива безумовно повторюється в дослідах у відношенні найрізноманітніших властивостей рослин для доз радіаційного впливу, що викликають пригноблення процесів. Відносно стимуляції дозова характеристика процесів не так очевидна. У багатьох випадках прояв стимуляції на живих об'єктах не спостерігається.

Більші дози (200 - 400 Гр) викликають зниження виживаності рослин, поява каліцтв, мутацій, виникнення пухлин. Порушення росту й розвитку рослин при опроміненні в значній мірі пов'язані зі змінами обміну речовин і появою первинних радіотоксинів, які в малих кількостях стимулюють життєдіяльність, а в більших -

пригнічують і порушують її. Так, промивання опромінених насіннь протягом доби після опромінення знижує гнітючий ефект на 50-70%.

У рослин променева хвороба виникає під впливом різних видів іонізуючих випромінювань. Найнебезпечніші альфа-частинки й нейтрони, що порушують нуклеїновий, вуглеводний і ліпідний обмін у рослинах. Дуже чутливе до опромінення коріння й молоді тканини. Загальний симптом променевої хвороби - затримка росту. Наприклад, у молодих рослин пшениці, квасолі, кукурудзи й інших затримка росту спостерігається через 20-30 год після опромінення дозою більш 4 Гр. У той же час різними дослідниками показано, що опромінення повітряно-сухих насіннь багатьох культур дозами 3-15 Гр не тільки не приводить до пригноблення росту й розвитку рослин, а навпроти сприяє прискоренню багатьох біохімічних процесів. Це виражалось в прискоренні розвитку й збільшенні врожайності.

Установлені видові, сортові й індивідуальні внутрішньосортів відмінності в радіочутливості рослин. Наприклад, симптоми променевої хвороби в традесканції виникають при її опроміненні дозою 40 р, у гладіолуса - 6000 р. Смертельна доза опромінення для більшості вищих рослин 2000-3000 р (поглинена доза порядку 20-30 Гр), а нижчих, наприклад дріжджів, 30 000 р (300 Гр). При променевої хвороби підвищується також сприйнятливості рослин до інфекційних хвороб. Уражені рослини не можна використовувати в їжу й на корм худобі, тому що вони можуть викликати променево хворобу в людини й тварин. Методи захисту рослин від променевої хвороби розроблені недостатньо.

5. Дія іонізуючих випромінювань на тварин

Радіочутливості безхребетних змінюється в значних межах: напівлетальна доза в деяких асцидій, кишковопорожнинних, членистоногих, нематод коливається в межах від 30 до 50 Гр. У моллюсків вона перебуває в межах 120-200 Гр, в амеб ця величина досягає 1000 Гр, а в інфузорій стійкість близька до стійкості мікроорганізмів - LD₅₀ перебуває в межах 3000 - 7000 Гр.

Радіочутливості залежить як від сукупності властивостей організму й стану навколишнього середовища, так і від періоду онтогенезу. Так у дрозофілі напівлетальна доза в стадії імаго рівна 950 Гр, у стадії лялечки 20-65 Гр, чутливості яєць, залежно від часу коливається від 2 до 8 Гр, а в стадії личинки вона рівна 100-250 Гр.

Чутливості хребетних до радіаційного впливу значно вище, ніж у попередніх груп організмів. Найбільш радіостійкі змії, у яких LD₅₀ перебуває в межах від 80 до 200 Гр, у тритонів і голубів вона відповідає величинам 25-30 Гр, у черепах - 15-20 Гр, у курей - 10-15 Гр, для корошових риб - 5-20 Гр, для гризунів 5-9 Гр. Ссавці ще менш стійкі до дії радіації. Напівлетальна доза для собак 2,5-4 Гр, а в мавп 2- 5,5 Гр.

У тварин променева хвороба найбільш вивчена в одомашнених ссавців і птахів. Розрізняють гостру й хронічну променево хворобу. Гостра виникає при однократному загальному опроміненні експозиційними дозами: 1,5-2,0 Гр (легкий ступінь), 2,0-4,0 Гр (середня), 4,0-6,0 Гр (важка) і понад 6,0 Гр (украї важка).

Залежно від важкості перебігу променевої хвороби. у тварин спостерігають пригноблення, погіршення апетиту, блювоту (у свиней), спрагу, поноси (можуть бути зі слизом, кров'ю), короточасне підвищення температури тіла, випадання волосся (особливо в овець), крововиливу на слизових оболонках, ослаблення серцевої діяльності, лімфопенію й лейкопенію. При вкрай важкому перебігу - хиткість ходи, м'язові судоми, понос і смерть. Видужання можливе при легкому й середньому перебігу хвороби. Хронічна променева хвороба розвивається при тривалих впливах невеликих доз загального гамма-випромінювання або при потраплянні усередину організму радіоактивних речовин. Вона супроводжується поступовим ослабленням серцевої діяльності, порушенням функцій залоз внутрішньої секреції, виснаженням, ослабленням опору інфекційним хворобам.

Лікуванню передуює вивід тварин із зараженої місцевості, видалення радіоактивних речовин із зовнішніх покривів водою миючими засобами та іншими. На початку хвороби рекомендують переливання крові або кровозамінників, внутрішньовенне введення 25-40%-го розчину глюкози з аскорбіновою кислотою. При зараженні через травний тракт - застосовують адсорбенти (водна суміш кісткового борошна або сірчаноокислого барію з йодистим калієм), при враженні через легені - відхаркувальні засоби.

При внутрішньому враженні тварин радіоактивні речовини виділяються з організму, забруднюючи зовнішнє середовище, а із продуктами харчування (молоко, м'ясо, яйця) можуть попадати в організм людини. Продукти від тварин, що піддалися променевому враженню, не використовуються в їжу або на корм тваринам, тому що можуть викликати в них променеву хворобу.

6. Токсичність радіонуклідів

Радіонукліди сильно відрізняються за токсичністю дії, тобто за здатністю завдавати променеве ушкодження. Радіотоксичність нуклідів залежить від таких основних чинників.

1. Рівень середньої енергії одного акту розпаду. Наприклад, поглинена доза від вуглецю-14 з енергією одного акту розпаду 0,053 MeV буде набагато меншою порівняно з дозою, що створюється при розпаді фосфору-32, середня енергія бета-випромінювання якого становить 0,68 MeV.

2. Вид випромінювання. Променеве ураження від джерела альфа-випромінювання буде більшим порівняно з джерелом бета-випромінювання.

3. Шляхи надходження радіонуклідів в організм людини. Найбільш небезпечним є надходження радіонукліда при вдиханні повітря.

4. Здатність радіонукліда накопичуватися в конкретних органах. За характером розподілу радіонуклідів в організмі чітко вирізняються три групи, які концентруються в кістках, у всьому тілі, у печінці. Окремо можна відзначити йод-131, до 30% якого відкладається у щитовидній залозі, яка складає тільки 0,03% маси тіла. Критичними органи, які найбільше піддаються дії радіації, є гонади, кістковий мозок, кровотворні органи.

5. Час перебування радіонукліда в організмі, що залежить від періоду

напіввиведення. За ступенем радіаційної небезпеки всі радіонукліди як потенційні джерела внутрішнього опромінення поділяються на чотири групи (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Класифікація радіонуклідів за ступенем радіаційної небезпеки

Група	Ступінь радіотоксичності	Мінімально значуща активність, мкКі	Радіонукліди
А	Дуже висока	0,1	^{210}Po , ^{226}Ra , ^{232}U , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{210}Pb
Б	Висока	1	^{90}Sr , ^{131}I , ^{224}Ra , ^{235}U
В	Середня	10	^{32}P , ^{35}Ca , ^{89}Sr , ^{137}Cs , ^{24}Na , ^{42}K , ^{60}Co
Г	Мала	100	^3H , ^{14}C , ^{55}Fe , ^{69}Zn , $^{131-136}\text{Cs}$

Радіотоксикологічні характеристики деяких радіонуклідів

Стронцій

Відомі 18 радіоізоотопів стронцію. Більшість із них короткоживучі, лише чотири радіонукліди мають період піврозпаду від 1 доби до 2 місяців і один, найпоширеніший - стронцій-90, - більше 2 років. Стронцій-90 є наявним у відходах ядерної промисловості, але основне джерело забруднення ним зовнішнього середовища – атомні вибухи й аварії на атомних реакторах. Стронцій-90 добре розчиняється у воді, тому його рухливість у ґрунті досить висока. Найбільша розчинність стронцію відзначена в ґрунтах з низьким рівнем кислотності і мінімальним вмістом обмінного кальцію, тому з таких ґрунтів стронцій легко засвоюється рослинами.

Потрапивши в шлунково-кишковий тракт, стронцій добре (на 20-70%) всмоктується у кров'яне русло. Його всмоктуваність залежить від виду, віку, фізіологічного стану й характеру харчування тварини або людини. У дорослої людини всмоктування стронцію становить 20-30%. При нестачі кальцію й білка в раціоні харчування всмоктуваність ізотопу може підвищуватися до 50-60% через те, що стронцій є хімічним аналогом кальцію і може накопичуватися замість нього.

При вдиханні розчинні сполуки стронцію швидко елімінують із легенів. Проникнення стронцію через неушкоджену шкіру становить близько 1%, через ушкоджену (різана рана, опік), як і з підшкірної клітковини й м'язової тканини, стронцій всмоктується майже повністю. Незалежно від шляху й режиму потрапляння в організм розчинні сполуки стронцію вибірково накопичуються в кістках. У м'яких тканинах затримується менше 1% стронцію-90.

Біологічна дія стронцію-90 при попаданні в організм людини або тварини обумовлюється бета-частинками, що випускаються ним самим і його дочірнім продуктом розпаду – ітрієм-90. Середній пробіг бета-частинок у тканинах тварин у стронцію-90 становить– 0,5 мм, ітрію-90 – 4 мм. У кістковій тканині через її більшу щільність порівняно з м'якими тканинами пробіг бета-частинок менший.

Накопичуючись у кістязку, стронцій-90 залишається там тривалий час, постійно опромінюючи тканини, внаслідок чого в кістковій тканині й кровотворному кістковому мозку патологічні зміни настають у значно більшому ступені, ніж в інших органах і тканинах організму. Більші дози стронцію-90 викликають променеву хворобу. При тривалому надходженні його в організм у відносно малих кількостях можуть розвинути радіаційні ураження у вигляді гальмування росту, зміни в кровотворних органах і картині крові, зниження імунологічних і захисних властивостей, гальмування вироблення антитіл при вакцинації, порушення обміну речовин.

Цезій

З 30 радіоактивних ізотопів цезію більшість є короткоживучими із секундними й хвилинними періодами піврозпаду й тільки два радіоізотопи довгоживучі - цезій-134 з періодом піврозпаду 2,06 року й цезій-132 з періодом піврозпаду близько 30 років. У навколишнє середовище цезій може надходити при ядерних вибухах і аваріях на ядерних реакторах, а також у результаті викидів радіоактивних відходів в атмосферу й водойми підприємствами ядерної промисловості, атомними електростанціями й суднами з ядерно-енергетичними установками.

Найбільшу біологічну небезпеку становить цезій-137. Це бета-випромінювач із середньою енергією бета-частинок. При його розпаді утворюється дочірній радіонуклід барій-137 з періодом піврозпаду 2,55 хвилини, який супроводжується випускненням гамма-квантів. Властивості цезію аналогічні калію. Подібно калію він активно включається в біологічний колообіг, мігрує по біологічних ланцюгах і доходить до організму людини.

Розчинність солей цезію, що випали на ґрунт при глобальних опадах, становить 80-100%. Оскільки цезій не утворює важкорозчинних сполук у широкому діапазоні кислотності, він легко доступний для рослин і накопичується в них.

В організм тварин цезій потрапляє із забрудненим кормом, водою й у меншій мірі із вдихуванням повітрям. В організмі людини всмоктуваність цезію-137 досягає 100%. Цезій накопичується в основному в м'яких тканинах, тільки 4% його відкладається в кістках. Виводиться цезій з організму з калом (10-30%) і сечею (70-90%). Період напіввиведення цезію з організму залежить від виду тварини, її віку й характеру харчування. У дорослої людини він становить близько 100 діб, у дітей до 1 року - 10-20 діб. Цезій добре переходить із організму матері до плода. Величина переходу залежить від строку вагітності й тривалості надходження радіонуклідів.

При потраплянні цезію у водойми він швидко мігрує в донні відкладення, засвоюється планктоном. Риба активно накопичує ізотопи цезію й може бути одним з основних джерел потрапляння його в організм людини.

Накопичуючись у м'яких тканинах, цезій створює внутрішнє опромінення, яке при рівноважному вмісті цезію 6,66 мкКі на рік може досягати 1 бер. Внутрішнє опромінення цезієм-137 викликає такий самий біологічний ефект, як і

зовнішнє опромінення організму при аналогічних дозах.

Йод

З 24 радіоізоотопів йоду радіаційно-гігієнічне значення має один - йод-131 з періодом піврозпаду 8,04 доби. Він є бета- і гамма-випромінювачем. Йод дуже активний елемент, добре засвоюється рослинами, водними організмами. При потраплянні в шлунково-кишковий тракт із їжею він на 100% всмоктується в кров. Основна маса йоду, що всмоктався (60-80%), вибірково накопичується у щитовидній залозі.

Вміст 0,06 мкКі йоду-131 у щитовидній залозі створює дозу опромінення в 1 бер.

У міру наростання патологічних змін у щитовидній залозі з'являється симптомокомплекс: знижується температура тіла, підвищується нервова збудливість, уповільнюється серцебиття, збільшується проникність судин.

При нагромадженні в легенях ізоотопи йоду викликають захворювання бронхітом, пневмонією. Радіоактивні ізоотопи йоду можуть індукувати пухлини в щитовидній залозі, аденогіпофізі, статевих залозах та інших органах.

Плутоній

Відомо 15 ізоотопів плутонію. Найбільш значущий із них - плутоній-239 з періодом піврозпаду 24400 років, що випромінює при розпаді альфа-частинки. Плутоній-239 є одним із найбільш радіаційно небезпечних елементів.

У зовнішнє середовище плутоній-239 потрапляє при випробуваннях ядерної зброї, аваріях на АЕС і переробці відпрацьованого ядерного палива. Спокуси плутонію в ґрунті погано розчинні, тому практично нерухомі, недоступні для кореневої системи рослин.

При поверхневому забрудненні листя рослин плутоній може потрапити в шлунково-кишковий тракт тварин, однак всмоктується він з нього погано. При вдиханні всмоктуваність, а отже, і небезпека опромінення плутонієм в 100 раз вищі, ніж при попаданні з їжею.

Плутоній-239 - це переважно джерело альфа-випромінювання з дуже високою енергією випромінювання (більше 3 МеВ). Він відкладається в скелеті, тим самим впливаючи на червоний кістковий мозок, а також у печінці і нирках. У кістковій тканині відкладається до 90%, у печінці - 7% і в нирках - 1% плутонію. Оскільки ефективний період напіввиведення $T_{\text{еф}}$ становить 100 років, плутоній впливає на організм протягом усього життя людини.

Встановлено, що 400 г плутонію достатньо, щоб викликати рак легенів у 10 млрд. людей.

Радон

Найбільшою вагою з усіх джерел природної радіації володіє радон. Це важкий газ (у 7,5 раза важчий, ніж повітря), що не має кольору, запаху і смаку. При розпаді випромінює альфа-частинки.

Радон вивільняється із земної кори повсюди. Він накопичується усередині приміщень, просочуючись через фундамент і підлогу із ґрунту або, рідше,

вивільняючись із будівельних матеріалів. Під землею радон зміщується з природним газом, який потім використовується в побутових газових плитах, і таким чином потрапляє в приміщення. Концентрація його значно збільшується за відсутності надійних витяжних систем.

Концентрація радону в закритих приміщеннях звичайно у вісім разів вища, ніж на вулиці, а на верхніх поверхах нижча, ніж на першому.

Він дає приблизно половину дози опромінення людини, що одержується від усіх природних джерел. Основна частина опромінення спричинена не самим радоном, а продуктами його розпаду.

Радон надходить до організму при диханні разом з повітрям. При кип'ятінні радон випаровується, у сирій воді його набагато більше. Основну небезпеку викликає його потрапляння в легені з водяною парою. Найчастіше це відбувається у ванній кімнаті, коли людина приймає гарячий душ.

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

Тема 4

Біологічні ефекти іонізуючих випромінювань у рослин і тварин

1. Радіобіологічні ефекти.
2. Соматичні ефекти
 - 2.1. Радіаційна стимуляція.
 - 2.2. Морфологічні зміни.
 - 2.3. Променева хвороба.
 - 2.4. Прискорення старіння і скорочення тривалості життя.
 - 2.5. Загибель.
3. Генетичні, або мутагенні, ефекти.
4. Близькі та віддалені, детерміновані та стохастичні ефекти.

1. Радіобіологічні ефекти. На теперішній час радіобіологією накопичений досить великий фактичний матеріал, який свідчить про різноманітність реакцій живих організмів у відповідь на дію іонізуючої радіації. Описані найрізноманітніші аномалії росту і розвитку різних організмів, морфологічні зміни окремих органів і організму в цілому, порушення різних фізіологічних і біохімічних реакцій, спадкові зміни, загибель та інші. Всі ці явища одержали назву радіобіологічних ефектів. Власне говорячи, це – біологічні ефекти іонізуючих випромінювань.

На початку 20-х р. німецький фізик Ф. Десауер почав досліджувати причини радіобіологічного парадокса. Він висунув гіпотезу, що ушкодження не всякої молекули шкідливе для клітини. Коли воно відбувається в особливо важливих місцях, наприклад в молекулах хромосом, це може призвести до ушкодження всієї клітини. А ушкодження багатьох клітин цілком природно уражує весь організм.

Відомо, що хромосоми складаються з великої кількості молекул дезоксирибонуклеїнової кислоти (ДНК) і що саме молекули ДНК є тими чутливими до іонізуючого випромінювання елементами клітини, так званими «мішенями», що відповідають за радіаційне ураження. Кожна з молекул ДНК є матрицею для синтезу десятків молекул рибонуклеїнової кислоти (РНК). Тому, якщо молекула ДНК дістала ушкодження своєї структури, вона передає його й молекулам РНК, а кожна молекула РНК є матрицею для синтезу десятків молекул білків, яким; також передається ушкодження. Таким чином відбувається посилення ушкодження, його множення в сотні і тисячі разів. Більш того, високоенергетичне іонізуюче випромінювання має властивість розривати не тільки зв'язки між електроном і ядром, а й будь-які хімічні зв'язки в молекулах і спричинювати тривалі реакції в клітинах, які залучають у процеси розвитку променевого ураження велику кількість інших біологічно важливих молекул, прямо не зачеплених опроміненням. Внаслідок цього загальний об'єм молекулярних ушкоджень порівняно з початковим, зумовленим безпосередньо дією випромінювання, збільшується в сотні і тисячі разів, що призводить до ослаблення контролю над окремими процесами, порушення систем обміну речовин і до різних радіобіологічних ефектів.

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

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

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

2. Соматичні ефекти

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

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

Експериментальний матеріал, одержаний в останні десятиліття з використанням нових методичних підходів, детальним обліком величини дози, типу випромінювання, індивідуальної радіочутливості об'єкту та ряду інших супутніх факторів беззаперечно довів існування ефекту радіаційної стимуляції. І в умовах звичайної радіобіологічної лабораторії можна підібрати для будь-якого виду насіння, проростків, пилку, вегетуючих рослин, мікроорганізмів, комах, лабораторних тварин та інших організмів будь-якого виду дозу рентгенівського або γ -випромінювання, при якій вдається спостерігати ефект радіаційної стимуляції в тій чи іншій формі, наприклад, прискорення росту рослин (рис. 4.1).

Ці дози варіюють в досить широких межах як для насіння, так і для проростків, що залежить не тільки від виду культури, а і від сорту і навіть партії насіння. При цьому для проростків і вегетуючих рослин вони, як правило, в декілька разів, а іноді і на порядок нижче, ніж для насіння. В табл. 4.1 із різних літературних джерел зведені значення цих доз для деяких видів рослин, що дає змогу зіставити ці величини.

Радіаційна стимуляція рослин виявляється в прискоренні проростання насіння, збільшенні енергії проростання, схожості, наступному прискоренні росту

рослин, проходженні фаз розвитку, що в цілому приводить до скорочення тривалості вегетаційного періоду, прискорення досягання рослин та збільшення їх урожайності.

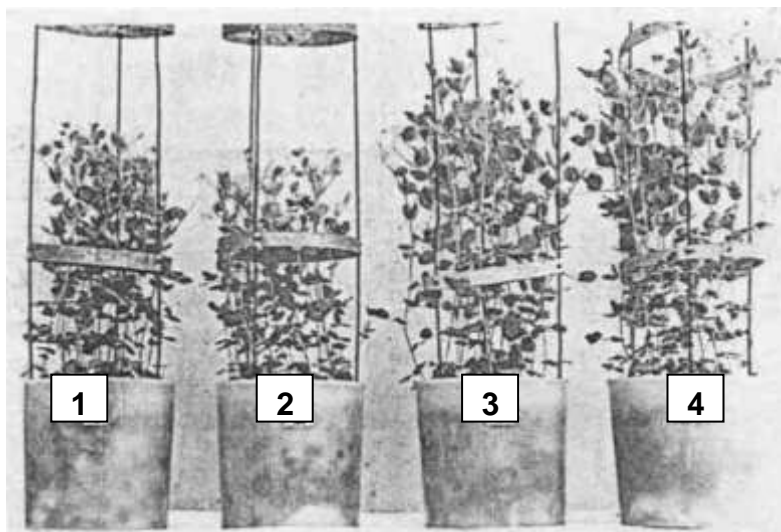


Рис. 4.1. Прискорення росту гороху після γ -опромінення насіння в стимулюючій дозі: 1 і 2 – контроль без опромінення, 3 і 4 – опромінення в дозі 3 Гр.

Таблиця 4.1.

Стимулюючі дози γ -випромінювання для насіння і проростків деяких видів рослин, Гр

Вид	Насіння	Проростки	Вид	Насіння	Проростки
Сосна	0,7–1	–	Овес	8	1–1,5
Боби	1–1,5	0,1–0,2	Пшениця	5–8	1–1,5
Горох	3–5	0,35–0,5	Жито	8–10	1,5–2
Квасоля	5–6	0,6–0,8	Помідор	5–10	0,5–1,5
Огірок	3–5	1–2	Льон	7,5–10	2–3
Кукурудза	5–10	0,5–2	Редис	10–15	3–4
Ячмінь	8–10	1–2	Ріпак	10–15	4–5

Стимулюючу дію радіації за швидкістю росту рослин реєструють, як правило, тільки протягом перших 4–6 днів (рис. 4.2, а). Ріст рослини – це відображення процесів поділу і розтягнення його клітин. Тому при стимулюючих дозах повинно спостерігатися прискорення цих процесів. Дійсно, в періоди максимальної стимуляції росту відзначається збільшення кількості мітотичних клітин у меристемах (рис. 4.2, б).

Ефект радіаційної стимуляції спостерігається не тільки при одноразовому опроміненні насінин або рослин, а й при хронічному, коли рослина опромінюється протягом всього вегетаційного періоду. Так, видатний американський радіобіолог А.Х. Сперроу із Брукхейвенської національної лабораторії у США, спостерігав в умовах гамма-поля стимуляцію росту рослин ротиків (левова паща) при потужності дози 2,3–2,85 Гр/доб. Потужність досить висока. Не дивно, що при трохи більшій – 3,3–4 Гр/доб – відмічалось пригнічення росту.

Група російських дослідників під керівництвом Л.П. Бреславець при опроміненні рослин кукурудзи і гречки протягом всього вегетаційного періоду спостерігали стимулюючий ефект при значно меншій потужності випромінювання – лише 0,00019–0,025 Гр/доб.

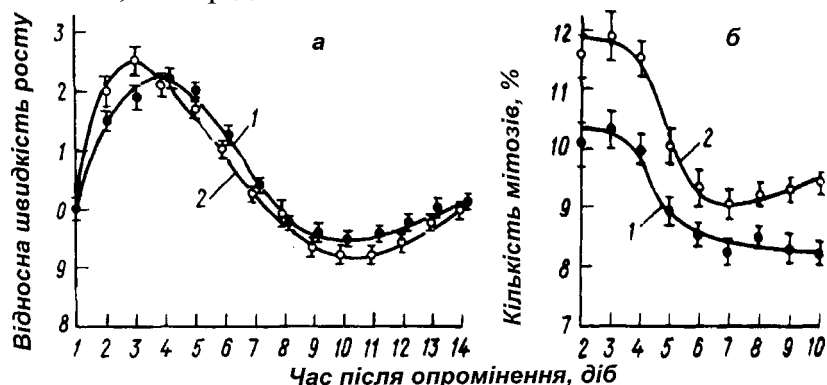


Рис. 4.2. Вплив γ -опромінення проростків гороху (1) і кукурудзи (2) в стимулюючих дозах (відповідно, 0,35 і 0,5 Гр) на відносну швидкість росту коренів (а) і мітотичну активність клітин їх меристем (б).

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

Які ж механізми ефекту радіаційної стимуляції у рослин, чому під впливом малих доз іонізуючої радіації їх клітини швидше діляться, зумовлюючи в подальшому прискорення росту і розвитку рослин? На жаль, дати однозначну відповідь на це питання непросто. Радіобіологи, які вивчали радіаційну стимуляцію на молекулярно-біохімічному рівні, показали, що опромінення рослин веде до активації багатьох процесів обміну: посилюється синтез нуклеїнових кислот, білків, гормонів, підвищується активність деяких ферментних систем, посилюється надходження в рослини елементів живлення, підвищується інтенсивність фотосинтетичного фосфорилування і відповідно фотосинтезу та багатьох інших. Але все це наслідок. Що ж первинне?

Ефект стимуляції зовсім не є якоюсь унікальною властивістю іонізуючої радіації. І за допомогою деяких інших як фізичних, так і хімічних чинників можна індукувати прискорення ростових процесів. В рослині існує дуже чутливий до всякого роду факторів фітогормональний комплекс речовин-активаторів і інгібіторів росту, зміна вмісту яких або зміна співвідношення між якими може приводити до стимуляції або гальмування ростових процесів. І вплив на ріст рослин пов'язаний в першу чергу з впливом на цей комплекс. Іонізуюча радіація в цьому відношенні не є винятком. Доведено, що під впливом стимулюючих доз в рослинах збільшується вміст фітогормонів-активаторів росту – ауксинів,

гіберелінів і цитокінінів, які зумовлюють активацію метаболічних процесів, що зрештою приводить до прискорення росту і розвитку рослин. Посилення ж активності фітогормональної системи є, на думку О.М. Кузина (1977), результатом неспецифічної дерепресії і активації під впливом іонізуючої радіації певної групи генів.

В останні роки в радіобіологічній літературі все частіше став з'являтися новий термін "радіаційний гормезис", яким позначається не що інше, як радіаційна стимуляція. Акцентування уваги в позначенні ефекту на стані гормональної системи (термін "гормезис" утворений від слова "гормон") вказує на те, що саме змінам в роботі цієї ланки метаболізму під впливом малих доз іонізуючої радіації приділяється головна роль.

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

Найбільш цікавими слід вважати досить чисельні дослідження з опромінення у стимулюючих дозах курячих яєць, курчат і курей. Показано, що опромінення яєць до інкубації в дозах від 0,01 до 0,05 Гр веде до помітного збільшення виводжування курчат, зменшення відходу курчат в подальшому, прискорення на 10–12 днів початку періоду яйцenessності, збільшення яйцenessності в цілому. Опромінення курчат в дозах до 0,25 Гр приводить до збільшення їх виживання, прискорення процесів росту, статевого дозрівання, початку яйцекладки. Опромінення дорослих курей в дозі 0,05 Гр за даними деяких дослідників веде до збільшення яйцenessності на 18%.

Численні дані, одержані при роботі з лабораторними щурами, мишами, морськими свинками, свідчать про те, що при малих дозах у ссавців також спостерігаються прискорення росту, збільшення абсолютної маси тіла, підвищення плодючості.

При опроміненні ікри риби спостерігається прискорення розвитку ембріонів, а при опроміненні мальків — активізація росту й розвитку.

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

Більш визначені результати по стимуляції плодючості під впливом опромінення у малих дозах були отримані в експериментах зі спермою риби, ікрою та личинками. На великому матеріалі показана стимуляція розвитку ембріонів прісноводних риб, культивованих в умовах γ -опромінення: личинки накльовувались на 9–11 днів раніше, ніж в контролі. Стимулюючі дози для деяких тварин наведені в табл. 4.2.

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

Таблиця 4.2.

Стимулюючі дози γ - або рентгенівського опромінення для тварин, Гр

Організм	Доза	Організм	Доза
Яйця курячі	0,01–0,05	Поросята	0,1–0,25
Курчата	0,05	Лабораторні щури	0,1–0,5
Кури	0,05–1	Лабораторні миші	0,2–0,4
Ікра риби	0,1–0,5	Комахи	10–45
Сперма риби	0,25–0,5	Найпростіші	5–2000
Личинки риб	0,1–0,5	Клітини людини в культурі	0,05–0,1
Ягнята	0,1		

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

Завершуючи питання про радіаційну стимуляцію, варто відзначити, що не дивлячись на досить великий експериментальний матеріал, який однозначно доводить існування цього явища, далеко не всі радіобіологи вважають його достатньо очевидним. Деякі, враховуючи незадовільну відтворюваність результатів стимулюючого ефекту, відсутність достатньо аргументованих пояснень його механізмів, ставлять під сумнів його існування, розцінюючи це явище як артефакт. Інші вважають, що при опроміненні в малих дозах не відбувається прямого стимулювання, а ефекти, які спостерігаються, є результатом певних пошкоджень і подальшої ініціації процесів, які мають компенсаторний характер.

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

2.2. Морфологічні зміни. Морфологічні зміни – це зміни під впливом іонізуючого випромінювання зовнішнього вигляду організму, окремих його органів, анатомічної структури – ознак, що відрізняють його від батьківських форм. Говорячи про морфологічні зміни організму під впливом іонізуючих випромінювань, слід виключити явища, пов'язані зі зміною його загальних розмірів

і впливом на темпи розвитку. В даному випадку слід розуміти перш за все відхилення від характерних ознак, властивих тому чи іншому виду, роду, породи, сорту. Але ознаки ці не спадкові, це – відхилення від норми, спотворення, які мають місце тільки в поколінні опромінених організмів.

Морфологічні зміни рослин. У вивченні радіобіологічних ефектів у рослин важливе місце займає опис дуже різноманітних морфологічних аномалій. В табл. 4.3 наведені дані про морфологічні зміни окремих органів рослин, що виникають під дією іонізуючої радіації. Поява переважної більшості з них пояснюється виникненням в рослинах химерності – спотворень, які є наслідком зміни схеми просторового розподілу клітин в опромінених органах, наприклад, появи клітин зі сповільненою швидкістю поділу, з абераціями хромосом, випадання декількох клітинних рядів внаслідок загибелі окремих ініціальних клітин, або індукцією до поділу клітин у тканинах і органах, що знаходились у стані спокою, та багатьох інших порушень. Саме цими причинами можна пояснити зміну форми органу, перерізу, скручуваність, зморшкуватість, дихотомію, фасціації та інші відхилення від норми. Такі рослини з усіма підставами можна назвати «радіаційними химерами». І саме за допомогою опромінення насіння і проростків іонізуючою радіацією були одержані перші індуковані химери у рослин.

Особливо характерні морфологічні для листя: збільшення або зменшення розмірів і кількості, зміна форми, скручуваність, зморшкуватість, порушення жилкування, асиметричність, потовщення, зрощення листових пластинок та розсічення листка на частини, зміна кольору, мозаїчність, утворення пухлин, некротичних плям, втрата листової пластинки та ін. Багато з цих ознак можуть виникати і в стеблі, корінні, квітках, плодах, насінні, хоча у них через специфіку будови можуть з'являтися й зовсім нові зміни: у стебла — порушення філотаксису (порядку розміщення листків), поява аеральних (повітряних) коренів; у кореня — загибель головного кореня, опушування зони росту, відсутність бічних коренів; у квітів — зменшення або збільшення кількості квіток у суцвітті та ін.

Найрізноманітніші морфологічні зміни рослин спостерігалися в зоні аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 р. У 1987 р. і в наступні роки вони залишились переважно у хвойних рослин, що змінюють хвою раз на кілька ро-ків, а також на багаторічних органах, передусім на гілках.

Таблиця 4.3.

Типи морфологічних змін органів рослин при дії іонізуючих випромінювань

Орган	Морфологічні зміни
Листок	Збільшення або зменшення розмірів та кількості
	Зміна форми
	Скручуваність
	Зморшкуватість
	Порушення жилкування
	Асиметричність
	Потовщення
	Зростання листових пластинок
	Фасціації

	Пухлини
	Поява некротичних плям
	Втрата листової пластинки
Стебло	Прискорення або пригнічення росту
	Порушення філотаксису (порядку листкорозміщення)
	Зміна кольору
	Зняття апікального домінування
	Дихотомія
	Фасціації
	Зміна перерізу
	Пухлини
	Поява аеральних плям
Корінь	Прискорення або пригнічення росту
	Розщеплення головного кореня
	Загибель головного кореня
	Опушеність зони меристеми
	Відсутність бокових коренів
	Утворення вторинного головного кореня
	Пухлини
	Скручуваність
	Порушення геотропізму
Квітки	Прискорення або затримка цвітіння
	Зміна кольору
	Зменшення або збільшення кількості
	Зміна форми
	Зміна кольору
	Опадання квітів та суцвіть
	Пухлини
	Стерильність
Плоди	Прискорення або затримка досягання
	Зміна кольору
	Збільшення або зменшення розмірів
	Зміна форми
	Опушеність
	Передчасне опадання
Насіння	Збільшення або зменшення розмірів та кількості
	Зміна форми
	Зміна кольору
	Зморшкуватість
	Стерильність

Ці аномалії є проявом гіперфункції клітин і тканин, які залишились не пошкодженими або пошкодженими в меншій мірі, ніж решта; наслідком компенсаторних механізмів, які включаються в дію при втраті функції у частини органів. Так, загибель верхівкової бруньки, що активно ділиться, і зняття апікального домінування веде до пробудження пазушних бруньок, які перебувають в стані спокою і тому мають більш високу радіостійкість. Вони утворюють у опромінених рослин додаткові пагони, листки і квітки. Збільшення розмірів плодів може бути наслідком стерильності частини квітів і зменшення кількості плодів, що

зав'язалися. Нерідко при повному опаданні квітів і суцвіть чи їх стерильності рослини, формуючи дуже великі органи за рахунок перерозподілу поживних речовин, накопичують вегетативну масу вдвічі більшу, ніж неопромінені.

Внаслідок радіаційного ураження на листі, стеблах, коренях, квітках та інших органах рослин можуть з'являтися пухлиновидні нарости (рис. 4.3). В нормі у рослин пухлино подібний ріст спостерігається рідко, хоча і відомі факти його індукування нематодами, комахами, деякими видами бактерій і вірусів.

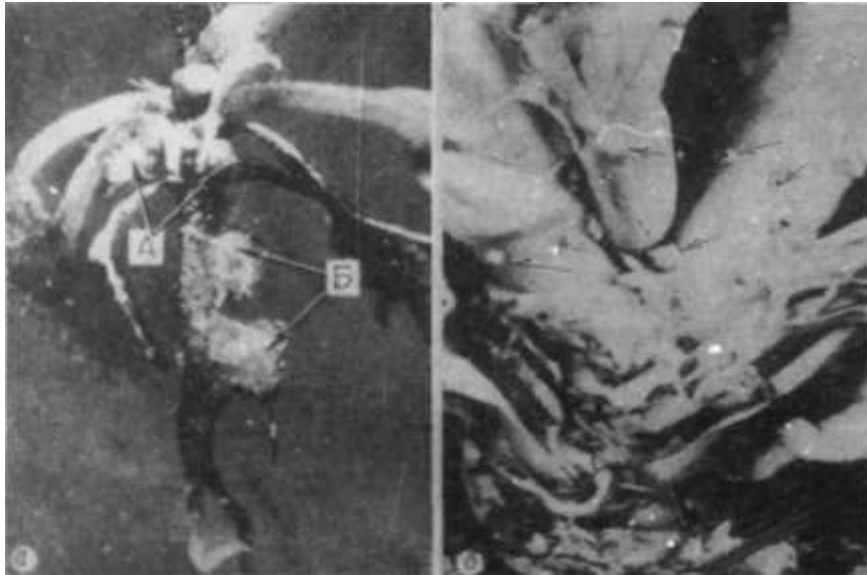


Рис. 4.3. Виникнення пухлин на опроміненних рослинах – на епікотилі (А) та гіпокотилі (Б) різушки Таля під дією рентгенівського опромінення (Я. Хіроно та ін., 1968); б – на стеблі салата-латука під дією γ -опромінення (Д. Бенкс і А.Х. Сперроу, 1969).

Найрізноманітніші морфологічні зміни у рослин доводилось спостерігати в зоні аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 р. (рис. 4.4).



Рис. 4.4. Аномальні пагони сосни (а,б) і ялини (в–є), що сформувалися в 1986–1987 рр. в зоні аварії на Чорнобильській АЕС (Г.М. Козубов, А.І. Таскаєв, 1990; Д.М. Гродзинський та ін., 1991).

В 1987 р. та в наступні роки їх кількість значно зменшилась і вони залишилися переважно у хвойних рослин, що змінюють хвою раз на декілька років, а також на багаторічних органах, зокрема на гіллі.

Втім вони виникали у рослин, що були висаджені вже після аварії на місцях

з високим рівнем радіонуклідного забруднення. При цьому вони мали дещо інший характер. Найбільш розповсюдженим стало зняття апікального домінування – загибель верхівки, що призводить до неприродного розгалуження і виникненню кущоподібних форм дерев, оголення стовбура і верхівок дерев, викривлення стовбура, поява гілок з жовтою (безхлорофільною) і абсолютно білою (депігментованою) хвоєю (рис. 4.5).

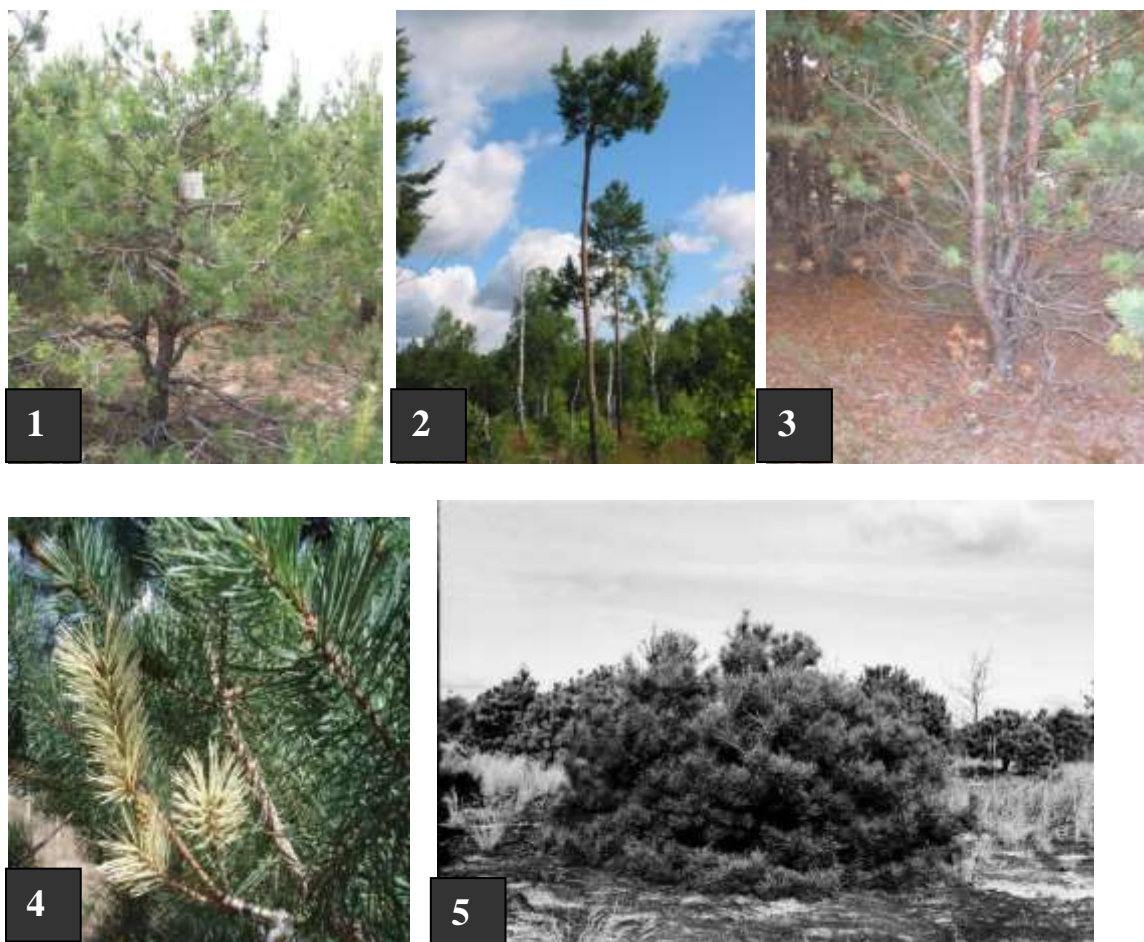


Рис. 4.5. Морфологічні зміни у сосни, висадженої в зоні відчуження Чорнобильської АЕС після аварії: 1 і 5 – кущоподібна форма дерева, 2 – оголення стовбура, 3 – викривлення і розгалуження стовбура, 4 – депігментована хвоя.

Різноманітні форми колосся – справжні виродки можна було знайти серед самосіву пшениці, не зібраної восени 1986 р. (рис. 4.6).

Морфологічні зміни тварин. В радіобіології тварин цей тип радіобіологічних ефектів, як правило, не виділяється. Хоча різні зміни окремих органів і тканин тваринного організму, що розвиваються в різні строки після опромінення, описані досить повно. Так, при опроміненні тварин в стадії ембріогенезу або в ранньому постембріональному віці можуть спостерігатися порушення росту кісток, диспропорції в розвитку окремих органів, в цілому порушення росту і розвитку, що в кінцевому результаті приводить до виникнення різних спотворень (рис. 4.7). Опромінення дорослих особин може викликати появу всіяких виразок з подальшим утворенням на їх місці рубців, пігментацію і депігментацію шкіри та волосяного покриву, припинення росту і випадання

останнього.

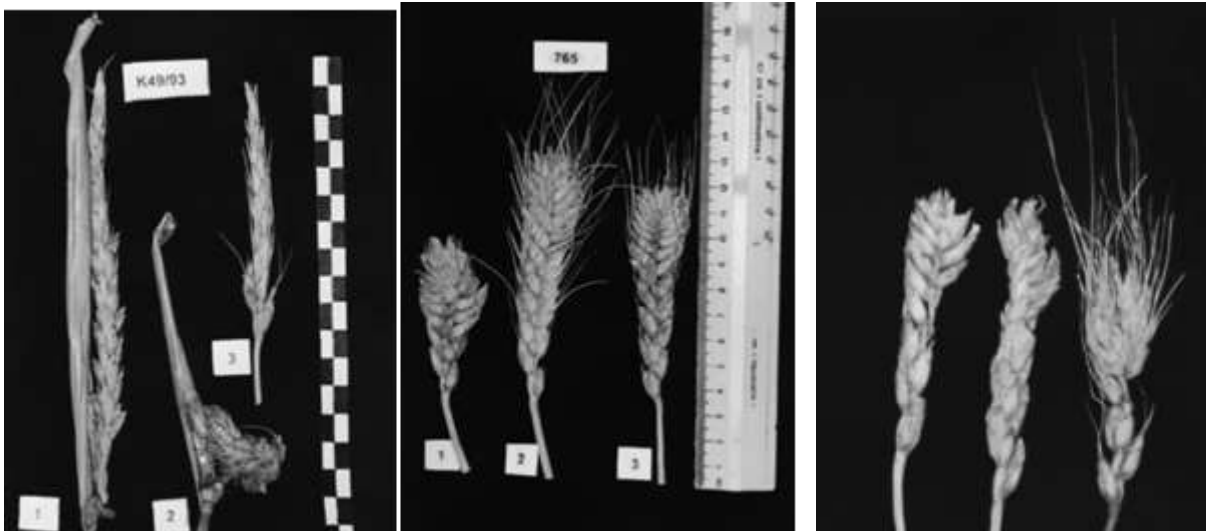


Рис. 4.6. Морфологічні зміни колосу пшениці сорту Миронівська 808 в зоні відчуження Чорнобильської АЕС, знайдені серед самосіву влітку 1987 р. (М.І. Кузьменко, 2013).

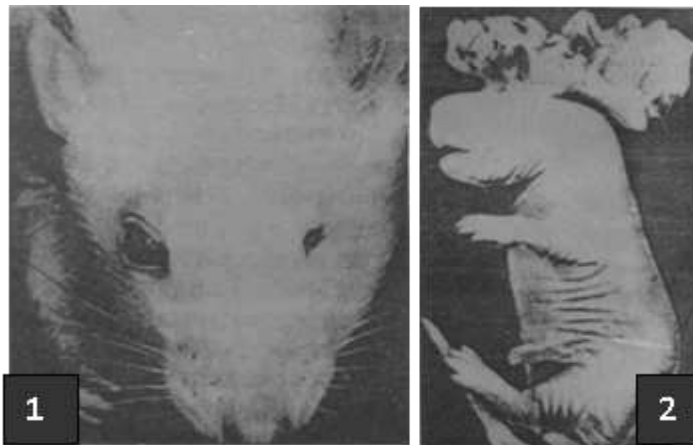


Рис. 4.7. Морфологічні зміни у тварин під впливом γ випромінювання: 1 мікрофтальмія лівого ока у щура (праве око нормальне) і 2 – мозкова грижа у миші; в обох випадках опромінення проведено на 9-й день ембріогенезу (П. Шварц, 1963; Д. Раф, 1990).

Описано багато інших ефектів, які змінюють характерний вигляд тварин: припинення росту рогових утворень і їх відшарування, виникнення катаракт, що одержали назву променевих, зміни розмірів і форми окремих органів, різні ступені дистрофії і багато інших. Як і у рослин, до цього типу ефектів опромінення належить і виникнення під впливом радіації пухлин на різних органах.

Як у рослин, у тварин морфологічні зміни виникають за рахунок радіаційного ураження тканин, клітини яких знаходяться у стані активного поділу, тобто мають високу радіочутливість. Саме нерівномірне ураження клітин в таких тканинах призводить до диспропорцій у рості, випаданню окремих ділянок твірних тканин з процесів росту, виникненню у них мутацій та інших пошкоджень, які і призводять до аномалій розвитку.

2.3. Променева хвороба. Під променевою, або радіаційною, хворобою розуміють характерний комплекс проявів уражуючої дії іонізуючих випромінювань

на організм. Крім величини дози, різноманітність цих, як правило, неспецифічних реакцій залежить від багатьох факторів: способу опромінення – загальне чи локальне, зовнішнє чи внутрішнє; виду опромінення – одноразове, фракціоноване, гостре, хронічне; просторового фактору – рівномірне чи нерівномірне; від радіочутливості організму та інших.

Променеву хворобу рослин дуже важко охарактеризувати якоюсь сукупністю специфічних ознак. Безумовно, описані в попередньому питанні морфологічні зміни також можна віднести до ознак променевої хвороби. Але в даному пункті увага буде акцентована на таких ознаках, як гальмування поділу клітки, затримання росту і розвитку, порушення різних фізіолого-біохімічних реакцій.

Гальмування поділу клітин меристематичних тканин – це перший, поряд з деякими швидко наступаючими біохімічними порушеннями ефект, що виявляється після опромінення рослин. По затримці вступу клітин в чергову фазу мітотичного циклу його можна зареєструвати раніше, ніж появу цитогенетичних пошкоджень. Настання затримки поділу залежить від видової радіочутливості і від дози опромінення. У кінських бобів і гороху, наприклад, її вдається зареєструвати вже через декілька годин після γ - опромінення в дозі 0,5–2 Гр.

Прямим наслідком затримки клітинного поділу є гальмування росту рослини або окремих її органів. Це перший показник уражуючої дії випромінювань на рослину, який можна виявити візуально. Але, звичайно, як і інгібування клітинного поділу, гальмування росту є вторинною реакцією організму на опромінення.

Безумовно, від впливом іонізуючої радіації в рослині змінюється обмін речовин, у зв'язку з чим порушується багато біосинтетичних процесів. Але різноманітні порушення метаболізму, що призводять до променевої хвороби, в переважній більшості випадків неможливо звести до однієї причини. Є всі підстави вважати, що порушення метаболізму, які звичайно виявляються на рівні тканин, органів і цілого організму, відображають або пряму дію радіації на диференційовані тканини, або опосередковану дію через пошкодження клітин меристем, які продукують аномальні тканини. Перший ефект звичайно досягається при більших дозах випромінювань, ніж другий. Обидва вони відрізняються також за часом прояву у післярадіаційний період.

Порушення обміну речовин у рослин, які вирости з опроміненого насіння, може проявлятися тільки з розвитком проростків через значний проміжок часу після опромінення. Безсумнівно, воно віддзеркалює первинно виникаючі пошкодження клітин зародка. У цьому випадку викривлення метаболізму буває зумовлене накопиченням соматичних мутацій і порушеннями морфологічної та тканинної структури окремих органів рослини.

Біохімічні зміни при опроміненні вегетуючих рослин можуть бути зумовлені пошкодженням ферментативних систем і окремих органел диференційованих клітин, порушенням регуляторних зв'язків, які визначають супідрядність окремих органів, і в певній мірі, порушенням діяльності твірних тканин. Такі зміни

проявляються вже через декілька годин після опромінення. Пошкодження апікальних меристем при цьому відіграє вирішальну роль у порушенні зв'язків не тільки між окремими групами клітин і тканин, але і між окремими органами.

При дозах, близьких до півлетальних (для бобових культур 4–12 Гр) ці порушення реєструються значно швидше, і у частини рослин вже через добу можна спостерігати практично повне припинення поділу клітин та ростових процесів. Проте протягом ще довгого періоду можуть підтримуватися процеси фотосинтезу, дихання, мінерального та водного обміну.

При променевої хворобі рослин підвищується їх чутливість до інфекційних хвороб, знижується стійкість до несприятливих чинників, зменшується потреба в елементах живлення, послаблюється відтворювальна здатність, зменшується продуктивність.

Існує думка, що уражені променевою хворобою рослини не можна використовувати в їжу чи для годівлі тварин, так як вони, нібито, якщо і не можуть викликати променевою хворобу у людини та тварини, можуть, в усякому разі, призвести до певних ушкоджень організму. Це думка цілком хибна і ні на чому не базується. Зараз відомі і широко застосовуються десятки технологій радіаційної дезінфекції, дезінсекції, пастеризації, консервації продукції рослинництва та тваринництва, в основі яких лежить її опромінення іонізуючою радіацією у великих дозах. Найретельніші медико-гігієнічні дослідження опромінених продуктів показали їх повну нешкідливість.

Променева хвороба тварин – це захворювання, яке виникає при дії іонізуючих випромінювань і характеризується конкретним комплексом ознак свого прояву в часі. Найбільш повно вивчена променева хвороба у одомашнених ссавців, в тому числі і у сільськогосподарських тварин. Розрізняють її гостру та хронічну форми.

Гостра променева хвороба виникає при одноразовому звичайно загальному опроміненні у великій дозі. По тяжкості захворювання розрізняють чотири її ступені: перший – легка променева хвороба, наприклад, у свиней виникає при дозах 1–2 Гр, другий – середньої тяжкості розвивається при дозах 2–4 Гр, третій – тяжка – при дозах 4–6 Гр і четвертий – дуже тяжка, або надтяжка, спостерігається при дозах вищих за 6 Гр. Для більш радіочутливих видів тварин, наприклад, великої рогатої худоби, ці форми променевої хвороби спостерігаються в діапазоні доз, що зсунутий у бік менших величин – 0,5–5 Гр; для більш радіостійких, наприклад, кролів, навпаки, в бік більших – 6–12 Гр.

В розвитку гострої форми променевої хвороби виділяють чотири періоди або фази.

Перший – період первинних реакцій може виявлятися вже через кілька годин, навіть півгодини, 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 тварин, порушується ритм роботи серця, з'являється задишка, понос,

блювання, може підвищитися температура тіла. У периферійній крові вже на першу добу після опромінення спостерігається нейтрофільний лейкоцитоз, абсолютна та відносна лімфопенія, збільшення кількості ретикулоцитів. На кінець періоду у стані тварини відмічається суб'єктивні покращення.

Другий період – латентний (прихований), або фаза удаваного клінічного благополуччя, в залежності від тяжкості хвороби триває від декількох діб до двох тижнів та більше. Чим вище одержана доза, або ж чим тяжча форма променевої хвороби, тим він коротший. При дуже тяжкій формі променевої хвороби цей період взагалі може бути відсутнім. Стан тварин в цей період розвитку хвороби може здаватися зовсім задовільним. Однак удаваність цього благополуччя легко виявляється при аналізі крові: виявляється чітка лімфопенія, тромбоцитопенія, зниження кількості нейтрофілів та ретикулоцитів. У кістковому мозку відмічається яскраво виявлена аплазія. В кінці періоду можуть відмічатися крововиливи на слизових оболонках, порушення функцій шлунково-кишкового тракту, бронхіти, пневмонії, випадання шерсті. В кістковому мозку в другій половині періоду при легкій та середній формах хвороби з'являються ознаки регенерації.

Третій період – розпал хвороби, період виявлення клінічних ознак гострої променевої хвороби, який в залежності від її ступеня проявляється через 1–4 тижні. Знову загальний стан тварин різко погіршується: з'являється задишка, погіршується функціонування серцево-судинної системи, органів травлення, спостерігається втрата апетиту, поноси, дистрофічні процеси в слизовій оболонці рота, зниження масі тіла, може виникати короткочасна лихоманка, що періодично повторюється, підвищується температура тіла. Характерною ознакою цього періоду є геморагічний синдром – крововиливи під шкіру, слизові оболонки, шлунково-кишковий тракт, мозок, серце, легені та інші органи.

З залежності від одержаної дози та індивідуальної чутливості до опромінення тварин третій період триває від 1 до 3–4 тижнів. Наприкінці його з'являється прогресуюча анемія. При опроміненні у півлетальних дозах у половини тварин у кістковому мозку та лімфатичних вузлах спостерігається повна аплазія, що призводить до загибелі. У другій половині в цих органах відмічаються ознаки регенерації та перехід хвороби через 1–1,5 місяці в четвертий період.

Четвертий період – період відновлення при легкому ступені гострої променевої хвороби проходить досить швидко і, як вважається, в повній мірі. Він характеризується покращенням загального стану тварин, відновленням апетиту, нормалізацією температури. Зникає кровоточивість, диспептичні явища, як наслідок відміченої вище регенерації в кістковому мозку відбувається поступове відновлення показників крові.

При **середній тяжкості** хвороби тривалість періоду відновлення досягає 2–2,5 місяці і в цілому одужання завершується через 3–6 місяців.

При **тяжкій формі хвороби** період відновлення може затягуватись до 7–9 місяців. Більш того, повного видужування тварин, як правило, не відбувається: відмічається зниження імунітету, послаблення відтворювальної здатності, можливе

скорочення тривалості життя, нерідко гостра форма променевої хвороби переходить у хронічну.

Дуже тяжкий ступінь гострої променевої хвороби у великих сільськогосподарських тварин триває від кількох днів до кількох тижнів і, звичайно, завершується загибеллю в першому або третьому періоді. При опроміненні в дозах, що перевищують летальні, рання смерть може настати вже через 2–4 доби. А при дозах, вищих за летальні в два-три рази, загибель може настати під час опромінення або в найближчі години після нього – так звана "смерть під променем". Причиною загибелі тварин є киснева недостатність, що розвивається внаслідок зменшення кількості гемоглобіну в крові та розвитку токсемії, набряку легенів (рис. 4.8).



Рис. 4.8. Корова, хвора на тяжку форму гострої променевої хвороби, у стані агонії.

При середньому і тяжкому ступені гострої променевої хвороби тварин загибель, як правило, відбувається в третьому періоді. Головною її причиною звичайно є описані вище геморагічні явища, дистрофічні процеси. Більш детально характерні ознаки гострої променевої хвороби сільськогосподарських тварин наведені в табл. 4.4.

Хронічна променева хвороба тварин розвивається внаслідок тривалого, як правило, загального опромінення організму у малих дозах іонізуючої радіації або надходження всередину організму радіоактивних речовин. Розрізняють три форми хронічної променевої хвороби: легку, середню та тяжку. Як і в гострій формі променевої хвороби, у неї виділяють періодичність протікання.

Легкий ступінь хронічної променевої хвороби, що проявляється при опроміненні в порівняно невеликих дозах і протягом нетривалого періоду, характеризується звичайно функціональними порушеннями переважно

нервоворефлекторного характеру. Після припинення опромінення вони можуть швидко минати.

Таблиця 4.4.

Характерні ознаки гострої променевої хвороби тварин (В.О. Кіршин 1986)

Показники	Ступінь тяжкості променевої хвороби			
	легкий	середній	тяжкий	надтяжкий
Тривалість первинних реакцій(перший період), доби	Немає або декілька годин	До 1	2–3	Більше 3
Тривалість латентного періоду (другий період), доби	2–7	10–15	8–12	5–10
Тривалість періоду розпалу хвороби (третій період), доби	5–10	10–20	10–30	5–20
Загальний стан тварин	Незначне пригнічення	Помітне пригнічення	Пригнічення, слабкість, хиткість ходи	Сильне пригнічення, хиткість ходи
Температура тіла, °С	Без змін або підвищена на 0,3–0,5	Без змін або підвищена на 0,5–0,7	Підвищення на 0,3–1	Підвищення на 0,5–1,5
Органи травлення	Без помітних змін	Розрідження калу	Понос	Понос з домішками слизу і крові
Удій	Без змін	Зменшення на 20–50%	Зменшення на 50–80%	Відсутність
Шерстяний покрив	Без помітних змін	У овець випадіння шерсті	У овець облісіння за винятком лицевої частини голови та нижньої частини кінцівок	
Органи дихання	Легка задишка	Задишка, стікання з носа	Задишка, хрипи, стікання з носа	Ознаки вираженої бронхопневмонії
Кількість лейкоцитів	Зменшення на 30–40%	Зменшення на 50–60%	Зменшення на 50–75%	Зменшення на 75–90%
Кількість лімфоцитів	Зменшення на 30–40%	Зменшення на 30–50%	Зменшення на 50–80%	Зменшення на 70–90%
Кількість тромбоцитів	Зменшення на 5–15%	Зменшення на 5–25%	Зменшення на 40–50%	Зменшення на 40–60%
Кількість еритроцитів	Без змін	Зменшення на 10–20%	Зменшення на 15–20%	Зменшення на 20–30%
Прогноз	Благоприємний	Загибель до 20% тварин	Загибель до 20–60% тварин	Загибель до 95–100% тварин

Для середнього ступеня хвороби властиві порушення регуляторних систем, функціональна недостатність органів травлення, нервової, серцево-судинної систем і, особливо, крові. Але після припинення опромінення також настає відновлення,

яке характеризується репаративними та регенеративними процесами в найбільш уразливих критичних тканинах, і також нормалізацією функціональних порушень, іноді з тим чи іншим ступенем їх недостатності.

Тяжкий ступінь хронічної променевої хвороби, який спостерігається при тривалому опроміненні, характеризується глибокими морфологічними порушеннями деструктивного порядку в органах кровотворення, шлунково-кишковому тракті, нервовій та інших системах. Порушуються функції залоз внутрішньої секреції, поступово послаблюється діяльність серця, розвивається виснаження, послабленням опору інфекційним хворобам.

При надходженні радіоактивних речовин всередину організму тварин хронічна променева хвороба часто буває зумовлена тривалим локальним опроміненням окремих органів та систем, викликаним вибірковою розподілом їх в тілі та накопиченням в окремих органах. Так, ^{90}Sr накопичується в основному у кістяку, піддаючи опроміненню червоний кістковий мозок – основний кровотворний орган тварин, який має надзвичайно високу чутливість до іонізуючої радіації.

Не треба підкреслювати, що променева хвороба людини усіх форм характеризується проявом таких самих ознак і протікає цілком аналогічно.

Зрештою, хоча ознаки променевої хвороби тварин описуються специфічною симптоматикою, здебільш не зрівняною з такою для променевої хвороби рослин, первинні причини, що лежать в основі цього типу радіобіологічного ефекту, спільні і для рослин і для тварин.

2.4. Прискорення старіння і скорочення тривалості життя. Цей радіобіологічний ефект є також універсальним для живих організмів найрізноманітніших систематичних груп. Існує пряма кількісна залежність між ступенем скорочення тривалості життя і дозою іонізуючого випромінювання (рис. 4.9). Хоча, як вважають геронтологи, прискорення старіння і скорочення тривалості життя не обов'язково повинні бути обов'язково пов'язаними явищами або наслідком один одного. Так, зменшення тривалості життя може бути наслідком променевої хвороби, індукції лейкозів, пухлин, зниження імунітету та інших уражень, але ні в якій мірі не зв'язане з механізмом справжнього старіння.

У класичному розумінні старіння – це закономірний руйнуючий процес вікових змін організму, який веде до зниження його адаптаційних можливостей і збільшення імовірності смерті. Старіння властиве всім живим організмам і протікає на всіх рівнях організації живого – від молекулярного до генетичного й популяційного.

На молекулярному рівні характерними особливостями старіння є такі: незворотні порушення ДНК, нерівномірні зміни в синтезі РНК і білків різних класів, зміни у передачі спадкової інформації, порушення в утворенні, транспорті та використанні енергії, зниження активності систем антиоксидантів, мікросомального окислення, інтенсивності процесів синтезу медіаторів та

гормонів.

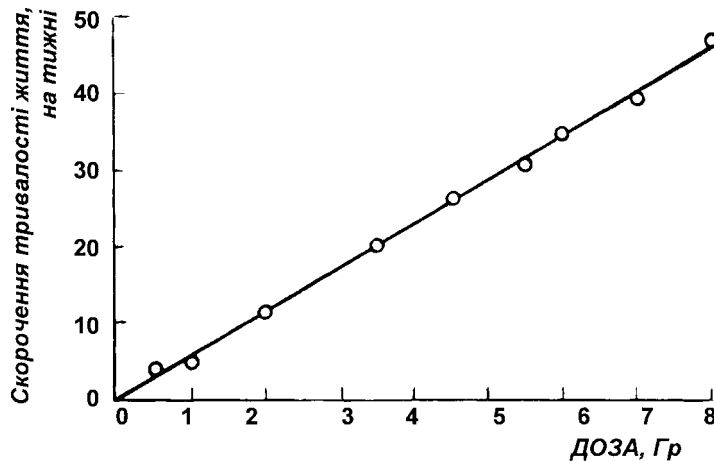


Рис. 4.9. Скорочення тривалості життя мишей як функція дози γ -опромінення (Д. Розенблат, Л. Ліндон, 1961).

Провідними ознаками старіння на клітинному рівні є зменшення числа мітохондрій в клітинах, руйнування лізосом, зміна електричних властивостей мембран, дегідратація колоїдів протоплазми, зниження лабільності клітин та їх реакцій на дію фізіологічно активних речовин та інші. Все це веде до зниження швидкості клітинного поділу, дегідратації і загибелі частини клітин, клітинному спустошенню твірних тканин.

Старіння вищих тварин на рівні цілісного організму проявляється в послабленні функцій основних фізіологічних систем організму (нервової, ендокринної, серцево-судинної, травлення та інших), зниженні контролю над їх діяльністю, зміни реактивності до дії гормонів, порушеннях на стадії надходження інформації в нервові центри.

Старіння рослин хоча і має певну специфіку у прояві ознак старіння, особливо помітну на організменому рівні, в цілому також характеризується послабленням функцій основних фізіологічних систем (фотосинтезу, дихання, транспорту елементів живлення та окремих метаболітів, водообміну та інших), розладом систем регуляції.

Практично всі перераховані процеси, як на молекулярному, так і клітинному та організменому рівнях є предметами пильної уваги радіобіології, так як всі вони реагують на опромінення іонізуючою радіацією і при високих дозах пригнічуються нею. Саме це і прискорює процеси природного старіння організму.

2.5. Загибель. За високих доз опромінення, коли видужування від променевої хвороби неможливе, настає загибель, або смерть, організму – припинення його життєдіяльності як відокремленої цілісної системи.

Смерть теплокровних тварин, якими є більшість видів сільськогосподарських тварин, зумовлена перш за все припиненням дихання і кровообігу. Звичайно виділяють два основні етапи смерті, або навіть два види смерті, – клінічну і біологічну, або справжню. По закінченні періоду клінічної смерті, у котрий ще можливе повноцінне відновлення життєвих функцій, настає

біологічна смерть – необоротне припинення фізіологічних процесів практично в усіх клітинах і тканинах організму.

Завдяки тому, що у багатьох видів рослин старіння органів проходить неодноразово і в зв'язку зі здатністю у багатьох з них до новоутворень окремих органів, точна оцінка моменту загибелі рослини, на відміну від тварини, досить утруднена. Більш того, багатоклітинні рослини складаються з клітин і тканин, які в значній мірі, часом в сотні разів, відрізняються по радіочутливості і, як наслідок, втрачають здатність до виконання своїх функцій за різних рівнів радіаційного пошкодження. Це також ускладнює оцінку їх виживання, в усякому разі у достатньо близький післярадіаційний період.

Так, наприклад, стійкість до опромінення диференційованих клітин листка звичайно в десятки разів перевищує радіостійкість клітин його меристем. Тому при опроміненні останні можуть загинути, але диференційовані зберігають здатність до деяких функцій, наприклад, фотосинтезу, дихання, мінерального і водного обміну, в зв'язку з чим протягом тижнів–місяців часто-густо не вдається зареєструвати видимої загибелі рослин. Явні ознаки загибелі печально відомого «Рудого лісу» – 600 га захисного масиву навколо Чорнобильської АЕС, що одержав смертельну дозу під час аварії протягом квітня–травня 1986 р., проявилися лише наприкінці року, а цілком очевидними стали навесні 1987 р. (рис. 4.10).



Рис. 4.10. Куточок «Рудого лісу» через рік після аварії. На тлі сухих дерев сосни, що втратили хвою, видніються крони беріз, які мають більш високу радіостійкість.

Навіть у випадку досить високих доз, які повністю пригнічують поділ клітин в усіх твірних тканинах, а, відповідно, повністю інгібують ростові процеси,

опромінені рослини довгий час можуть здаватися життєздатними, зберігаючи функціонування деяких систем. На цьому, до речі, оснований спосіб одержання особливих проростків, позбавлених меристем. Вони називаються гамма-проростками, або гамма-рослинками (gamma-plantlets), і використовуються для вивчення особливостей певних фізіологічних і біохімічних функцій рослини при відсутності клітин, що діляться.

Оскільки ж в кінцевому підсумку рослини гинуть внаслідок загибелі твірних тканин, то досить зручно реєструвати їх виживання саме за цією ознакою. На клітинному рівні за допомогою мікроскопу це можна виявити вже через 2–3 дні після опромінення – в меристемах зникають мітози. А при високих дозах, що блокують перехід клітин до мітозу, – навіть через декілька годин. Констатувати загибель меристем можна і візуально – через 6–10 діб спостерігається специфічне побуріння кінчиків коренів (рис. 4.11), з'являється опушеність в зоні росту; побуріння меристем пагонів можна виявити, розкривши листочки, що накривають їх. При опроміненні рослин в дуже високих дозах, що вимірюються десятками тисяч грей, можна спостерігати їх загибель через декілька годин після дії радіації: в усіх типах клітин відбувається повна деградація вмісту, спостерігається відставання цитоплазми від клітинних стінок, припиняються всі процеси метаболізму, слідом за чим рослини швидко в'януть і усихають. Це – вже згаданий вид швидкої смерті – «смерть під променем».



Рис. 4.11. Загибель проростків гороху через 6 діб після γ -опромінення у дводобовому віці в дозі 15 Гр; ліворуч неопромінений контроль.

3. Генетичні ефекти. Генетичні, або мутагенні, ефекти – це набуті в результаті опромінення іонізуючою радіацією морфологічні зміни чи деякі ознаки і властивості, що відрізняють організм від батьківських форм, які проявляються у наступних поколіннях. Такі пошкодження особливо небезпечні і підступні, так як виникають випадково і можуть проявлятися аж до двадцятого покоління.

Виділяють три основних типи мутацій:

1. Генні, або точкові, мутації, що є наслідком зміни окремих генів;
2. Аберації хромосом – мутації, пов'язані з порушенням структури хромосом;
3. Мутації каріотипу – мутації, пов'язані зі зміною числа хромосом; їх

називають також геномними мутаціями.

Під впливом опромінення мутації можуть виникати як в статевих, так і в соматичних клітинах. Перші називають генеративними мутаціями, другі – соматичними.

Незалежно від того, в яких клітинах виникають зміни, мутаційний процес, індукований іонізуючими випромінюваннями, носить не спрямований характер. Іншими словами, при опроміненні виникають мутації, що змінюють будь-які властивості і ознаки організму.

Виникнення радіаційних мутацій пов'язується, як правило, з прямими фізичними руйнуваннями ділянок хромосом іонізуючим випромінюванням чи індукованим ним потоком частинок, або з функціональною інактивацією життєво необхідних унікальних структур клітини під впливом продуктів радіолізу. Тому природно, що мутагенний ефект залежить від дози радіації. Вивчення залежності частоти виникнення як видимих морфологічних мутацій, так і аберацій хромосом від дози звичайно показує однозначну картину: крива доза-ефект має або лінійний, або близький до лінійного характер (рис. 4.12). Аналогічні залежності одержані і для інших типів мутацій.

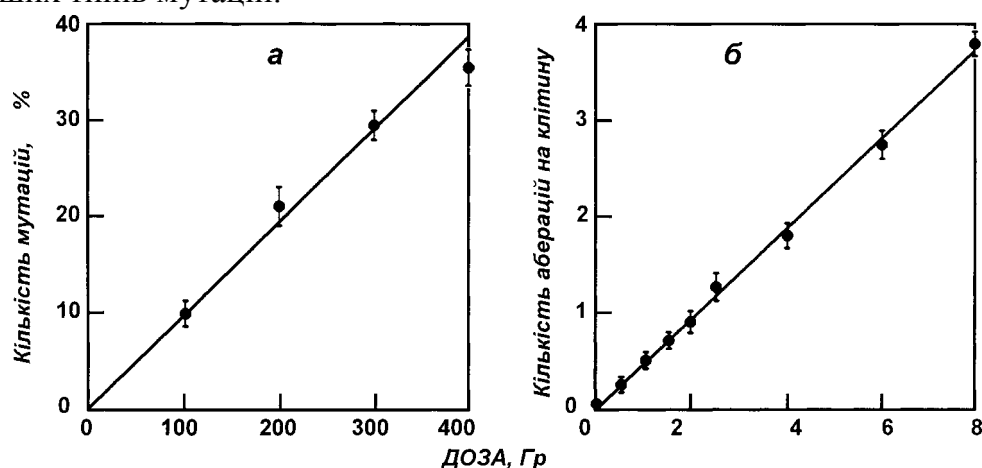


Рис. 4.12. Залежність кількості видимих мутацій для клітин хлорели (а) і аберацій хромосом в клітинах меристеми кореня бобів (б) від дози γ -опромінення (В.А. Шевченко, 1979; І.М. Гудков, 1984).

Лінійний характер кривих залежності мутагенного ефекту від дози опромінення, з одного боку, свідчить про те, що ступінь генетичного пошкодження зростає прямо пропорційно їй, а з другого – вказує на безпороговість цієї радіобіологічної реакції. Тобто, якою б малою не була доза опромінення, вона буде індукувати мутації.

Із збільшенням дози кількість мутацій зростає, але знижується виживання організмів. Тому при певному порівняно високому рівні доз криві виходять на плато, або навіть кількість мутацій починає зменшуватися – на кривій з'являється максимум. Для рентгенівської і γ -радіації звичайно є тенденція до виходу числа мутацій на плато при 1–2% виживання, коли кількість мутантів досягає 50% від усіх індивідуумів, що вижили.

Мірою генетичної дії іонізуючих випромінювань є доза, яка подвоює кількість мутацій. Оцінити її нелегко. Для ссавців, деяких радіочутливих видів рослин вона варіює в досить широкому діапазоні доз – від 0,1 до 1 Гр.

При збільшенні радіаційного фону, ступеня забруднення ґрунту, рослин, кормів, продуктів харчування радіоактивними речовинами імовірність виникнення мутацій збільшується.

Мутації, що виникають при опроміненні в статевих клітинах ссавців, можуть бути настільки серйозними, що плід, який формується з них, може виявитися нежиттєздатним і загинути. Такі мутації називають летальними – смертельними. В інших випадках мутаційні зміни можуть бути сумісними з життям, але проявляються у вигляді виродків різного ступеня, спадкових хвороб. Із збільшенням дози небезпека виникнення обох типів мутації зростає. Особливо вона велика для потомства тварин, які пережили променеву хворобу середнього та тяжкого ступеню.

Слід підкреслити, що вищі рослини внаслідок наявності специфічної форми – насінини, котра являє собою фазу онтогенезу, в якій вони перебувають в стані спокою, а також завдяки можливості використання в експерименті чи роботі дуже великого числа особин з однаковими генетичними характеристиками (колос, качан, зонтик, волоть, головка та інші суцвіття, що здатні дати від батьківської форми сотні і тисячі однакових нащадків), є дуже зручним об'єктом для досліджування мутаційного процесу. І не випадково, що саме роботи в області радіаційного мутагенезу рослин одержали найбільше поширення в світі.

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

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

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

Віддаленим радіобіологічним ефектом вважається прискорення старіння і скорочення тривалості життя, що реалізуються у явній формі в останні періоди онтогенезу. До віддалених наслідків ураження ссавців відносяться такі види морфологічних змін, як злоякісні новоутворення – поява лейкозів, ракових пухлин. Типовим віддаленим ефектом морфологічної природи є променеві катаракти. До них відносять нефросклероз – хворобу, що виникає в результаті переродження тканин та судин нирок внаслідок їх радіаційного ураження радіоактивними речовинами при їх виведенні з організму. Ці ефекти проявляються, як правило, через роки після опромінення.

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

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

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

Віддалені радіобіологічні ефекти носять випадковий характер. Це означає, що їх неможливо визначити для певного опроміненого організму наперед, на відміну від більшості близьких ефектів. В усією впевненістю можна, наприклад, стверджувати, що коли 1000 рослин гороху опромінити в дозі 0,5 Гр, то в усіх, або майже в усіх, виявиться радіаційна стимуляція; при дозі 8 Гр у всіх рослин виникнуть різні морфологічні зміни, а при дозах більше 15 Гр всі рослини загинуть. Можна бути впевненим, що коли овець, або навіть одну вівцю, опромінити в дозі 2 Гр, у всіх них обов'язково виникне променева хвороба першого або другого, а може і третього (в залежності від індивідуальної чутливості до іонізуючого випромінювання) ступеню. Але завбачити появу віддалених наслідків опромінення у якогось конкретного індивідууму неможливо. Тому, що такі ефекти опромінення, як генетичні, деякі соматичні – скорочення тривалості життя, виникнення ракових пухлин та інші мають стохастичний – імовірнісний,

випадковий характер і називаються стохастичними ефектами на відміну від детермінованих, або нестохастичних, ефектів. Вони виявляються на основі статистичного аналізу змін в опроміненій популяції і оцінюються як відсоток уражених осіб в опроміненій популяції організмів, або кількість уражених осіб на тисячу, на мільйон. Цілком зрозуміло, що імовірність прояву віддалених стохастичних ефектів радіаційного ураження зростає зі збільшенням дози опромінення.

Тема 5

Радіочутливість рослин, тварин та інших організмів

1. Радіочутливість та радіостійкість.
2. Порівняльна радіочутливість організмів.
 - 2.1. Радіочутливість рослин.
 - 2.2. Радіочутливість тварин.
 - 2.3. Радіочутливість бактерій і вірусів.
 - 2.4. Радіочутливість біоценозів.
3. Причини широкої варіабельності радіочутливості організмів.
4. Порівняльна радіочутливість клітин на різних фазах розвитку.
5. Критичні органи.
6. Особливості дії на живі організми малих доз іонізуючих випромінювань.

За різних доз опромінення живих організмів іонізуючою радіацією проявляються різні радіобіологічні ефекти. Радіаційна стимуляція – перший соматичний ефект, котрий візуально можна спостерігати за мінімальних доз. Морфологічні зміни і променева хвороба проявляються при дозах у десятки разів більш високих. При досягненні певних ще вищих доз настає загибель.

Але не тільки від дози опромінення залежить прояв радіобіологічних ефектів. Так, дози, які стимулюють ріст і розвиток рослин родини капустяних (капуста, ріпак, редис), смертельні для бобів і гороху. Дози, які практично нешкідливі для комах, смертельні для всіх ссавців. Всі радіобіологічні ефекти визначаються чутливістю організмів до іонізуючої радіації, або їх радіочутливістю.

1. Радіочутливість та радіостійкість. В радіобіології рівноправно існують два терміни, що характеризують відношення організму до іонізуючих випромінювань – радіочутливість і радіостійкість. Вважається, що вони взаємозв'язані і з різних боків відбивають одне і те ж явище – якщо організм має високу радіочутливість, то він характеризується низькою радіостійкістю, і навпаки. Дійсно, такий зв'язок важко заперечувати. Проте, ці поняття слід відрізняти.

Радіочутливість організму – це його здатність реагувати на мінімальні дози іонізуючої радіації, уловлювати за допомогою різних систем клітин і молекул незначні рівні опромінення.

Радіостійкість – це здатність організму переносити високі рівні опромінення іонізуючою радіацією, тобто здійснювати процеси життєдіяльності в умовах певного радіаційного навантаження.

У відповідності з цими визначеннями чим менша доза, яка викликає нелетальні радіобіологічні ефекти, тим вища радіочутливість організму. І чим більша доза, яка призводить до загибелі організму, тим вища його радіостійкість. Організм можна характеризувати двома рівнями доз: нижнім – для радіочутливості і верхнім для радіостійкості. Інтервал між цими дозами – це діапазон радіобіологічних, або біологічно ефективних, доз.

Для оцінки радіочутливості чи радіостійкості, тобто ступеня радіаційного впливу, використовують поняття ефективної дози. Ефективна доза – це доза, яка викликає той чи інший радіобіологічний ефект. Наприклад, індукувати радіаційну стимуляцію, викликати утворення певного типу морфологічних змін. Але найбільш часто для характеристики радіочутливості і радіостійкості організмів використовують рівні півлетальних (LD_{50}) і летальних (LD_{100}) доз, тобто доз, які викликають, відповідно, загибель половини або всіх опромінених індивідуумів до якогось певного строку після опромінення (наприклад, 30-у добу – $LD_{50/30}$).

Ці дози визначають за кривими доза-ефект. Під такою кривою розуміють графічну залежність між різними дозами опромінення і ступенем прояву радіобіологічного ефекту, в даному випадку загибелі або виживання. Тому такі криві називають кривими виживання.

Для побудови кривої виживання проводяться спеціальні експерименти, в яких групи рослин чи тварин опромінюються в різних дозах. Через певний час, коли результати досліду стають очевидними, в кожному варіанті оцінюється кількість особин, що загинули і, відповідно, що вижили, і за ними будується крива (рис. 5.1). Вона звичайно має S-подібний або близький до нього характер. Про що свідчить така її форма? Перш за все, про те, що реакція виживання, на відміну від генетичного ефекту, має пороговий характер – до певного рівня дози виживають всі особини і крива на цій ділянці йде паралельно осі абсцис. Потім із збільшенням дози і появою загиблих особин крива починає опускатися до низу. На цій ділянці залежність виживання від дози має, як правило, лінійний або близький до нього характер, і саме тут з високою точністю оцінюється величина LD_{50} . Зрештою, з подальшим збільшенням дози крива знову виходить на постійний рівень, що свідчить про те, що всі дози вище певної межі є летальними для всіх особин.

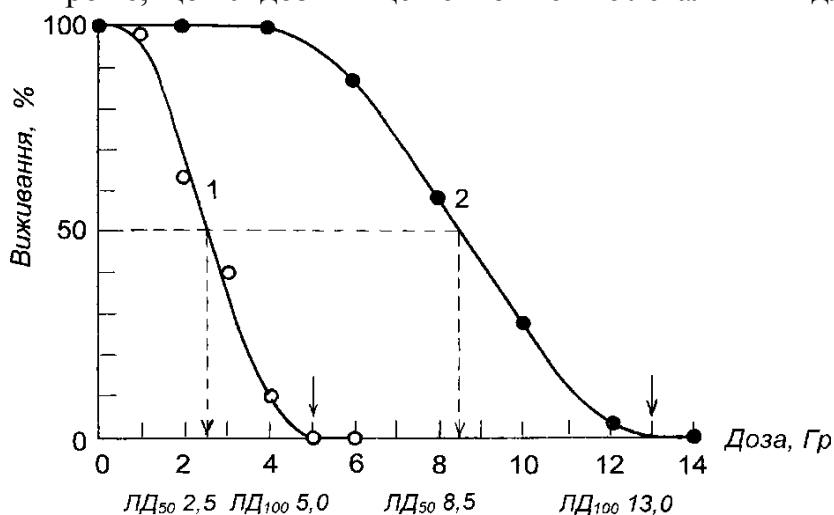


Рис. 5.1. Оцінювання ефективних доз (LD_{50} і LD_{100}) на кривих виживання: 1 – для овець і 2 – для рослин гороху.

Але якщо для характеристики радіостійкості можна використовувати рівень дози, при якій після опромінення гине певна частина організмів – LD_{50} або LD_{100} , то оцінка радіочутливості викликає певні утруднення. У деякій мірі рівень

радіочутливості можуть характеризувати дози, які викликають цитологічні, цитогенетичні пошкодження або деякі біохімічні порушення.

2. Порівняльна радіочутливість організмів.

Радіочутливість живих організмів різних таксономічних груп варіює у дуже широких межах. Якщо для найрадіочутливіших з них – деяких видів вищих рослин, ссавців півлетальні дози не перевищують декількох грей, то для найрадіостійкіших – нижчих рослин, бактерій, вірусів вони досягають декількох тисяч грей, тобто декількох кілогрей (кГр).

Необхідність знання даних про радіочутливість людини сумніву ні в кого не викликає. Те ж стосується тварин-ссавців, особливо сільськогосподарських та інших свійських тварин, які схожі з людиною за своєю організацією і не набагато відрізняються щодо чутливості не тільки до іонізуючих випромінювань, а й до інших впливів. Але навіщо вивчати радіочутливість рослин, комах, бактерій, вірусів, які, як відомо, мають відносно високу стійкість практично до всіх вражаючих чинників?

По-перше, вивчення порівняльної радіочутливості організмів окремих таксономічних груп є досить важливим для науки як в чисто академічному плані пізнання, так і в теоретичному – вивченні причин низької радіочутливості деяких з них. Знання останніх може відкрити шляхи до штучного підвищення радіостійкості чутливих організмів, в тому числі і людини.

По-друге, у різні сфери діяльності людини все ширше впроваджуються десятки радіаційних і радіаційно-біологічних технологій, пов'язаних з опроміненням насіння і вегетуючих рослин з метою збільшення урожаю, одержання нових сортів, продовження строків зберігання продукції рослинництва; опроміненням продукції рослинництва і тваринництва для знищення шкідливих комах; з метою її пастеризації і консервації, тобто знищення мікрофлори; дезінфекції, з метою стерилізації матеріалів і інструментів та інші. Тому знання радіочутливості різних видів живих організмів є важливим і з суцільно прикладних позицій.

2.1. Радіочутливість рослин. Натепер відомі дані про радіочутливість більш як 3000 рослин, що належать до різних родин, родів, видів, сортів. Але в переважній більшості вони відносяться до насіння – стадії онтогенезу рослини, в якій вона перебуває в стані глибокого органічного або вимушеного спокою і тому має високу стійкість як до іонізуючих випромінювань, так і до інших чинників. Саме тому у радіобіологів, які не працюють безпосередньо з рослинами, склалася помилкова думка про їх нібито надзвичайно високу радіостійкість.

Це і так, і не так. Варто лише помістити насіння в вологе середовище, як зараз же активізуються всі процеси обміну і воно починає проростати. Уже у фазі проростку радіочутливість рослини збільшується в 15–30 разів (рис. 5.2) і залишається на цьому рівні до кінця вегетації, незначно змінюючись в окремі фази онтогенезу. І треба визнати, що відомостей про радіочутливість рослин у вегетуючому стані значно менше, ніж для насіння. В табл. 5.1 наведені дані про

радіочутливість 16 родів рослин, а в табл. 5.2. – насіння 60 родів рослин. Вважається, що найвищу радіочутливість в рослинному світі і, мабуть, взагалі серед живих організмів, мають деякі види рослин з родини лілейних, зокрема трилліум. Видатний американський радіобіолог Арнольд Хікс Сперроу, встановив, що рослини з насіння трилліуму (рис. 5.3.), опроміненого у дозі 20 Гр, гинуть на стадії сходів, а для проростків летальна доза складає лише 2 Гр.

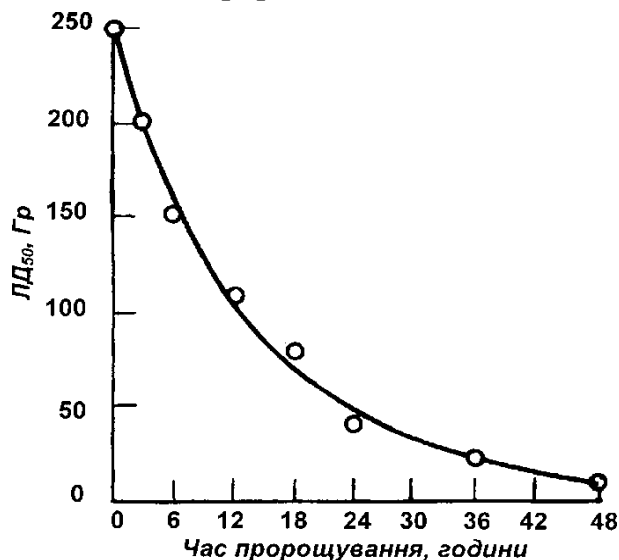


Рис. 5.2. Зростання радіочутливості насіння гороху при проростанні.

Таблиця 5.1.

Радіочутливість вегетуючих рослин

Рід	LD _{50/10} *, Гр	Рід	LD _{50/10} , Гр
Трилліум	0,5–1	Пшениця	13–18
Сосна	1–3	Помідор	15–18
Ялина	3–5	Люпин	15–20
Боби	3–5	Кукурудза	18–22
Горох	7–9	Огірок	20–24
Квасоля	10–13	Люцерна	20–25
Соя	12–15	Конюшина	25–30
Ячмінь	13–17	Редис	50

*Цифра „10” вказує день після опромінення, Коли проводилась оцінка виживання за тестом загибелі меристеми головного кореня.

Таблиця 5.2.

Радіочутливість насіння деяких родів вищих рослин до γ - і рентгенівського випромінювання (за О.І. Преображенською, 1991)

Рід	LD ₅₀ , Гр	LD ₁₀₀ , Гр	Рід	LD ₅₀ , Гр	LD ₁₀₀ , Гр
Лілія	10	20	Бавовник	200–360	–
Сосна	10	120	Помідор	200–400	400–750
Виноград	10–90	–	Овес	250	500
Ялина	20–60	50	Кріп	250	500
Яблуна	20–70	70–150	Мак	250–300	450–500
Груша	30–40	70	Люпин	250–300	750–800
Смородина	30–40	70	Липа	300	600

Слива	40–100	80–200	Коноплі	300–350	500
Вишня	50	100	Буряк	350–400	700–750
Боби	50–100	75–125	Картопля	350–500	500–1000
Береза	50–100	100–150	Гарбуз	500	–
Горох	50–250	150–500	Огірок	500	1000
Клен	100–150	160–600	Кавун	500–700	–
Кукурудза	100–150	250	Морква	500–1000	1000
Цибуля	100–150	250	Еспарцет	500–1000	1250
Салат	100–150	250	Люцерна	500–1500	1500
Жито	100–180	150–250	Конюшина	500–1500	1500–2000
Гречка	100–200	200–400	Капуста	700–800	1500
Квасоля	100–250	250–500	Буркун	700–1000	2000
Баклажан	150	250	Ріпак	750–1000	2000
Соя	150–170	250–500	Гірчиця	800–1500	1600–2000
Пшениця	150–250	250–450	Льон	1000	2000
Ячмінь	150–250	250–500	Редька	1000–1500	2000
Ясен	150–300	300–600	Ріпак	1500–2000	2500
Перець	190–360	–	Редис	2000	3000

До числа дуже радіочутливих належать хвойні рослини, в першу чергу сосна і ялина, що також вперше встановив А.Х. Сперроу. Для насіння деяких їх видів летальні дози складають лише 20 Гр. Високою радіочутливістю характеризується багато лісових та декоративних листяних *деревних порід*, виноград, плодове дерева, чагарникові породи.



Рис. 5.3. Триліум (*Trillium*) – найрадіочутливіша рослина.

Серед сільськогосподарських трав'янистих рослин найбільш високу радіочутливість має насіння більшості представників родини бобових, а серед них максимальну – бобів, представлених тільки одним видом – бобами кінськими. Більш високу радіостійкість мають злаки, деякі овочеві, технічні культури. Максимальною ж радіостійкістю серед вищих рослин характеризуються рослини родини хрестоцвітих. Так, півлетальні дози для насіння редьки, брукви, редису в 30–200 разів вищі, ніж для насіння найрадіочутливіших родів. Високу стійкість до іонізуючої радіації має насіння льону, гірчиці, буркуна.

Радіочутливість вегетуючих рослин, як правило, в 15–30 разів вища за радіочутливість насіння. В цілому ж відмічається кореляція між радіочутливістю насіння і вегетуючих рослин. У рослин, як і в насіння, вона максимальна у лілейних, соснових, бобових і мінімальна у хрестоцвітих.

Вказані в табл. 5.1 і 5.2 діапазони ефективних доз для окремих родів дають деяке уявлення про варіювання радіочутливості у окремих видів. Але вона може суттєво відрізнитися і в окремих сортів. В цьому немає нічого дивного, так як різні сорти мають різну стійкість до різних факторів – низьких і високих температур, хвороб, хімічних агентів та інших. Так, ефективні дози для насіння злаків різних сортів можуть різнитися в 2–3 рази, а насіння гороху – до 5 раз.

Не тільки при переході від стану спокою насінини до вегетуючого, але і протягом всього періоду розвитку радіочутливість рослин варіює у певному діапазоні. Безперечно, це зумовлено тим, що кожний етап онтогенезу характеризується специфічним комплексом фізіолого-біохімічних процесів, від яких і залежить радіочутливість рослини. Тому необхідно досить чітко уявляти особливості етапів розвитку кожного виду і оцінювати радіочутливість рослин за ознаками, властивими кожному етапу. Тільки в цьому випадку можна визначити і вивчити причини, від яких залежить радіочутливість рослин у перебігу онтогенезу і проводити правильне порівняння радіочутливості рослин різного філогенетичного положення.

На рис. 5.4 наведені узагальнені результати дослідників, які вивчали радіостійкість рослин на окремих етапах онтогенезу – від насінини, що формується, до початку гаметогенезу – формування нової насінини. Вони свідчать, що фаза молочної стиглості насіння є найбільш чутливою до дії випромінювання. В міру переходу до воскової і повної стиглості радіостійкість зростає, досягаючи максимуму у період повного дозрівання. Початок проростання насіння, як уже відмічалось, характеризується різким підвищенням радіочутливості, яка потім із закладанням вегетативних органів та осі суцвіття дещо знижується. Перехід до генеративного стану – етапу формування статевих органів знову характеризується підвищенням радіочутливості. В період формування елементів квітки стійкість рослини до випромінювання дещо підвищується, але з початком спорогенезу і гаметогенезу знижується знову.

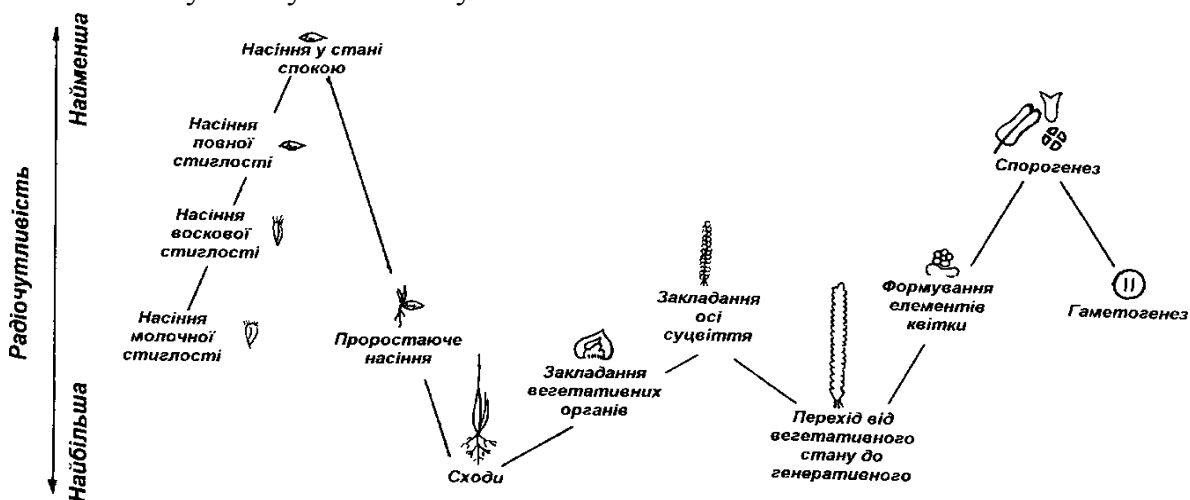


Рис. 5.4. Варіювання радіочутливості рослин в онтогенезі (М.Ф. Батигін і С.М. Потапова, 1969).

Таким чином, протягом розвитку рослини можна виділити декілька етапів, що характеризуються високою радіочутливістю. Це – проростання насіння і стадія сходів, перехід росли, від вегетативного стану до ге-неративного і гаметогенез. Опромінення рослин на цих етапах може привести до досить значного ураження. Розмова про радіочутливість рослин буде неповною, якщо не сказати декілька слів про відношення до іонізуючої радіації нижчих рослин – організмів досить поширених, багато видів яких відіграють важливу роль в життєдіяльності мікрофлори ґрунту. Довгий час як приклад найвищої радіочутливості живих організмів наводилась мутантна форма бактерії роду Мікрококкус, виявлена в США в каналі одного атомного реактора, де потужність дози була близько 0,12 Гр/с, а доза опромінення за добу, відповідно, більше тридцяти тисяч грей. І ось в цих умовах ця бактерія не тільки виживала, але й розмножувалась, в зв'язку з чим одержали назву *Micrococcus radiodurans* (радіостійкий).

Американська дослідниця М. Краус в умовах експерименту порівнювала радіостійкість цієї бактерії з радіостійкістю синьо-зелених водоростей і встановила, що у деяких видів водоростей вона значно вища – ЛД₅₀ досягала 12000–15000 Гр (гострого опромінення, при потужності дози значно більшій, ніж 0,12 Гр/с). ЛД₅₀ для *Micrococcus radiodurans* в цих умовах склала лише 3000–4000 Гр.

Досить низьку радіочутливість мають мохи і папороті – півлетальні дози для більшості з них складають 200–700 Гр. Для грибів, які були відокремлені в окреме царство, ЛД₅₀ варіює від 100 до 1000 Гр. Високу радіостійкість мають лишайники – нижчі рослини, утворені симбіозом гриба і водорості. Для них значення півлетальних доз визначаються, як правило, радіочутливістю гриба.

До тепер далеко не у всіх видів організмів досліджена радіочутливість. Проте, з достатньою впевненістю можна стверджувати, що рослини включають як найрадіочутливіші, так і найрадіостійкіші види живих організмів. Докладне вивчення причин такого досить широкого варіювання радіочутливості видів рослин і особливо причин високої радіостійкості деяких із них має велике значення для розвитку теорії протирадіаційного захисту організму і пошуку протирадіаційних фармакологічних засобів.

2.2. Радіочутливість тварин. З усіх точок зору, в тому числі і з точки зору радіочутливості, в тваринному світі з цілком зрозумілих причин найбільший інтерес представляють ссавці. Радіобіологія має дані про радіочутливість багатьох представників цього класу. Але найбільш точні дані в основному стосуються дрібних лабораторних тварин – мишей, щурів, ховрахів, кролів, собак. Значно менше відомо про радіочутливість великих тварин, таких як кінь, корова, верблюд, експерименти з якими досить дорого коштують. Практично немає даних про радіочутливість диких тварин, особливо крупних. Приблизні також дані про радіочутливість людини, основані на відомостях, одержаних при аваріях, в умовах яких точна дозиметрія, як правило, досить ускладнена.

В табл. 5.3 наведені дані про чутливість до γ -випромінювання деяких видів ссавців, узагальнені на основі відомостей, які є в радіобіологічній літературі. Вони

свідчать, що для деяких з них значення півлетальних і летальних доз варіюють в дуже широких межах, відрізняючись часом в декілька разів. Навряд чи можна це пояснити особливостями порід, ліній тварин. Скоріше за все – особливостями проведення експериментів, умовами опромінення, віком тварин. І все-таки можна відмітити, що для більшості родів ссавців півлетальна доза не перевищує 4–5 Гр, а летальна – 8–9 Гр. До найбільш радіочутливих з свійських тварин варто віднести вівцю, мінімальне значення ЛД₅₀ для якої складає лише 1,5 Гр, а до найбільш радіостійких – кролика, для якого значення ЛД₅₀ досягає 8–10 Гр.

Вчені Московського університету ім. М.В. Ломоносова у 60-х роках виявили, що досить розповсюджений у Прибайкаллі гризун монгольська піщанка – тварина підродина ховрахових (рис. 5.5) має ще більш високу стійкість до радіації – півлетальна доза для неї досягає 13 Гр, а летальна 15–18 Гр. Поки що це рекордсмен з радіостійкості серед ссавців. Хоча деякі вчені так не вважають. Справа в тому, що й інші тварини – польові миші, нориці, ховрашки, хом'яки, бабаки, які живуть в районах поширення монгольських піщанок, мають підвищену порівняно зі звичайною радіостійкість. Але переведення тварин в лабораторні умови на штучний раціон, в якому була відсутня природна їжа, дуже швидко призводило до зниження їх стійкості до опромінення. Це явище одержало назву «ефект віварію». І є думка, що деякі рослини, якими живляться ці гризуни в природних умовах, мають радіозахисні властивості. І хоча виявити їх поки що не вдалося, це ще раз свідчить про важливість дослідження видів рослин з метою можливого їх використання для одержання протирадіаційних препаратів.

Таблиця 5.3.

Радіочутливість ссавців (γ-опромінення)

Рід	ЛД _{50/30} , Гр	ЛД ₁₀₀ , Гр	Рід	ЛД _{50/30} , Гр	ЛД ₁₀₀ , Гр
Морська свинка	1,5–3	4–6	Миша	4,5–7	8–10,5
Вівця	1,5–4	5,5–7,5	Щур	4,5–7,5	7–10
ягнята до 3 міс.	1,5–3	6	Кішка	5–7	8–9,5
Велика рогата худоба	1,6–5,5	6,5	Котенята до 2 міс.	3,5–4	6,5–7
телята до 5 міс.	1,5–2,5	3	Рись	5,8	–
Коза	2–5,5	7,5	Єнот	5,8	–
Осел	2–5,5	8	Кажан	5–7,5	–
Верблюд	2,5	–	Хом'як	5–8	9–10
Людина	2,5–4	6	Нориця	5,5–8	9–11,5
Мавпа	2,5–5,5	4–6	Лиса	7,8	–
Свиня	2,5–6	8	Ховрашок	6–9	11
поросята до 2 міс.	2,8–3	4,5	Бабак	6–9,5	–
Кінь	2,5–6	–	Кролик	8–10	12–14
Собака	3,5–4	5–6,5	Заєць	9–10	–
цуценята до 3 міс.	2–3,5	4–5	Монгольська піщанка	10–13	15–18

Молоді тварини, як свідчать дані табл. 5.3, мають більш високу радіочутливість, ніж дорослі. Це загальне радіобіологічне явище, яке цілком закономірно витікає із положення Бергоньє-Трибондо про те, що чутливість клітин

до випромінювань прямо пропорційна їх здатності до поділу і обернено пропорційна ступеню їх диференціації.



Рис. 5.5. Рекордсмен з радіостійкості серед ссавців монгольська піщанка (*Meriones unguiculatus*).

Коротко слід сказати про радіочутливість інших класів тварин. Серед хребетних більш високу, ніж ссавці, радіочутливість мають птахи. Півлетальні дози для більшості їх видів варіюють від 4 до 18 Гр. Для різних порід курей, наприклад, ці дози варіюють від 10 до 15 Гр, качок – від 12 до 16 Гр, гусей – від 12 до 18 Гр (табл. 5.4).

Таблиця 5.4.

Радіочутливість видів птахів

Вид	ЛД _{50/30} , Гр
Коноплянка	4
В'юрок	5
Щиголь	6
Зеленушка	6
Горобець	6,25
Голуб	9,2
Кури	10–15
Качки	12–16
Гуси	12–18

В діапазоні 5–20 Гр знаходяться півлетальні дози для риб. Для більшості амфібій вони дещо вищі – до 25–30 Гр. Хоча за даними японських дослідників для саламандри японської складають усього 7–8 Гр (рис. 5.6).



Рис. 5.6. Саламандра японська (*Andrias japonicus*) – найрадіочутливіший вид серед амфібій.

В широкому інтервалі варіюють півлетальні дози для плазунів: для найбільш

радіочутливих представників тварин цього класу черепах вони складають 15– 20 Гр, а для найбільш радіостійких – зміїв – 80–200 Гр.

Значно вищу радіостійкість мають безхребетні тварини. Дія більшості видів комах півлетальні дози складають 50–300 Гр, а летальні – 100–500 Гр, хоча для деяких можуть досягати 1000 Гр. Радіочутливість комах дуже залежить від стадії розвитку. Наприклад, для 3-годинних яєць дрозофіли півлетальна доза складає 2 Гр, для 4-годинних – 5, для 7,5-годинних – 8, для стадії лялечки – 20–65, а для дорослої особини – 95 Гр.

Для різних молюсків півлетальні дози варіюють від 20 до 200 Гр, для членистоногих – від 100 до 1000 Гр, для кишковопорожнинних – від 50 до 2500 Гр, для найпростіших – амеб і інфузорій – від 1000 до 3000 Гр.

2.3. Радіочутливість бактерій і вірусів. Бактерії і віруси, без сумніву, належать до найрадіостійкіших організмів. Уявлення про це дають наведені вище відомості про радіочутливість синьо-зелених водоростей, які мікробіологи називають ціанобактеріями, тобто блакитними бактеріями. Згадувалась також радіочутливість бактерії *Micrococcus radiodurans*, для якої півлетальна доза складає близько 4000 Гр (за даними різних дослідників вона варіює від 1000 до 7000 Гр). Але навіть у цьому роду є бактерії, для яких значення півлетальних доз значно нижчі. Так, для *M. sodensis* вона складає тільки 300 Гр. Однією з найбільш радіочутливих бактерій є часто використовувана в радіобіологічних експериментах кишкова паличка *Escherichia coli*. Для неї ЛД₅₀ складає 30–60 Гр. Але для переважної кількості бактерій півлетальні дози знаходяться в діапазоні 300–2000 Гр. Спори бактерій ще більш стійкі до іонізуючих випромінювань.

Всі віруси навіть у фазі розмноження мають дуже високу радіостійкість – ЛД⁵⁰ для них варіює від 4000 до 7000 Гр. В стані спокою їх радіостійкість набагато вища. Без сумніву, летальні дози для бактерій і вірусів, як і для їх спор, значно вищі. Виходячи з них, оцінюють дози, необхідні для пастеризації і консервації продуктів, знезараження продукції рослинництва і тваринництва, стерилізації матеріалів та інструментарію в медицині та ветеринарії. В окремих випадках ці дози досягають 20000–25000 Гр, тобто 20–30 кГр.

2.4. Радіочутливість біоценозів. При дії іонізуючих випромінювань на угруповання організмів різних таксономічних груп навіть у порівняно невисоких дозах, далеких від рівня летальних для найбільш радіочутливих компонентів біоценозу, в його структурі можуть відбуватися значні зміни. Це пояснюється тим, ще навіть незначне пригнічення росту і розвитку одного-двох видів може супроводжуватись порушенням ценотичних зв'язків і забезпечити сприятливі умови для розвитку інших видів.

У цій ситуації більш небезпечним для біоценозів може бути хронічне опромінення, ніж гостре, так як діючи на рослину чи тварину протягом ряду поколінь, воно призводить до накопичення поступових відхилень в розвитку того чи іншого виду. Після гострого ж опромінення порушення у біоценозі в наступні роки може відновлюватись.

Перші дослідження з дії іонізуючих випромінювань на біоценози були проведені в районах з дуже високою природною радіоактивністю, а також в місцях випробування ядерної зброї, де на порівняно великих територіях вони опромінювалися досить тривалі періоди.

Так, польські дослідники І. Сарос'єк і Х. Вожаковська-Натканець (1966) в умовах радіонуклідної аномалії оцінювали дію γ -випромінювання при потужності дози 0,76–0,91 мР/год на природну екологічну популяцію різних видів мохів. Протягом декількох років вони спостерігали поступове зникнення деяких представників цього класу рослин і зміцнення позицій маршанцієвих мохів, які мають більш високу радіостійкість.

А.І. Таскаєв зі співробітниками (2005) проводили дослідження у середньотайговій зоні Республіки Комі на локальних радієвих ділянках, що утворилися понад 70 років тому внаслідок виводу на поверхню землі радіоактивних вод та техногенної діяльності людини з видобутку радію. В тих місцях, де потужність гамма-фону досягає 2 мР/год у порівнянні з контрольними, розташованими у цій же зоні ділянками зі звичайним фоном у 10–15 мкР/год, протягом останніх десятиліть спостерігали найрізноманітніші зміни у біоценозі, що складався тисячоліттями: морфологічні зміни у рослин, особливо у хвойних видів, підвищену мутабільність у більшості видів рослин, що призвело до суттєвих змін у флористичному складі біоценозу, порушення у структурі мікробного ценозу ґрунту, зниження чисельності популяцій деяких видів тварин, зокрема мишовидних гризунів – рудих нориць, нориць-економок – основних представників фауни даного регіону, порушення у структурі мікробного ценозу ґрунту.

На підставі багаторічних спостережень в зоні Східно-Уральського радіоактивного сліду і в 30-кілометровій зоні відчуження Чорнобильської АЕС В.А. Шевченко та ін. (2001) спостерігали і описали по мірі зростання потужності дози такі ефекти в біоценозах, в тому числі і в фітоценозах, як біохімічні мутації, аберації хромосом, видимі мутації, зміни генетичної структури популяції, випадіння радіочутливих видів, збіднення угруповань і, зрештою, як найсильніший ефект – деградація біоценозу. При цьому вони першочергове значення в дії іонізуючої радіації на ценози надають генетичним ефектам, котрі на їх думку є основною причиною екологічних змін у складі угруповань рослин та тварин. Вони виділили зони потужностей доз, за яких характерне виявлення генетичних ефектів: поодинокі ефекти – 10–6–10–4 Гр/доб, стійкі у хвойних порід – 2×10^{-5} Гр/доб, стійкі генетичні ефекти у більшості видів – 0,1 Гр/доб. Випадіння радіочутливих видів спостерігається починаючи з потужності дози 10–2 Гр/доб. Криві дозових залежностей, що були виявлені при цьому, мали класичний лінійний характер і не мали порогу.

Спеціальні дослідження з дії іонізуючих випромінювань на фітоценози проводяться на гамма-полях, що являють собою ізольовані від навколишнього середовища ділянки земельних угідь, оточені високим захисним земляним валом, що штучно опромінюються джерелом гамма-радіації (рис. 5.7). Саме в умовах

гамма-полів Брукхейвенської національної лабораторії в США в 50–60 роках минулого століття А.Х. Сперроу, вперше показав, що найбільш радіочутливим компонентом лісових фітоценозів є хвойні породи, а серед них – сосна. Точніше, це було встановлено в умовах поза гамма-полем. Виявилося, що верхівки сосен, що оточували гамма-поле і в зоні над захисним земляним валом попадали під дію γ -випромінювання, пожовтіли, у той час як колір крон дерев листяних порід не змінився. При тривалому опроміненні змішаного лісу хвойні породи можуть повністю випасти, а ліс перетвориться у листяний.

Це положення А.Х. Сперроу повністю підтвердилось під час аварії на Чорнобильській АЕС. Навесні 1987 р. через рік після аварії на величезному 600-гектарному масиві мертвих жовто-червоних хвойних дерев лісу навколо станції смарагдовими плямами зеленіли поодинокі скупчення листяних дерев. Правда, можливості розвитку сукцесійних процесів тут дано не було – фітоценоз був повністю зрізаний і похований під шаром ґрунту з метою уникнення розповсюдження радіонуклідного забруднення.

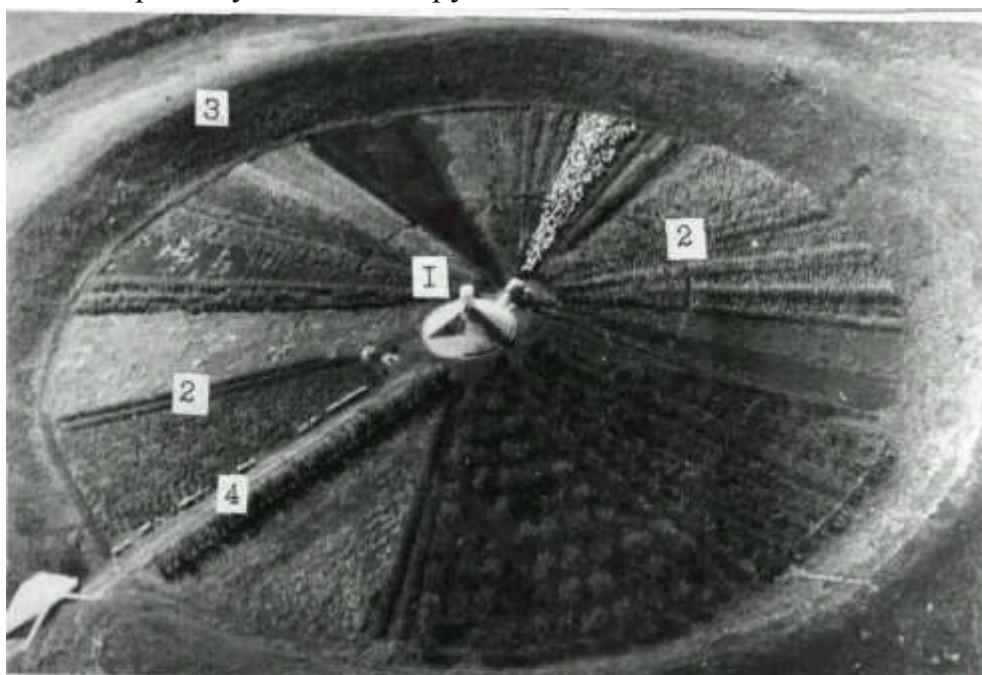


Рис. 5.7. Загальний вигляд експериментального "Гамма-поля" Кишинівського аграрного університету: 1 – установка з джерелом гамма-випромінювання (^{60}Co), 2 – сектороподібні ділянки поля з рослинами (радіус 50 м), 3 – захисний земляний вал висотою 6 м і 4 – під'їзна дорога.

Безсумнівно, головним фактором, що спричиняє порушення ценотичних зв'язків, є радіобіологічні реакції найбільш радіочутливих видів рослин. Хоча рівні небезпечних для фітоценозів доз можуть істотно відрізнятися від доз, що викликають помітне порушення ростової чи якоїсь іншої реакції у окремих видів рослин, порівняльне вивчення радіочутливості компонентів фітоценозу відіграє значну роль у вирішенні питання радіаційної безпеки для нього. При цьому необхідно враховувати, що ценотичні зміни можуть відбуватися не тільки при інгібуючих дозах випромінювань, а й при стимулюючих. Посилення росту і

розвитку одних видів створює для них певні переваги у фітоценозі, що може супроводжуватись погіршенням умов для розвитку інших компонентів фітоценозу аж до їх повного випадіння.

Так як зміни фітоценозу спричиняються переважно хронічним опроміненням, то потужність дози є більш важливою характеристикою впливу на нього, ніж загальна доза радіації. Безпечною потужністю дози для біоценозу вважається така, яка при будь-якому часу опромінення не викликає його зміни. Є всі підстави вважати, що вона повинна не на багато перевищувати рівень природного радіаційного фону.

За підвищених рівнів природної радіоактивності, наприклад, у районах Індії, Бразилії, Ірану протягом тисячоліть шляхом добору сформувались фітоценози, що відрізняються стійкістю по відношенню до існуючих потужностей доз. При переносі таких фітоценозів в умови нормального радіаційного фону з часом в них можуть відбутися також певні зміни.

Цілком зрозуміло, що будь-яка зміна в структурі фітоценозу не проходить безслідно для біоценозу в цілому, впливаючи на його мікробний і зоологічний компоненти, різні регуляторні зв'язки між ними. Це, в свою чергу, може привести до змін біоценозу регіону і навіть екосистеми.

Інтенсивна господарська діяльність людини веде до заміни природних біоценозів агробіоценозами, а фітоценозів – агрофітоценозами, або агроценозами. Якщо у фітоценозі складний рослинний покрив з величезною кількістю видів рослин різних родин складається історично, то в створеному людиною агроценозі він може бути представлений одним видом, навіть одним сортом рослини, що культивується. Чи значить це, що в такому випадку його радіочутливість буде визначатись радіочутливістю лише цього виду або сорту? В значній мірі, але не повністю. В агроценозі крім культивованої рослини в достатку можуть рости супутні бур'яни, котрі, як правило, мають більш високу радіостійкість, ніж сільськогосподарські культури тому, що пройшли селекційний добір за будь-якою ознакою, але тільки не по радіостійкості. Найменше пригнічення росту і розвитку культурної рослини, ледь помітне тільки в умовах чистого експерименту, може привести до посилення розвитку бур'янів і більш вираженому їх пригніченню. В той же час стимуляція росту культури може зумовити суттєве зниження розвитку бур'янів. Тому цілком можливо припустити, що в умовах навіть незначного підвищення радіаційного фону поведінка культурних рослин в агроценозі і його продуктивність можуть з часом помітно змінюватися. Це, зокрема, зумовлює формування цілком іншого погляду на ефекти малих доз випромінювань.

Взагалі ж на фоні багатогранної діяльності людини, як правило, дуже важко виділити внесок того чи іншого фактору на біологічні ефекти, в тому числі і на зміни у біоценозі. Або навпаки, практично повне припинення господарчої діяльності в зоні відчуження Чорнобильської АЕС, яке супроводжувалось евакуацією населення і вивезенням великого поголів'я худоби, спричинило у досить короткий строк до інтенсивної зміни характеру рослинності у фітоценозах і

колишніх агроценозах. Дуже важливо оцінити в цих умовах вплив на сукцесійні явища безпосередньо радіобіологічних ефектів.

3. Причини широкої варіабельності радіочутливості організмів

Як свідчать наведені вище дані, живі організми не тільки різних царств, але і різних класів, родин, родів, видів і навіть сортів можуть значно відрізнятися за радіочутливістю. Добре відомо, що основні процеси обміну речовин на клітинному рівні, такі, як синтез нуклеїнових кислот і білків, анаеробний і аеробний гліколіз, трикарбоновий цикл Кребса, окислювальне фосфорилування та багато інших дуже схожі не тільки для тварин і рослин, а й для бактерій. Більш того, основні компоненти живих клітин найрізноманітніших організмів, що несуть відповідальність за радіаційне ураження, – нуклеїнові кислоти, білки-ферменти, АТФ *in vitro* мають приблизно однакову чутливість до іонізуючих випромінювань. Отже, причини відмінностей у радіочутливості організмів слід шукати в різній організації і властивостях структур, до складу яких входять ці речовини, метаболічному стані клітин і, можливо, організму в цілому.

На теперішній час відома досить велика кількість факторів, від яких в тій чи іншій мірі залежить радіочутливість. Їх можна поділити на дві основні групи – структурні і функціональні фактори. До перших належать такі, як об'єм ядер і хромосом, число хромосом і плоїдність. До других – функціональний стан окремих структур клітини, фізіологічний стан геному, етап онтогенезу, вміст різних природних сполук (антиоксидантів, макроергів, сульфгідрильних сполук, фізіологічно активних речовин та інших), здатність до післярадіаційного відновлення, біологічні ритми та інші.

Не раз робилися спроби знайти кореляцію між якимось із цих факторів і радіочутливістю для різних організмів. Але ці пошуки тільки переконують, що радіочутливість є комплексною ознакою. І все-таки деякі кореляції заслуговують того, щоб на них зупинитися.

Мабуть, найцікавішою треба вважати спробу групи американських дослідників на чолі із А.Х. Сперроу знайти зв'язок між радіочутливістю та розмірами ядер і хромосом – структурними ознаками, які є одними з найбільш стабільних генетично визначених характеристик виду. Ця робота починалася саме з рослинами, так як давно вже було показано, що їх види відрізняються за цими показниками у багато десятків разів.

Спершу було встановлено, що існує кореляція між середнім об'ємом клітинного ядра меристемних клітин в інтерфазі та потужністю дози щоденного опромінення, необхідного для сповільнення росту рослини. І види рослин з меншим об'ємом ядра, як правило, відрізнялись більш високою радіостійкістю (рис. 5.8). Проте, при загальній тенденції дана закономірність не завжди має місце. І спочатку це пояснювалось тим, що об'єм ядра в значній мірі являє собою варіюючу величину і в залежності від фізіологічного стану клітини може змінюватись в 1,5–2 рази.

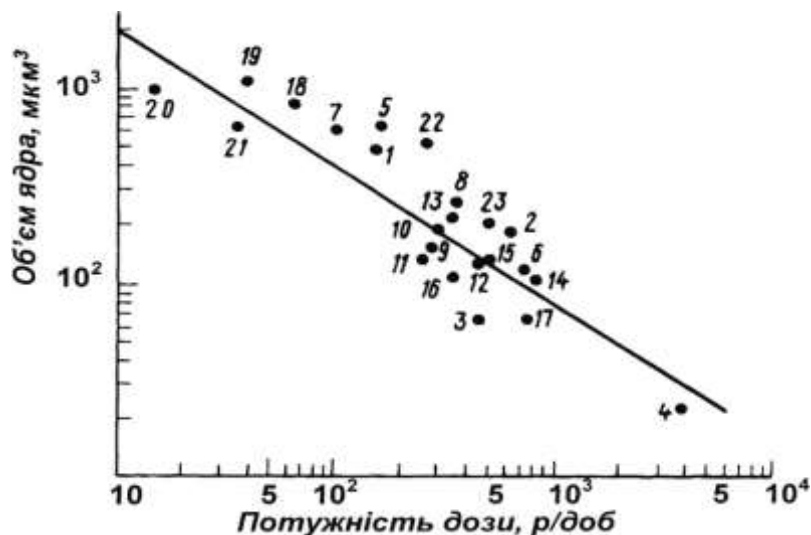


Рис. 5.8. Зв'язок між об'ємом клітинного ядра і потужністю дози γ -опромінення, що зумовлює однакову ступінь пригнічення ростових процесів (А.Х. Сперроу, 1966):

1 – цибуля, 2 – кріп, 3 – левиний зів (ротики), 4 – різущка Таля, 5 – бродиня, 6 – граптопеталом, 7 – хавортія, 8 – соняшник, 9 – розрив-трава, 10 – мохнатка, 11 – тютюн, 12 – квасениця, 13 – горох, 14 – редька, 15 – рицина, 16 – фіалка, 17 – заяча капуста, 18 – традесканція прирічкова, 19 – традесканція віргінська, 20 – триліум, 21 – тульбагія, 22 – боби і 23 – кукурудза.

Більш тісний зв'язок був встановлений між радіочутливістю рослин і об'ємом їх хромосом. Хромосоми рослин окремих видів розрізняються за розмірами у десятки і сотні разів. Для прикладу це видно на мікрофотографії рис. 5.9, на якій зображені з одного боку великі хромосоми триліуму, який має найвищу радіочутливість, а з іншого – ледь видимі хромосоми заячої капусти (рослини з родини товстянкових), яка має високу радіостійкість. А.Х. Сперроу встановив, що величина, одержана при поділі об'єму ядра в інтерфазі на число хромосом, складає грубо округлену середню величину об'єму хромосоми. І, дослідивши декілька сотень видів рослин, показав наявність зв'язку між цією ознакою і радіочутливістю – чим менший об'єм хромосоми, тим нижча радіочутливість.



Рис. 5.9. Мікрофотографії хромосом різних видів рослин, що ілюструють широкі коливання їх розмірів (збільшення в 1850 разів; А.Х. Сперроу, 1966):

1 – триліум, 2 – подофіл (ноголист), 3 – скереда і 4 – заяча капуста.

Спочатку ця залежність була показана тільки для вищих рослин. Але потім робота була розширена – для вивчення були залучені організми найрізноманітніших систематичних груп: ссавці та деякі інші класи тварин, бактерії, дріжджі, віруси. І в усіх випадках вдалося знайти кореляцію між об'ємом хромосом і радіочутливістю. В логарифмічній системі координат цей зв'язок з хорошим наближенням описується прямою лінією. Узагальнивши всі свої результати, А.Х. Сперроу об'єднав різні організми в залежності від їх радіочутливості у визначені групи, які він назвав радіотаксонами (рис. 5.10). Взагалі в біології під терміном «таксон» розуміють групу організмів, зв'язану тим чи іншим ступенем спорідненості і досить відособлену, щоб їй можна було присвоїти таксономічну категорію того чи іншого загальноприйнятого в систематиці рангу. У 8 радіотаксонах А.Х. Сперроу об'єднав організми за їх певною властивістю – радіочутливістю. Деякі з них включають представників декількох класів і навіть царств – наприклад, таксон 5 об'єднує дріжджі, бактерій і ссавців.

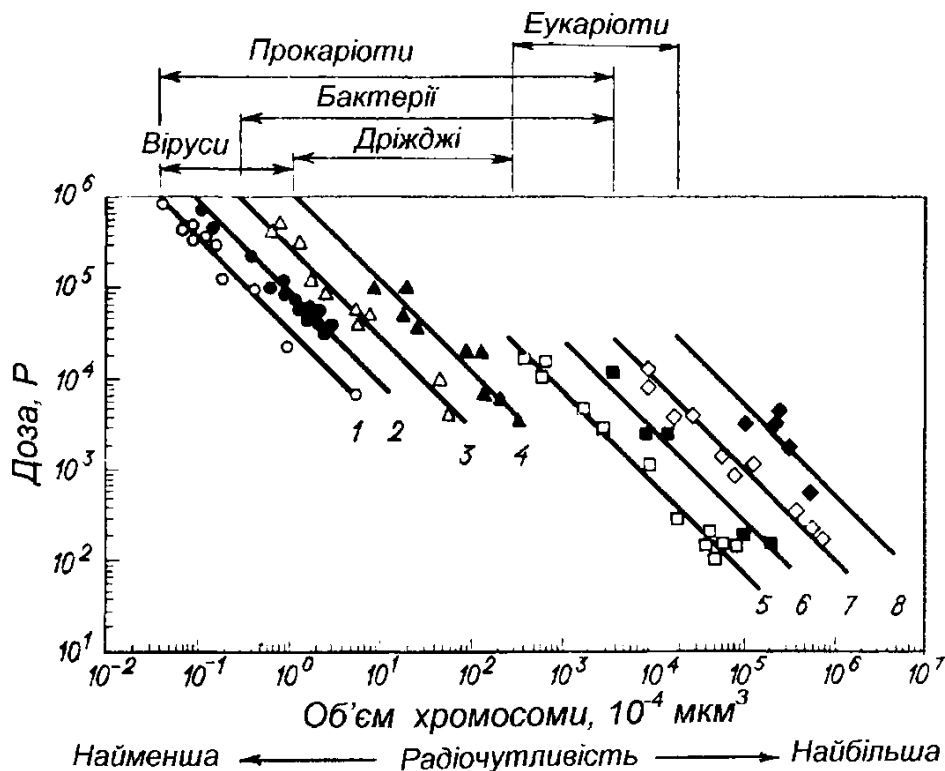


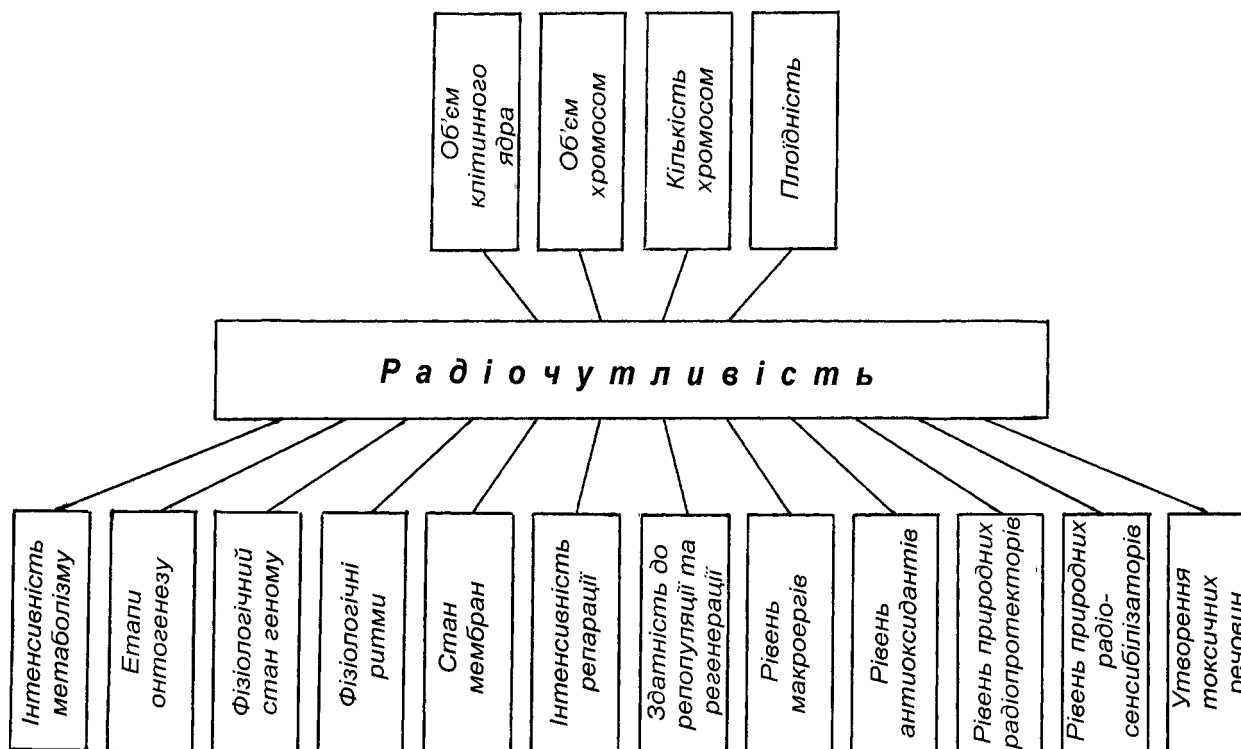
Рис. 5.10. Зв'язок між об'ємом хромосом і дозою опромінення для 8 радіотаксонів (А.Х. Сперроу та ін., 1968): 1 – РНК-віруси, 2 – ДНК-віруси, 3 – ДНК-віруси, 4 – віруси, 5 – дріжджі, бактерії, ссавці, 6 – бактерії, водорості, амфібії, 7 – бактерії, рослини і 8 – водорості, папороті.

Були спроби пов'язати радіочутливість з плоідністю. І в радіобіологічній літературі є немало даних про те, що з кратним збільшенням кількості хромосом в клітинах (поліплоїдія) уражуюча дія опромінення знижується. Встановлено також, що збільшення кількості хромосом (або плечей хромосом), не зв'язане з поліплоїдією, також має значний вплив на радіостійкість. В усякому разі з двох видів рослин, що мають один і той же середній об'єм ядра, але різну кількість

хромосом, вид з більшою кількістю хромосом, як правило, має більш високу радіостійкість. Так, у різних видів заячої капусти зі збільшенням кількості хромосом з 20 до 66 без зміни плоідності радіостійкість зростає майже удвічі.

Не дивлячись на те, що структурні характеристики клітин є дуже важливими при оцінці радіочутливості видів, вони – далеко не єдині параметри, відповідальні за неї. Ще у ранніх роботах з вивчення радіобіологічних ефектів дослідники звернули увагу на те, що важливу роль в їх формуванні відіграє фізіологічний стан клітин і організму в цілому, функціональний стан генетичних структур, наявність в організмі ендогенних речовин з радіомодифікуючими властивостями. Так, у деяких роботах вказується на кореляцію радіочутливості із вмістом в насінні та рослинах жиру і ненасичених жирних кислот, аскорбінової кислоти, каротину, різних біологічно активних речовин, солей деяких металів, сульфгідрильних сполук та інших звичайних метаболітів, в тому числі й таких, що можуть негативно впливати на організм, посилювати дію випромінювань. Важливе значення у забезпеченні радіостійкості відводяться здатності до післярадіаційного відновлення. Основні фактори, що визначають радіочутливість організму наведені на рис. 5.11.

Структурні фактори



Функціональні фактори

Рис. 5.11. Фактори, що визначають радіочутливість організму (І.М. Гудков, 2003).

Узагальнюючи вищевикладене, можна сказати, що радіочутливість організму визначається багатьма факторами. І тому навряд чи вдасться знайти чітку і визначену залежність між її значенням і якою-небудь окремою ознакою організму. Але, все-таки, нерівнозначність цих факторів очевидна. Цілком можливо, що, накопичивши достатньо експериментального матеріалу про залежність

радіочутливості від найрізноманітніших факторів, можна буде виділити основні з них і, вносячи відповідні поправки, виразити кількісно кореляції між радіочутливістю різних видів і комплексом їх певних біологічних властивостей.

4. Порівняльна радіочутливість клітин на різних фазах розвитку. Від мітозу до мітозу клітина проходить ряд етапів, які супроводжуються різними біохімічними процесами, змінами в структурі хромосом і складі речовин ядра. *Клітинний цикл, або життєвий цикл клітини, – це час між однаковим станом материнської і дочірньої клітин, тобто існування клітини від поділу до наступного поділу.* Звичайно його поділяють на дві фази: інтерфазу, протягом якої відбуваються процеси накопичення попередників ДНК, подвоєння ДНК і формування складного молекулярного апарату, який забезпечує мітоз; і саме мітоз, коли відбувається власне поділ клітини з розподілом матеріалу ядра між дочірніми клітинами. Інтерфаза, в свою чергу, складається з трьох строго послідовно змінюючих одна одну фаз: пресинтетичної, або постмітотичної, (G_1 -) фази, синтетичної (S-) фази, в якій відбувається синтез ДНК, та постсинтетичної, або премітотичної, (G_2 -) фази, за якою і слідує мітоз (M-фаза). Він в свою чергу складається з послідовно змінюючих одна одну фаз: профази, метафази, анафази і телофази.

Явище затримки поділу клітин при дії радіації, оцінюване по зменшенню кількості мітотичних клітин в меристемах, швидкості розмноження одноклітинних організмів та іншим ознакам було відоме давно.

Але порівняно недавно саме з розробкою методів оцінки тривалості окремих фаз клітинного циклу було встановлено, що така затримка є наслідком його блокування у певні періоди, приурочені, як правило, до фази підготовки синтезу ДНК і мітозу. Саме тому збільшення тривалості циклу при опроміненні переважно відбувається за рахунок зростання часу перебування клітин у G_1 - і G_2 -фазах при відносній стабільності S- і M-фаз (рис. 5.12).

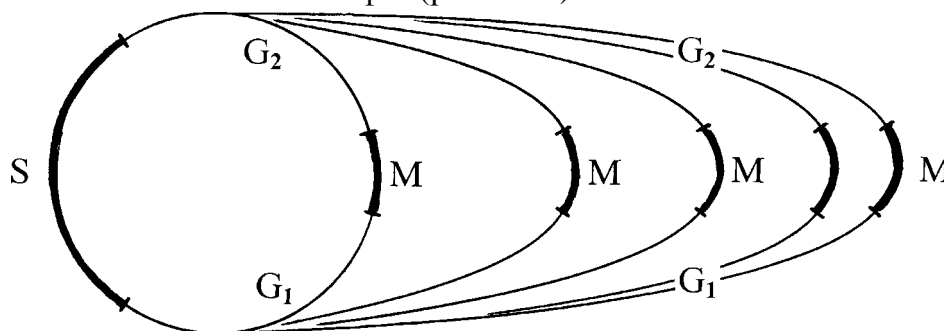


Рис. 5.12. Схематичне зображення збільшення тривалості клітинного циклу за рахунок G_1 - і G_2 -фаз при дії іонізуючої радіації.

Оскільки характер біохімічних процесів залежить від фази клітинного циклу, можна чекати певних відмінностей у радіочутливості клітин при їх опроміненні в окремі фази. Для проведення таких досліджень необхідно мати популяції клітин, в яких всі клітини, або у крайньому разі їх більшість, в момент опромінення

знаходяться в певній фазі циклу. Культури клітин з такими властивостями одержують штучно і називають синхронними, тобто такими, що проходять фази циклу одночасно, на відміну від асинхронних, якими вони є у природі.

Дослідження радіочутливості фаз клітинного циклу у вищих рослин звичайно вимагає застосування хімічних методів синхронізації поділу клітин в меристемах. Хімічні синхронізатори – це, як правило, мітотичні отрути, які в певних концентраціях мають властивість зворотно блокувати клітинний цикл у певній його фазі. Для синхронізації клітинного поділу рослини деякий час, що повинен бути не менше тривалості їх клітинного циклу (до доби), вирощують на поживному середовищі з синхронізатором. Поміщені після такого блоку в звичайне поживне середовище клітини меристем «стартують» водночас і деякий час синхронно рухаються по циклу.

Найбільш ефективним синхронізатором для багатьох типів клітин, в тому числі і рослинних, є оксисечовина – специфічний інгібітор синтезу ДНК, який блокує перехід клітин із G1- в S-фазу. Витримавши рослини певний період часу, протягом якого всі клітини пройдуть через цикл і зупиняться на цьому рубежі, в подальшому можна, висадивши їх на чисте поживне середовище і опромінюючи їх через різні проміжки часу, тобто у відповідності з послідовним проходженням окремих фаз, оцінити їх радіочутливість.

Наведені на рис. 5.13 криві свідчать про те, що радіочутливість меристеми коренів гороху і кукурудзи в залежності від фази клітинного циклу і періоду, в якому знаходяться її клітини, за абсолютними значеннями півлетальних доз розрізняються в 2,2–2,5 рази, варіюючи від 5,8 до 12,8 Гр у гороху і від 13 до 28 Гр у кукурудзи. В порядку зростання радіочутливості клітини можна розмістити в такій послідовності: горох – рання G1-фаза, середина S-, пізня S-, рання S-фаза, пізня G1-, M і G2-фаза; кукурудза – середина S-фази, пізня -S, рання G2-, рання -S, G1-, M і пізня G2-фаза.

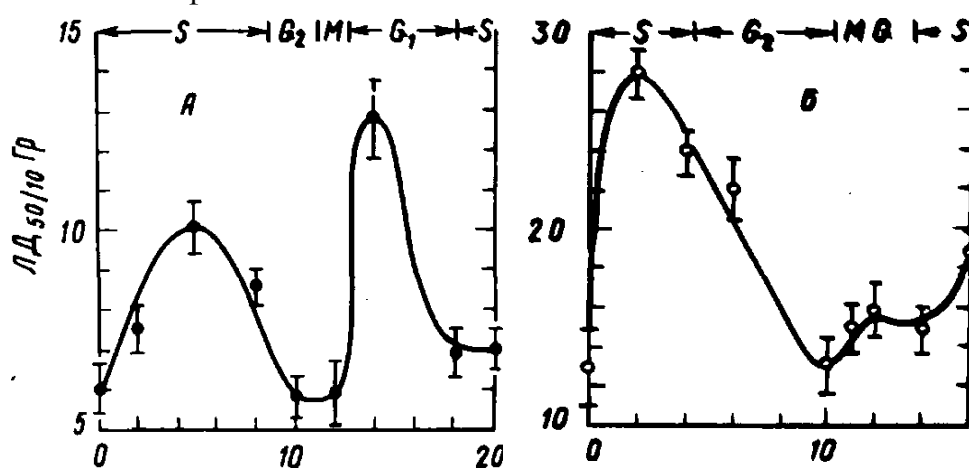


Рис. 5.13. Варіювання радіочутливості клітин кореневої меристеми гороху (а) і кукурудзи (б) в залежності від фази клітинного циклу (І.М. Гудков, 1985).

Незважаючи на відмінності в радіочутливості рослин гороху і кукурудзи, тривалості їх клітинного циклу і відносного вкладу в цикл окремих фаз, можна

виділити декілька загальних періодів, що характеризують радіочутливість окремих фаз. В обох видів максимальну радіочутливість мають клітини, які знаходяться в G2-фазі і мітозі, але в кукурудзи, тривалість у якої G2-фазі майже утричі більша, ніж у гороху, висока радіочутливість характерна лише для кінця цієї фази. Високу радіостійкість клітини обох видів мають в середині S-фази. На початку і в кінці цієї фази вони були більш радіочутливі.

Вивчення радіочутливості фаз досить короткого мітозу утруднене. Вважається, що всі вони характеризуються високою радіочутливістю, яка варіює в певних межах. Найбільш радіостійкий мітоз в своїй початковій фазі – в профазі, найменш – в метафазі і анафазі.

В клітинних популяціях, що постійно оновлюються, якими є і меристеми вищих рослин, проходження клітинами послідовної серії клітинних циклів утворює єдиний складний процес, в якому один поділ певним чином визначає настання наступного. Але під впливом різноманітних зовнішніх факторів і внутрішніх регуляторних механізмів в певних ситуаціях перебіг цієї складної послідовності біохімічних реакцій і структурних перетворень може зупинитися. В такому випадку клітина опиняється поза циклом поділу, переходячи в стан спокою, який прийнято позначати як G₀- фазу.

У рослин виділяють два типи клітин, що перебувають в стані спокою: клітини, дифузно розподілені серед клітин меристеми, що активно діляться, і клітини тканин, які перебувають в стані спокою. До останніх в коренях відносять клітини центру спокою – особливої групи клітин, які розміщені на самому кінці кореня на межі з кореневим чохлаком, в пагоні – клітини так званих меристем очікування і пазушні бруньки, Клітини, що знаходяться в стані спокою, як і клітини сухого насіння, повинні мати підвищену порівняно з тими, що діляться, стійкість до ушкоджуючих чинників. Є немало доказів того, що G₀-клітини більш радіостійкі, ніж ті, які активно діляться, перебуваючи в будь-якій фазі клітинного циклу.

Таким чином, радіочутливість клітин в залежності від фази і періоду клітинного циклу, в яких вони знаходяться, варіює в досить широких межах, Але завдяки асинхронності поділу клітин в природних умовах в усіх тканинах, як в меристемах рослин, так і в будь-яких постійно оновлюваних тканинах тварин, водночас забезпечується наявність як радіочутливих, так і радіостійких клітки. Це зумовлює стабільність стійкості цих органів до дії різних несприятливих факторів, в тому числі і іонізуючої радіації, виключаючи появу періодів, в яких разом зі вступом клітин в чутливі фази вони всі разом можуть виявитися особливо уразливими до пошкодження.

Щодо клітин, які знаходяться у спокої, то можна припустити, що перехід клітин у цей стан є способом утворення резервів, які мають високу стійкість до різноманітних чинників і здатні відновлювати клітинну популяцію і окремі органи в післярадіаційний період.

Все сказане про радіочутливість окремих процесів і функцій рослин цілком

справедливо і по відношенню до тварин. І в тваринному організмі ураження ДНК є головною причиною виникнення всіх радіобіологічних ефектів. І в тваринному організмі синтез РНК, білків, інших метаболічних процесів є порівняно більш радіостійкими. Так само, як у рослин, в тканинах тварин, що постійно оновлюються, радіочутливість клітин варіює в залежності від фази клітинного циклу.

5. Критичні органи. Міркування про варіювання радіостійкості клітин в залежності від фази клітинного циклу перш за все відносяться до клітин тих тканин, які знаходяться в стані поділу. Клітини таких тканин у відповідності з законом Бергонье-Трибондо повинні мати високу радіочутливість. І хоча в організмі рослин і тварин вони складають не більше відсотку від усієї маси клітин диференційованих і спеціалізованих тканин і органів, саме вони визначають радіочутливість організму. Вони одержали назву критичних органів.

Критичні органи – це життєво важливі структури, тканини і органи, ушкодження яких при опроміненні організму викликає значні порушення його життєдіяльності аж до загибелі.

Поняття про критичні органи вперше склалося в радіобіології тварин, і до них належать такі постійно оновлюючі органи і тканини, як кровотворні, в тому числі червоний кістковий мозок, епітелій шлунково-кишкового тракту, ендотелій судин, статеві залози, кристалик ока та деякі інші. Саме вони є найрадіочутливішими тканинами ссавців, відповідальними за результат захворювання, що виникає при певній формі радіаційного ураження, саме їх пошкодження приводить до розвитку кістково-мозкового і шлунково-кишкового синдромів, зумовлюючи променево хворобу і загибель організму.

У вищих рослин аналогічні властивості мають меристеми – твірні тканини, які довгий час (іноді все життя) зберігають здатність до поділу і утворенню нових клітин, а також диференційованих похідних. Внаслідок високої метаболічної активності клітини меристем, як і критичних органів ссавців, мають надзвичайно високу чутливість до опромінення. Їх радіочутливість в десятки і сотні разів вища за радіочутливість диференційованих і спеціалізованих тканин. Радіаційне ушкодження меристем веде до пошкодження і променевої хвороби всієї рослини, а загибель цих тканин – до загибелі рослини. Саме тому меристеми рослин цілком обґрунтовано було названо критичними органами вищих рослин (І.М. Гудков, 1975). З цих позицій радіостійкість рослин варто розглядати перш за все як радіостійкість їх меристем, яка визначається здатністю зберігати постійним клітинний склад і підтримувати нормальні темпи клітинного розмноження за умов опромінення іонізуючою радіацією в певному діапазоні доз.

За аналогією з ссавцями та іншими тваринами до критичних органів слід віднести у вищих рослин і їх генеративні органи, які також мають високу радіочутливість.

6. Особливості дії на живі організми малих доз іонізуючих випромінювань.

При формулюванні на початку лекції поняття «радіочутливість» підкреслювалось, що під ним слід розуміти здатність організму реагувати на мінімальні дози випромінювань. Але яку ж дозу можна назвати мінімальною? Якщо говорити про стимулюючий ефект, то, як свідчать дані для проростків бобів вона складає 0,1–0,2 Гр, а для проростків ріпаку досягає 5 Гр. Дія проростків гороху стимулююча доза більш як на порядок нижча, ніж для насіння – 0,35–0,5 Гр. Таким чином, поняття «малої дози», або мінімальної, яка здатна викликати певний чи будь-який радіобіологічний ефект, відносно і залежить від радіочутливості організму.

Чисельними дослідженнями на тваринах також було показано, що дози порядку 0,01–0,3 Гр, тобто зіставимі з останніми, не викликають якихось видимих пошкоджень в організмі, а сприяють активізації багатьох функцій (збільшення виводимості курчат при опроміненні яєць, прискорення росту і розвитку, підвищення їх плодючості). Більш того, є дані, що малі дози сприяють збільшенню тривалості життя тварин. Чи можна на основі цього зробити висновок, що коли великі дози іонізуючих випромінювань шкідливі для всього живого на Землі, то малі не тільки не шкідливі, але при певних умовах можуть виявитися корисними? Питання це далеко не риторичне, воно цілком правомірне. Але дати на нього однозначну відповідь не просто.

Дійсно, існує точка зору, що все живе на Землі сформувалось в умовах підвищених в порівнянні з теперішніми доз іонізуючих випромінювань, і що радіація була одним з основних рушіїв еволюції, яка породила таке велике різноманіття видів живих організмів. Але чи можна на основі цього вважати, що так звані «малі дози», тобто ті, які ненабагато перевищують рівень природного радіаційного фону, можуть проявляти позитивну дію на живі організми? Факти суперечливі.

Так, навіть при дозах, що спричиняють до стимулюючого ефекту у рослин при γ -опроміненні насіння, кількість аберацій хромосом в клітинах їх меристем збільшується в декілька разів (рис. 5.14). Не викликає сумніву, що і в генеративних органах при цих дозах кількість мутацій повинна збільшуватися. Якщо говорити тільки про сільськогосподарські рослини і сільськогосподарських тварин, які опромінюють з метою збільшення продуктивності, то це не має великого значення. Тим більше, це існуюча система періодичного оновлювання насінневого матеріалу і племінного стада практично виключає поширення індукованих мутантів.

Але поява мутацій в статевих клітинах людини при «малих дозах» несе загрозу виникнення в наступних поколіннях (як вже відмічалось, аж до 20 покоління) генетичних порушень. Саме на подібні факти спирається концепція безпорогової дії іонізуючої радіації, яка стверджує, що немає нешкідливих доз, тобто якою б малою не була доза, пропорційно ній в організмі виникатимуть, чи можуть виникати, зміни, в тому числі і спадкові.

Проте, відомі дані і іншого роду. Деякими авторами показано, що є все-таки «дуже малі дози», при яких рівень мутацій навіть знижується у порівнянні з

вихідним. Так, за даними Х. Старла (1982) для клітин ссавців це доза до 0,02 Гр. При дозі 0,05 Гр він уже відмічав підвищення рівня аберацій хромосом в лімфоцитах крові в порівнянні з нормою. За даними Ю.О. Митрофанова (1987) доза, що знижує рівень аберацій хромосом у рослин скереди, складає величину порядку 0,05–0,1 Гр.

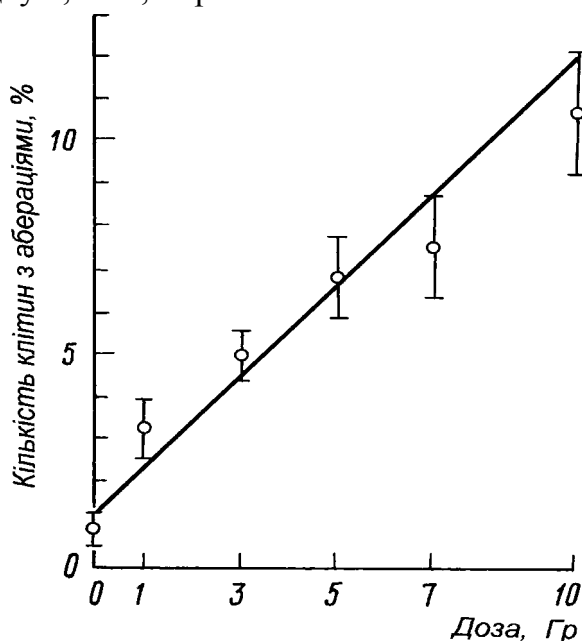


Рис. 5.14. Вплив γ -опромінення насіння гороху в малих дозах, в тому числі і стимулюючій дозі (3 Гр), на кількість аберацій хромосом к клітинах меристеми кореня (І.М. Гудков, 1985).

Ці автори схильні пояснювати зниження кількості мутацій в клітинах індукцією «дуже малими дозами» випромінювань процесів молекулярної репарації ДНК, і саме можливість репараційного відновлення ДНК, є головним аргументом, який висувають противники концепції безпорогової дії випромінювань. Хоча, враховуючи імовірнісний характер як радіаційного ураження, так і репараційного відновлення, існування порогового значення дози, тобто такого, при якому пошкодження клітини можуть повністю ліквідуватися, більшістю радіобіологів не визнається.

Відомі дані про те, що різні організми, в тому числі й рослини, опромінені не тільки у великих, але й у малих дозах іонізуючої радіації, в більшій мірі піддані різним інфекційним захворюванням. Це свідчить про зниження їх імунітету і, зокрема, є однією з причин незадовільного відтворення ефекту стимуляції при передпосівному опроміненні насіння сільськогосподарських культур.

Особливе значення в проблемі вивчення біологічної дії малих доз іонізуючих випромінювань має хронічне опромінення. Вже відзначалось, що на Землі існують досить великі провінції і цілі регіони, де рівень природного радіаційного фону в десятки і навіть сто разів перевищує звичайний. Але немає статистичне достовірних даних про їх шкідливий вплив на живі організми, в тому числі і на людину. Є дані, одержані у спеціально поставлених експериментах в умовах особливих камер, глибоко розміщених від землею приміщень, в шахтах, які нібито

свідчать про те, що зниження такими шляхами природного радіаційного фону в декілька разів веде до сповільнення розмноження найпростіших організмів, поділу клітин рослин, розвитку личинок комах і лабораторних тварин. Але нібито варто було за допомогою штучного джерела опромінення відновити звичайний рівень радіації, як процеси росту та розвитку нормалізувалися.

Таким чином, напрошується простий і однозначний висновок – для нормального розвитку всього живого необхідний певний рівень його постійного опромінення іонізуючою радіацією, що і забезпечує природний радіаційний фон.

Слід відзначити, що кількість подібних дослідів, які дозволяють дійти таких висновків, недостатньо велика, методично вони далеко не завжди досконалі, зрештою, вони дуже погано відтворюються. Саме тому їх результати заперечуються багатьма радіобіологами. Тим більше, що їх важко пояснити, вони суперечать загальноприйнятим поняттям. Проте, і ігнорувати їх також не можна.

На жаль, поки що радіобіологія не має достатньо достовірних даних про можливий вплив підвищеного або зниженого фону радіації на окремі реакції організму і, зокрема, на генетичні наслідки, частоту спадкових захворювань. Будь-який негативний в цьому відношенні факт, навіть один на тисячу позитивних, примушує бути обережним по відношенню до поспішних і однозначних висновків, особливо, якщо мова іде про здоров'я людини. І хоча деякі дослідники беруть на себе сміливість говорити про нешкідливі або навіть корисні дози іонізуючих випромінювань, часом проводячи паралелі з отрутами, які в малих дозах можуть перетворюватися в цілющі ліки, переважна більшість радіобіологів відверто визнають, що наших знань поки що недостатньо, щоб, враховуючи величезну відповідальність перед людством, дати які б то не було рекомендації по відношенню абсолютно нешкідливих рівнів випромінювань.

Тому в радіобіології, як і в різних сферах господарсько-корисної діяльності людини, використовується імовірнісний підхід до оцінки ступеня ризику при дії фактора – в даному випадку він отримав назву «концепції біологічного ризику впливу іонізуючого випромінювання». При оцінюванні імовірних наслідків опромінення враховується не тільки ступінь ризику, а й біологічна важливість спричиненого порушення, яка порівнюється з імовірністю його виникнення при дії інших негативних факторів, з якими людина постійно стикається в процесі життєдіяльності. Вирішення проблеми полягає в оцінці оптимального співвідношення відомої небезпеки впливу певного фактору і переваг його використання в інтересах людини.

У повсякденному житті людина постійно піддається ризику підірвати здоров'я і скоротити тривалість свого життя. З розвитком досягнень цивілізації імовірність такого ризику, як правило, зростає. Провідне місце займають травми і загибель в транспортних катастрофах та при пожежах, отруєння угарним газом і отруйними парами, пестицидами і іншими хімічними речовинами. Ще більша імовірність загибелі в результаті злоякісних новоутворень, серцево-судинних захворювань, судинних уражень центральної нервової системи, також в тій чи

іншій мірі пов'язаних з науково-технічним прогресом.

Так, в Україні щорічно тоне у водоймах близько 4 тисяч чоловік, тобто частота випадків на 1 мільйон населення, як прийнято розраховувати ступінь ризику, складає 89 випадків в рік. Приблизно так ж кількість жертв пожеж. Щорічно гине в дорожньо-транспортних пригодах близько 9 тисяч чоловік, тобто на 1 мільйон 200 випадків у рік. Для деяких інших країн останній показник ще вище: для Австралії – 220, для Німеччини – 233 випадки. Але і при таких вражаючих показниках ступеня ризику жодна країна не ставить питання про закриття пляжів і скорочення транспортного парку чи зменшення перевезень.

Спонтанна частота виникнення злоякісних пухлин в різних регіонах світу складає 1000–2000 випадків на 1 мільйон населення в рік, з яких більше половині завершується смертю. На превеликий жаль, для України ця цифра значно вища – щорічно від хвороб цього типу вмирає 70–80 тисяч чоловік.

На цьому тлі цифри радіаційного ризику виглядають досить скромно. Так, частота появи у людини добре вивченого захворювання кровотворної системи лейкемії – одного з характерних захворювань, індукованих іонізуючою радіацією з класу злоякісних, при дозі 0,01 Гр дорівнює 1–2 випадкам в рік при „звичайній” його частоті 50 випадків в рік на 1 мільйон населення. Сумарний же ризик виникнення всіх видів пухлин при цій дозі складає 3–6 випадків у рік. Слід відмітити, що доза 0,01 Гр може бути отримана людиною протягом року лише при 20–50-кратному збільшенні природного радіаційного фону. Така ситуація перебувала в деяких регіонах України і Білорусі протягом декількох місяців в 1986 р. безпосередньо після аварії на Чорнобильській АЕС. У теперішній час вона існує тільки на деяких ділянках зони відчуження.

Все це свідчить про надзвичайну складність і важливість проблеми дії на організм малих доз іонізуючої радіації. В даний час це одна з "гарячих точок" радіобіології, до якої прикута увага найрізноманітніших її напрямів.

Отже, проблема радіочутливості організмів є провідною в радіобіології. І вона актуальна не стільки з академічної точки зору вивчення рівня радіочутливості організмів різних систематичних груп, що, безперечно, дуже важливо і цікаво, скільки з позицій дослідження причин їх різної радіочутливості. Адже розуміння феномену надзвичайно високої радіостійкості деяких видів – це ключ до вирішення одного з головних завдань радіобіології – оволодіння керуванням радіобіологічними реакціями шляхом пошуку засобів їх модифікації і перш за все шляхів протирадіаційного захисту і післярадіаційного відновлення.

Тема 6

Радіоактивне забруднення навколишнього середовища

1. Шляхи надходження радіонуклідів до живих організмів
2. Радіоактивне забруднення атмосфери
3. Міграція радіонуклідів у атмосфері
4. Радіоактивне забруднення води
5. Міграція радіонуклідів у водоймах
6. Радіоактивне забруднення ґрунту
7. Міграція радіонуклідів у ґрунті
8. Радіоактивне забруднення рослин
9. Радіонукліди в лісі
10. Групи лікарських рослин за інтенсивністю накопичення радіонуклідів
11. Радіоактивне забруднення тварин
12. Вплив тварин на міграцію радіонуклідів

1. Шляхи надходження радіонуклідів до живих організмів

У результаті випадання радіоактивних речовин забруднюються такі компоненти природного середовища, як атмосферне повітря, ґрунтовий покрив, водні маси, рослини, тварини тощо. Радіоактивне забруднення може відбуватися такими шляхами:

- аерозольним (поверхневим забрудненням);
- контактним (контакт із забрудненими поверхнями);
- біологічним (структурним забрудненням).

Аерозольне зараження – це проникнення радіонуклідів через повітря з подальшим осіданням на поверхню землі та інших об'єктів. При цьому радіоактивні речовини проникають на різну глибину залежно від пористості й агрегатного стану речовини.

Контактне зараження відбувається при безпосередньому контакті об'єкта із зараженою поверхнею (наприклад, при перевезенні сировини (продукції) на забрудненому транспорті, пакуванні у забруднену тару, переробці на забрудненому обладнанні і т.ін.)

Біологічний шлях зараження. Радіоактивні речовини включаються в процеси біологічної циркуляції й обміну речовин, що відбуваються в біосфері, унаслідок чого вони потрапляють у харчову сировину рослинного походження через кореневі системи і листя, і далі всередину організму тварин і птахів – з повітрям, водою і кормом. Радіоактивні речовини можуть потрапляти в організм людини з харчовими продуктами, просуваючись ланцюгами живлення.

У результаті просування ланцюгом живлення концентрація радіонуклідів зростає. Чим довший ланцюг, чим більше в ньому ланок, тим більшої концентрації можуть досягати радіонукліди. Так, на останній ланці ланцюга концентрація радіонуклідів на 4-5 порядків вища за початкову.

2. Радіоактивне забруднення атмосфери

Радіоактивні речовини мігрують різними шляхами. Це основні фактори, що обумовлюють перерозподіл первинного радіоактивного забруднення територій.

Основними джерелами радіоактивного забруднення навколишнього середовища є: 1. Індукування хімічних елементів космічним випромінюванням; 2. Ядерні вибухи та інші випробування, військова діяльність; 3. Теплові енергетичні станції; 4. Промислові комплекси з повним ядерним паливним циклом, атомна промисловість; 5. Неконтрольоване використання радіонуклідної сировини та матеріалів; 6. Добування радіоактивних руд; 7. Вулканічна діяльність планети; 8. Пожежі лісів, торфовищ тощо.

Звичайно ці джерела нерівномірні за потужністю забруднення, ізотопним і фазовим станом забруднювачів. У результаті взаємодії первинного космічного випромінювання (нейтронів, фотонів) з ядрами атомів кисню, азоту, аргону атмосфери утворюються космогенні радіонукліди, що потім надходять на земну поверхню з атмосферними опадами. Ця група представлена 20 радіонуклідами з періодами напіврозпаду від 32 хвилин до $7,4 \cdot 10^5$ років. Найбільш значні у радіоекологічному відношенні з них є наступні: ^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na , ^{24}Na .

Особливо велика кількість радіоактивних речовин виноситься в атмосферу при випробуваннях атомної та термоядерної зброї у повітрі. Це перше за значимістю джерело радіаційного забруднення навколишнього середовища. При ядерному вибусі утворюється біля 250 ізотопів 35 елементів як безпосередньо «осколків» поділу ядер важких елементів, так і продуктів їх розпаду з періодами напіврозпаду від кількох секунд до мільонів років.

Більшість цих радіонуклідів здійснюють одночасно бета- і гамма-випромінювання. При наземних і надземних випробуваннях радіоактивні частинки піднімаються на значну висоту, утворюючи своєрідні течії, що рухаються над Землею з швидкістю до 200 км/год. Радіоактивна хмара, що утворюється при вибусі ядерної бомби, може за два тижні обійти всю Землю. Радіоактивні частинки з атмосфери з опадами випадають на землю, а коли, де і в якій кількості вони випадуть після вибуху, точно передбачити неможливо. Частина радіоактивних продуктів випадає недалеко від місця випробування, певна частина їх затримується в тропосфері, підхоплюється вітром і переноситься на величезні відстані. Більша частина радіоактивних продуктів викидається в стратосферу на висоту понад 10-50 км. Там вони залишаються протягом багатьох місяців, повільно опускаючись і розсіюючись по всій поверхні Землі.

У сучасних найдосконаліших ядерних пристроях коефіцієнт використання заряду становить близько 20%. Частина елементів заряду (урану, плутонію), що не вступили в реакцію, розпилюються силою вибуху на найдрібніші частинки, що містять атоми з властивостями вихідних радіонуклідів, створюють радіоактивні хмари і розносяться вітром на величезні території. У результаті реакції активації в районі вибуху з'являється додаткове джерело радіоактивного забруднення.

На сьогодні нема жодного продукту біосфери, де б не були присутні

радіонукліди “бомбового” походження. Значні надходження радіонуклідів до навколишнього середовища становлять від використання кам’яного вугілля на паливо. У складі кам’яного вугілля, як і в інших земних породах, містяться природні радіонукліди.

На всіх етапах замкненого ядерного паливного циклу, починаючи з видобутку уранової сировини, її збагачення і закінчуючи переробкою відпрацьованого палива, захоронення високоактивних відходів, відбувається вивільнення штучних радіонуклідів у навколишнє середовище, а також прискорення темпів міграції важких природних радіонуклідів.

Нині атомна енергетика розвивається в основному для виробництва електроенергії, частка якої в загальному споживанні енергоресурсів становить близько 20%, а в деяких країнах – до 80%, в Україні – до 40%.

Атомна енергетика нині розвивається на основі реакторів на теплових і швидких нейтронах. Паливом у реакторах на теплових нейтронах є природній уран з вмістом 0,7% ізотопу ^{235}U і 99,3% ^{238}U , або природній уран, збагачений ізотопом ^{235}U до 2,8-4,4%. Уран перетворюють у порошок двоокису UO_2 , а потім спікають у паливні таблетки.

При роботі ядерних енергетичних установок радіонукліди утворюються в результаті поділу ядер палива і активації нейтронами матеріалів в активній зоні. Їх вміст зумовлюється часом експлуатації і часом, що минув з моменту зупинення реактора. Надто активні відходи діляться на три категорії: **високоактивні, середньоактивні і низькоактивні.**

3. Міграція радіонуклідів у атмосфері

Масштаби і інтенсивність міграції радіонуклідів в атмосфері визначаються наступним: ефективною висотою викидів їх в атмосферу, фазовим станом викидів, формою і дисперсністю частинок аерозолів, географічними координатами місця викиду, атмосферними умовами.

Залежно від впливу цих факторів виділяють локальні, тропосферні (нижній шар атмосфери висотою до 8-10 км) і стратосферні (шар атмосфери, що лежить над тропосферою від 10 до 80 км) – глобальні випадіння.

Локальні випадіння спостерігають у районі декількох сот кілометрів від джерела. Радіоактивні речовини локальних випадіннь поширюються в нижніх шарах атмосфери. Тривалість випадання залежить від пори року і широти місцевості.

Тропосферні випадіння спостерігаються при ядерних вибухах і великих аваріях на АЕС. Вибухи, потужністю в кілька кіловат тротилового еквіваленту, забруднюють в основному тропосферу. Могутні вибухи, мегатонної потужності, забруднюють стратосферу.

Умовно забруднення території України, Білорусі і Росії розбивають на чотири «сліди»: західний, північний, південний та північно-східний. Найбільш складний характер радіоактивного забруднення як за інтенсивністю, так і за складом основних нуклідів спостерігається на шляхах західного, північно-східного та південного слідів, що охоплюють практично повністю територію Українського

Полісся та значні території на південь від Києва.

Отже, шляхи міграції можна розділити на наступні:

- аеральне випадіння з атмосфери (сухе і вологе);
- водні міграції;
- поверхневими та внутрішньогрунтовими стоками;
- у процесі повторного перерозподілу внаслідок руху повітря;
- антропогенний;
- життєдіяльність різних живих систем.

4. Радіоактивне забруднення води

Забруднення води відбувається внаслідок потрапляння радіоактивних речовин у відкриті водойми. Радіоактивні частинки утворюють зависі у воді, частина яких осідає на дні, а частина розчиняється, заражуючи водоймища на всю глибину. Найбільшого радіоактивного зараження зазнають озера, ставки, річки з повільною течією, дощові й талі води. Забруднення повноводних річок виключається, тому що в них практично неможливе утворення високої концентрації радіонуклідів.

Вода відіграє надзвичайно важливу роль у життєдіяльності всіх живих організмів, тому що переносить мінеральні речовини, у тому числі радіоактивні. Унаслідок цього якість природних вод – один з основних чинників нормальної життєдіяльності людини. Рівень вмісту радіонуклідів і хімічний склад природних вод визначаються кліматичними умовами і геологічною будовою місцевості. Природна радіоактивність вод визначається наявністю таких природних радіонуклідів, як: ^{40}K , $^{234,235,238}\text{U}$, $^{224,226,228}\text{Ra}$, $^{230,232}\text{Th}$, $^{220,222}\text{Rn}$, ^{210}Po , ^{210}Pb . Концентрація урану, торію й радію особливо велика в підземних водах.

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

Радіоактивність озерних вод тісно пов'язана з хімічним складом води їх припливів і підземних вод.

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

Радіоактивні речовини, що містяться у водному середовищі, поглинаються, як і інші мінеральні елементи, рослинами і тваринами. Інтенсивність накопичення радіонуклідів водними організмами залежить від температури води та кількості завислих речовин.

5. Міграція радіонуклідів у водоймах

Радіонукліди у воду рік, що беруть початок у горах, можуть потрапляти з гірських порід, що в різних кількостях містять радіоактивні елементи та продукти їх розпаду (уран, торій, калій-40, родон тощо). Радіоактивність поверхневих вод завжди значно нижча, ніж підземних. Найбільше урану, радію, торію міститься в підземних водах уранових покладів. Зі збільшенням глибини підземних водних джерел концентрація радіонуклідів в них підвищується.

У воді підземних джерел, що використовується для пиття людиною і тваринами, допускається вміст радіонуклідів тільки природного походження і в кількості, що не перевищує максимально допустимі норми для відкритих водойм.

У воду можуть потрапляти радіонукліди штучного походження, що потрапляють з атмосфери, з дощовими і талими водами, з відходами атомних реакторів, з підприємств радіохімічної промисловості і різних інших, що застосовують радіоізотопи.

Гідробіонти (мікро- і макроорганізми накопичують і депонують в собі радіонукліди. Тому споживання води, що містить значний вміст гідро біонтів та мулу зростає можливість радіаційного ураження тварин і людини, які споживають воду що містить багато мулу і гідро біонтів.

Міграція радіонуклідів у водоймах забезпечується течіями, зоогідробіонтами, які поїдають фітогідробіонтів забруднених радіонуклідами.

Певне місце нині має використання забрудненої води для зрошування у сільському господарстві та промисловості. Особливо значна міграція радіонуклідів здійснюється у водоймах текучих. У водоймах можуть зустрічатися тритій, цезій, цирконій, стронцій тощо.

Радіонукліди накопичуються у поверхневому шарі води.

У ґрунті днища водойм концентрація радіонуклідів у десятки разів вища, ніж у воді, внаслідок їх адсорбції на поверхні мінеральних і органічних речовин. Тому гідробіонти, які ведуть бентосний (донний) або прибентосний спосіб життя, уражаються від радіаційного забруднення більшою мірою, ніж пелагічні (ті, які живуть у товщі води).

У залежності від інтенсивності опромінення радіація може здійснювати на гідробіонтів стимулюючий, пригнічуючий, ушкоджуючий або летальний вплив.

Як правило, з підвищенням рівня організації гідробіонтів, їх радіочутливість зростає. Найбільш стійкі до радіації бактерії. Деякі з них витримують опромінення понад 1 млн Рентген. Водні рослини більш стійкі до опромінення, ніж тварини.

Доза радіації, що обумовлює загибель 50% опромінених протягом 30 днів організмів наступна:

- для водних рослин – 0,1...0,5 Гр;
- для безхребетних – 0,01...2 Гр;
- для риб – 5...40 Гр (при високих температурах радіочутливість риб значно зростає);
- для вторинноводних ссавців – 2...5 Гр.

Спостерігається певною мірою вибірковість накопичення окремих радіонуклідів різними видами гідробіонтів. Наприклад, цезій найбільш енергійно накопичується в бурих і червоних водоростях, стронцій-90 – у радіоляріях та кісткових риб, тритій – у ракоподібних, ікрі риб, цезій-114 - в актиніях тощо.

6. Радіоактивне забруднення ґрунту

Концентрація природних радіонуклідів у ґрунті змінюється у широких межах і залежить від інтенсивності ґрунтоутворювальних процесів. Радіоактивного

калію у ґрунтовому покриві міститься найбільше (до 2,5% його маси), тоді як урану, торію чи радію у сотні й мільйони разів менше (урану-238 - $3 \cdot 10^{-4}$ %).

Значною є різниця концентрації РН у ґрунтах різних типів. Якщо у дерново-підзолистих ґрунтах щільність ^{40}K лише 4 пКі/г, то у чорноземах перевищує 11 пКі/г.

Важливими кількісними показниками є повнота поглинання радіонуклідів (сорбція) і стійкість їх закріплення в поглиненому стані. Наприклад, якщо порівняти стійкість закріплення в поглиненому стані ^{90}Sr і ^{137}Cs , то виявиться, що з усіх ґрунтів ^{90}Sr витісняється в більшій кількості, ніж ^{137}Cs (тобто поглинений цезій закріплюється міцніше). На різних ґрунтах стійкість закріплення радіонуклідів неоднакова. Міцніше вони закріплюються в чорноземі.

На сорбційні процеси у ґрунтах впливає дисперсний (гранулометричний) склад ґрунтів. Ґрунти, які утримують більшу кількість високодисперсних частинок (розміром менше 0,001 мм), характеризуються високою ємністю поглинання, у якій поглинається до 77% від загального вмісту радіонуклідів у ґрунті. Відмінності в повноті сорбції радіонуклідів і ступені їх закріплення різними мінералами зумовлені перш за все різною будовою кристалічної ґратки мінералів.

Найбільш високі рівні забруднення стронцієм спостерігаються на дерново-підзолистих ґрунтах, менші - на сірих лісових ґрунтах і сіроземах і найнижчі - на чорноземах. Аналогічна залежність установлена і для цезію. Загалом цезій, на відміну від стронцію, сорбується (закріплюється) мінералами стійкіше, зокрема, глинами. За однакової щільності забруднення ґрунту радіаційна небезпека від стронцію у 6 разів вища, ніж від цезію. Щоб зменшити ступінь міграції, проводять агрохімічні заходи: вапнування кислих ґрунтів, бідних на обмінний кальцій, внесення органічних добрив - перегною, торфу, намулу, гною. Так, для зниження надходження стронцію застосовують фосфорні, а для цезію - калійні добрива.

Поглинання ґрунтами радіонуклідів перешкоджає їх пересуванню за профілем ґрунтів і подальшому проникненню в ґрунтові води. Так, радіоактивні елементи на природних луках, сіножатях і пасовищах затримуються у верхньому шарі завтовшки 0-5 см, а на ріллі переважно в орному шарі.

Техногенні радіонукліди надходять у ґрунтовий покрив переважно з атмосфери. Вже через декілька років після випадання радіоактивних речовин на земну поверхню більша їхня частина потрапляє у тканини рослин, а звідти - у корм тварин та їжу людини. Як показала аварія на ЧАЕС, уже на другий рік після випадання радіоактивних опадів основний шлях потрапляння радіонуклідів у харчові ланцюги - надходження їх з ґрунту в рослини.

7. Міграція радіонуклідів у ґрунті

Незалежно від типу ґрунту велика кількість нуклідів затримується у верхній частині ґрунтового профілю (0-10 см). Вміст радіонуклідів поступово зменшується з глибиною.

Міграція радіонуклідів у ґрунті залежить від хімічних властивостей радіоактивних елементів, стану та форми їх розміщення: дифузія в ґрунтовому

розчині та перенесення з гравітаційною течією води. Під час конвективного перенесення вологи радіонукліди мігрують у ґрунті не лише в розчиненому стані, але й у стані твердої форми.

Міграція радіонуклідів у ґрунті може здійснюватися поверхневими та ґрунтовими стоками води, процесами дефляції (перенесення ґрунтових мас водою), вітрової ерозії (перенесення ґрунтових мас вітром), тваринами. Певне місце у цьому має і антропогенний фактор, зокрема, сільськогосподарська, транспортна, будівельна, вугільно- та руднодобувна діяльність тощо.

Рослинний покрив та тварини є важливим регулюючим фактором перерозподілу радіонуклідів у ґрунті. Є повідомлення про те, що, наприклад, рапс підіймає радіонукліди глибини на поверхню ґрунту, здійснюючи якби вертикальну міграцію радіонуклідів у ґрунті. Певною мірою міграція радіонуклідів залежить і від типу ґрунту, а також ізотопного складу радіоактивних частинок, рельєфу. Так, радіонукліди, як і більшість елементів мінерального живлення рослин, мають підвищену рухливість і здатність надходити в рослини у кислому середовищі.

За певних умов вітром можуть підійматися радіоактивні частинки з ґрунту у повітря й осідати на ґрунт, рослини, водойми уже в іншому місці.

Вони можуть змиватися з поверхні ґрунту дощовим й талими водами з площ водозборів у водойми, забруднюючи їх додатково. Із рештками рослин, відходами тваринництва радіоактивні речовини знову потрапляють у ґрунт і знову починають свій шлях ланцюгами живлення.

8. Радіоактивне забруднення рослин

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

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

Особливість аерозольного шляху надходження полягає в тому, що при безпосередньому осіданні радіоактивних частинок з різних шарів атмосфери відбувається пряме забруднення надземної маси рослин (листя, гілок, стовбура тощо) усіма радіонуклідами, що випадають.

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

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

Найбільш чутливі до радіації в різних фазах розвитку квасоля, кукурудза, жито, пшениця; більш стійкі – льон, конюшина, люцерна, рис, томати.

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 потраплянні 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 потраплянні 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.

Механізм засвоєння радіонуклідів корінням рослин подібний до поглинання основних поживних речовин макро- і мікроелементів. ^{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. Рослини, які утримують більше кальцію, накопичують ^{90}Sr більше, а рослини, що відрізняються високим вмістом калію, накопичують більше ^{137}Cs .

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

Забруднення продукції рослинництва радіонуклідами залежить і від типу і властивостей ґрунтів, на яких зростають рослини. Тому концентрація радіонуклідів у рослинах на різних ґрунтах у різних ґрунтово-кліматичних зонах при одному й тому самому рівні забруднення може відрізнятись в десятки разів.

9. Радіонукліди в лісі

Ліс найбільшою мірою накопичує радіонукліди, окрім того, ліс найдовше їх утримує. Найінтенсивніше радіонукліди накопичуються в ростучих частинах організму рослин. Так, у рослин до таких частин відносяться листя, плоди, ягоди, молоді пагони, внутрішня частина кори, колючки, а найменше радіонуклідів у деревині. Рослини є основними переносниками радіоактивних речовин з ґрунту в організм тварин і людини. Хоча на переході ґрунт – рослина можна досить істотно впливати на нагромадження радіоактивних речовин сільськогосподарськими рослинами. Радіонукліди надходять у рослини тоді, коли вони переходять у ґрунтові розчини. Цей процес, як і взагалі рухомість речовин, прискорюється у кислому середовищі.

Радіоактивне забруднення продукції рослинництва залежить не тільки від ступеня забруднення ґрунту, але й від його здатності до зв'язування і утримування радіонуклідів. Ця здатність визначається фізико-хімічними та агрохімічними властивостями ґрунтів. Наприклад, на Поліссі вона найслабкіша, значно вища – у сірих лісових, ще вища у чорноземів Лісостепу. Накопичення радіонуклідів

залежить також від фітомаси. Так, завжди радіонуклідів більше в наземній частині рослини, а серед наземної – в ягодах, плодах.

Особливе місце в екосистемі лісу займають гриби. Внесок грибів у біологічний кругообіг Cs у кілька разів перевищує внесок деревного і трав'янисто-чагарникового ярусу. Гриби є одним із головних факторів, що визначають роль підстилки як біохімічного бар'єру на шляху вертикальної міграції радіонуклідів у лісових екосистемах.

Значну небезпеку в перерозподілі радіоактивних частинок становлять лісові пожежи, внаслідок яких різко знижується радіомісткість лісових екосистем, оскільки радіоактивні частинки у складі аерозолей і газоподібних сполук виносяться в повітря. Згідно із загальноприйнятою класифікацією лісових пожеж (верхові, низові, підземні) найбільше радіонуклідів виносяться за межі лісового біогеоценозу при верховій стійкій пожежі. При підземних пожежах на торфовищах, коли торф вигорє повністю, всі радіонукліди, що містяться в ньому, можуть перейти в аерозольний стан. При низових пожежах горить сухий ґрунтовий покрив, при цьому вивільнюється 5-20% загального запасу радіонуклідів лісового масиву. Лісові пожежи порушують надійне депонування радіоактивних частинок у лісових екосистемах і призводять до перерозподілу первинного радіозабруднення території.

10. Групи лікарських рослин за інтенсивністю накопичення радіонуклідів

Лікарські рослини за рівнем накопичення радіонуклідів можна поділити на п'ять наступних груп:

1. дуже сильного накопичення – ягоди черниці, чага, спори плауна булавовидного;
2. сильного накопичення – лист брусниці, качани багна болотного, трава чистотілу звичайного, бруньки сосни звичайної;
3. помірного накопичення – трава фіалки триколірної, звіробою звичайного, суцвіття конвалії звичайної, пижмо звичайної, листя мучниці, кора крушини ламкої;
4. слабого накопичення – кропива дводомна, материнка звичайна, чебрець звичайний, спориш, кора дуба, суцвіття цмину піщаного;
5. дуже слабого накопичення – кореневища татарського зілля, валеріана лікарська, шишкоягоди ялівцю звичайного, топінамбур, дайкон.

11. Радіоактивне забруднення тварин

Продукти тваринництва належать до основних джерел надходження радіонуклідів до організму людини. Наприклад, у багатьох країнах молоко є головним (на 70-90%) джерелом надходження ¹³¹I.

Радіоактивні речовини можуть надходити в організм тварин через органи дихання, шлунково-кишковий тракт (ШКТ) і поверхню шкіри. Однак найбільше радіонуклідів надходить в організм через систему травлення.

Головне значення в опроміненні тварин має рівень радіоактивного забруднення рослин певної місцевості, а ось надходження радіонуклідів з питною

водою у декілька разів нижче, ніж із кормами.

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

Враховуючи те, що ^{90}Sr і ^{137}Cs є хімічними аналогами кальцію і калію, накопичення їх в основному визначається розподілом цих елементів в організмі тварин. Найбільш висока концентрація ^{90}Sr виявляється в скелеті, тоді як у м'яких тканинах і органах вона в десятки разів нижча.

Величина переходу різних радіонуклідів у м'ясі й субпродуктах визначається видом тварин і їх віком. У молодих тварин рівень надходження радіонуклідів завжди вищий, ніж у дорослих і старих. За величиною переходу ^{90}Sr з раціону в кісткову тканину сільськогосподарських тварин і птахів можна розмістити в такому порядку: велика рогата худоба, кози, вівці, кури.

12. Вплив тварин на міграцію радіонуклідів

Значну роль на перерозподілі радіонуклідів здійснюють мікроорганізми, безхребетні та хребетні тварини. Вони накопичують (акумулюють) радіонукліди в своєму організмі, а потім пересуваючись переносять їх в ґрунті як горизонтально, так і вертикально. Наприклад, полівка протягом року змішує всередині ґрунтового горизонту і виносить на поверхню з площі 1га близько 5 тонн ґрунту. Окрім того, мережа нір являє собою своєрідну дренажну систему, що сприяє переносу і акумуляції розчинених і суспензійних радіоактивних частинок, збільшує швидкість перенесення радіонуклідів у глиб ґрунту.

Радіаційне забруднення диких звірів і птахів визначається таким забрудненням ґрунту, води і рослин.

Безхребетні тварини залучають до біологічного кругообігу радіонуклідів у 3-4 рази більше, ніж хребетні. Однак, їх роль у загальному кругообігу радіонуклідів порівняно з рослинністю обмежена. Безхребетні тварини залучають до біологічного кругообігу в 106 разів менше радіонуклідів, ніж зелені рослини.

До організму тварин радіоактивні речовини потрапляють, головним чином, із забрудненого рослинного корму, грудочками ґрунту, з водою. Ці радіонукліди у певній кількості акумулюються зоофауною. Значна їх частина разом з екскрементами повертається у ґрунт.

Дикі тварини, перебуваючи в аналогічних умовах зовнішнього середовища мають різний рівень забруднення, наприклад, ^{137}Sr . Концентрація радіонуклідів у внутрішніх органах однієї і тієї ж тварини теж значно коливається. На це впливають відмінності їх фізіологічних функцій.

Тема 7

Захист населення від іонізуючого випромінювання

1. Фізичний захист населення від іонізуючого випромінювання
2. Хімічний тип захисту населення від іонізуючого випромінювання
3. Біологічний тип захисту населення від іонізуючого випромінювання
4. Післярадіаційне відновлення рослин і тварин

Основну частину опромінення населення земної кулі одержує від природних джерел радіації. Більшість із них такі, що уникнути опромінення від них зовсім неможливо. Внаслідок цього людство, незважаючи на малу вивченість даної проблеми, активно займається розробленням засобів і заходів захисту організмів від радіації.

1. Фізичний захист населення від іонізуючого випромінювання:

- збільшення відстані між оператором і джерелом;
- скорочення тривалості роботи в полі випромінювання;
- екранування джерела випромінювання;
- дистанційне керування;
- використання маніпуляторів і роботів;
- повна автоматизація технологічного процесу;
- використання засобів індивідуального захисту й попередження знаком радіаційної небезпеки;
- постійний контроль над рівнем випромінювання й за дозами опромінення персоналу.

Найбільш ефективним засобом фізичного захисту є екранування. Іонізуючі випромінювання поширюються прямолінійно, тому якщо на його шляху встановити екран – потужність дози зменшиться у десятки й сотні разів. Ефективність екрана залежить від властивостей матеріалу, з якого він виготовлений, та його товщини. Найкращим поглиначем гамма-променів є свинець. Повільні нейтрони добре поглинаються бором і кадмієм. Швидкі нейтрони попередньо вповільнюються за допомогою графіту. Недоліком даного засобу є те, що, поглинаючи іонізуючі випромінювання, екран сам стає радіоактивним.

Для профілактики і захисту від забруднення відкритих ділянок тіла застосовують ізолюючі плівки у вигляді спеціальних мазей, кремів, паст, які виконують роль екрана і не дають змоги радіоактивним речовинам досягти шкіри. Такі засоби звісно не виключають можливість гамма- і бета-опромінення.

Для захисту від гамма-променів та бета-частинок застосовують засоби індивідуального захисту, принцип дії яких полягає в поглинанні випромінювання ізолюючим шаром (наприклад, захисний одяг з накладками із свинцю – фартухи, жилети, плавки і т.ін.).

Захист від внутрішнього опромінення полягає в усуненні безпосереднього

контакту працюючих з радіоактивними частинками й запобігання влученню їх у повітря робочої зони.

Щоб уникнути радіоактивного забруднення одягу використовують так званий плівковий одяг (нарукавники, штани, фартухи, рукавички, черевики), який надягається зверху звичайного. Він виготовляється з деяких видів пластику, органічного скла, гуми, тобто матеріалів, які легко очищуються від радіоактивного забруднення.

Для захисту органів дихання найкращими є шлангові протигази, також застосовуються респіратори, пневмошоломи.

Для захисту очей застосовують окуляри закритого типу зі спеціальним склом (яке містить фосфат вольфраму або свинець).

Фізичні радіозахисні та радіосенсибілізуючі фактори. Серед фізичних факторів, що визначають стан організму в момент його опромінення, виділяють декілька основних.

Газове середовище. Зміна газового складу атмосфери, в якій перебуває організм при опроміненні, в значній мірі впливає на його радіочутливість. Так, ще в 1921–23 рр. німецький фізіолог рослин Є. Петрі, вивчаючи залежність чутливості проростків пшениці до рентгенівської радіації від обміну речовин, встановив, що опромінення в атмосфері вуглекислого газу підвищує їх радіостійкість. Англійські дослідники С. Хеншоу, Д. Френсіс і Л. Моттрем в дослідях з також з рослинами показали, що властивість послаблювати радіаційне ураження має будь-який інертний газ, що заміщує кисень. Механізм захисної дії гіпоксії пояснюється звичайно тим, що при опроміненні в присутності кисню в клітинах утворюються активні перекисні вільні радикали типу $O\bullet$, $HO\bullet$, $HO_2\bullet$ та перекис водню H_2O_2 , які посилюють дію випромінювань на життєво важливі макромолекули і структури.

Кількісним вираженням зміни дії опромінення під впливом кисню, є коефіцієнт кисневого підсилення (**ККП**). Він являє собою відношення величини ефективної дози (звичайно LD_{50}) при опроміненні в умовах гіпоксії до дози, що зумовлює такий же ефект при опроміненні в повітрі.

Проте іноді його виражають іншим показником – фактором зміни дози (**ФЗД**), який звичайно використовується для оцінки ефективності радіозахисних та радіосенсибілізуючих агентів. Фактор зміни дози – це відношення ефективної дози при опроміненні об'єкту з використанням модифікуючого фактора (у випадку з кисневим ефектом ним є гіпоксія) до ефективної дози контролю.

На рис. 7.1. наведеній приклад визначення ФЗД за кривими доза-ефект. Оцінивши за ними значення LD_{50} для дослідного і контрольного варіантів по відношенню між ними і розраховується ФЗД.

Таким шляхом визначається ФЗД для всіх чинників фізичної і хімічної природи як радіозахисної, так і радіосенсибілізуючої дії. Дія радіозахисних факторів ФЗД складає величину більше 1 і для радіосенсибілізуючих факторів – менше 1.

Кисневий ефект практично не проявляється в сухих системах – насінні,

спорах, пилку. Але при переході до активної життєдіяльності, наприклад при проростанні насіння, він швидко зростає і досягає максимуму в обводнених активно метаболізуючих проростках і рослинах. Це цілком зрозуміло, так як радіаційно-хімічні реакції з киснем більш активно проходять у водній фазі.

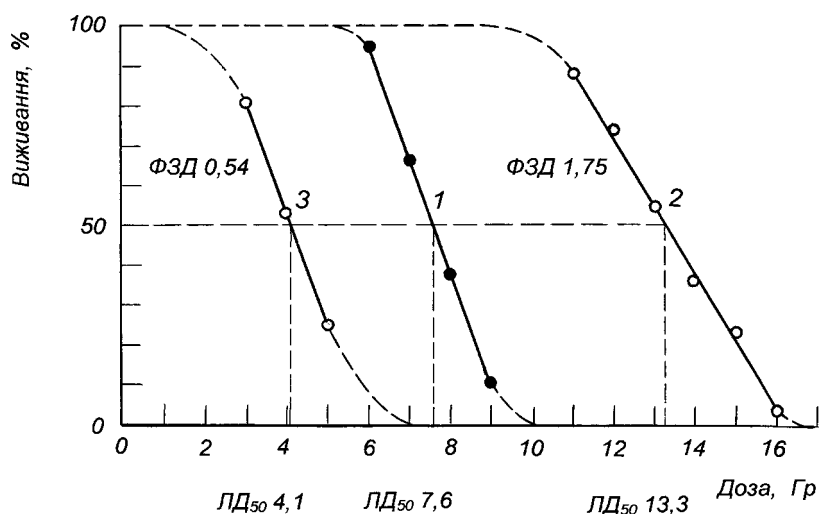


Рис. 7.1. Визначення фактору зміни дози (ФЗД) для радіозахисної (2) і радіосенсибілізуючої речовини (3); 1 – контроль.

Відкриття кисневого ефекту привело буквально до перевертання уявлень в області модифікації радіаційного ураження. Воно переконливо показало, що процесом його розвитку і реалізації можна керувати і, головне, знижувати його.

Вологість. Ступінь прояву кисневого ефекту, а, отже, і радіобіологічних реакцій, залежить від вологості системи. І в радіобіології рослин, мабуть, немає іншого такого питання, з якого було б стільки відомостей, як про вплив вологості насіння на його радіочутливість. Вони свідчать про те, що найбільша радіостійкість насіння досягається при вмісті води дещо більшому, ніж її кількість в повітряно-сухому насінні. При вмісті води вище і нижче цього рівня радіостійкість знижується. З одного боку, вона стає мінімальною при вологості насіння 3–5%, з другого – при її збільшенні до 15–20% і вище (рис. 7.2.).

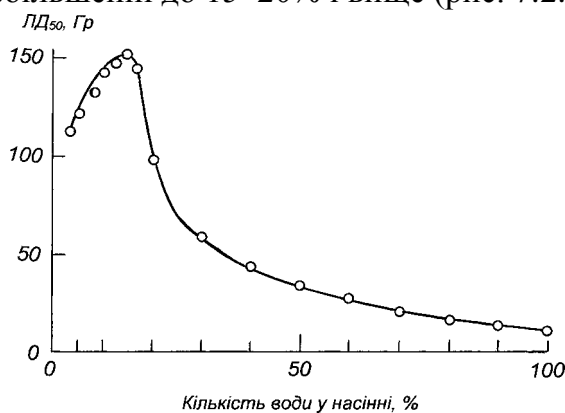


Рис. 7.2. Залежність радіочутливості насіння гороху від вологи (досліди проводились при температурі 1–2⁰С з метою виключення впливу фізіологічних процесів).

Цю складну залежність пояснює шведський радіохімік Л. Еренберг. Він

встановив, що, незалежно від вологості насіння, при певній дозі опромінення в ньому утворюється однакова кількість вільних радикалів. В насінинах з вологістю 3–5% вони протягом досить тривалого часу – до декількох місяців, не піддаються рекомбінації (об'єднанню у неактивні форми). Зі збільшенням вологості насіння частка зникаючих вільних радикалів з часом зростає. Біологічне пошкодження прямо пропорційне концентрації радикалів і, отже, зі збільшенням вологості зменшується.

При вмісті води у насінні понад 15% опромінення супроводжується реакціями, пов'язаними зі зміною їх фізіологічного стану і процесами проростання. Такі реакції ведуть до різкого зростання радіочутливості.

Питання про роль вологості в радіостійкості вегетуючих рослин та тварин практично не досліджене. Можна тільки припускати, що формування деякого ксероморфізму тканин, що веде до зниження інтенсивності метаболізму і споживання води, буде сприяти зростанню радіостійкості.

Температура. Є немало даних про дію температури на радіостійкість рослин. Вони також в основному відносяться до насіння, фізіологічний стан якого дає можливість в широких межах варіювати діапазон температур без суттєвих порушень функцій. І роботами багатьох дослідників було цілком однозначно встановлено, що охолодження насіння в момент опромінення до температури сухого льоду (-78°C) або навіть рідкого повітря чи азоту (близько -190°C) проявляє значний протирадіаційний ефект. Прийнято вважати, що захисна дія цих температур зумовлена тим, що при глибокому охолодженні створюється несприятлива ситуація для переносу енергії випромінювання та її поглинання речовиною. При низьких температурах обмежена також рухомість вільних радикалів і утруднена їх взаємодія з молекулами речовин клітини. Разом з тим показано, що і підвищення температури при опроміненні насіння до $35\text{--}80^{\circ}\text{C}$ веде до зниження радіаційного ураження. Припускається, що захисна дія високих температур зумовлена ослабленням кисневого ефекту за рахунок зниження розчинності кисню при нагріванні.

При опроміненні вегетуючих рослин температура також впливає на радіочутливість. Однак, якщо при її зниженні до $5\text{--}10^{\circ}\text{C}$ проявляється радіозахисна дія, то при підвищенні більше 30°C радіаційне пошкодження, як правило, посилюється – проявляється радіосенсибілізуюча дія.

Опромінення неіонізуючими видами радіації. Передуюче опроміненню іонізуючою радіацією опромінення деякими видами неіонізуючої радіації може безпосередньо впливати на радіочутливість організмів шляхом індукції в клітинах процесів відновлення, а також посередньо, діючи на інтенсивність метаболічних процесів.

Так відомо, що попереднє опромінення рослин, культури клітин тварин ультрафіолетовою радіацією знижує вражаючу дію γ -опромінення. Доведено, що таке опромінення індукує в клітинах процеси репараційного відновлення, що веде до підвищення радіостійкості. Але в певних умовах опромінення ультрафіолетовою

радіацією може призводити до посилення ураження, що визначається як величиною дози, так і довжиною хвилі, часовим інтервалом між попереднім і основним опроміненням і деякими іншими факторами.

Немає однозначної думки і по відношенню ефективності інфрачервоного світла. Відомо, що попереднє опромінення інфрачервоним світлом в діапазоні 750–1900 мкм з максимумом в області 1000 мкм може викликати затримку поділу клітин в меристемах проростків і підвищувати їх стійкість до наступного опромінення іонізуючою радіацією.

Змінити радіочутливість рослин можна за допомогою попереднього їх освітлення або вирощування за різних світлових режимів. В залежності від інтенсивності і спектрального складу видимого світла в клітинах рослин в результаті фотосинтезу може з'явитися багато відновних сполук, зокрема вільних амінокислот, які сприяють підвищенню радіостійкості.

Разом з зростанням інтересу до дії на живі організми магнітних та електричних полів, мікрохвиль, проявилась певна зацікавленість до вивчення спільної дії іонізуючих випромінювань і цих типів радіації на біологічні об'єкти. Так, є дані про те, що попередня або спільна обробка насіння і проростків магнітними полями і γ -радіацією веде до ослаблення дії останніх.

Радіозахисна дія цих факторів пояснюється різними причинами: зміною стану і проникністю клітинних мембран під впливом магнітних і електричних полів і мікрохвиль, перерозподілом аніонів і катіонів між різними тканинами, навіть можливістю утворенням радіостійких комплексних сполук в результаті зв'язування білків з магніточутливими мікроелементами та іншими. Всі вони, на жаль, слабо обґрунтовані і мають характер гіпотез.

В цілому ж треба визнати, що встановлені факти можливості модифікації радіаційного ураження за допомогою різних фізичних факторів тільки підводять базу до вирішення проблеми керування радіобіологічними реакціями. Вони дуже далекі від її кінцевого рішення, особливо по відношенню до протирадіаційного захисту людини. І якщо до 1945 р. ця проблема навіть не була достатньо конкретно сформульована як в науковому, так і в соціальному плані, то після трагічних подій в Японії у серпні того року, коли водночас від радіаційного ураження загинули сотні тисяч людей, вона відразу ж стала у радіобіології проблемою номер один. Перед всіма радіобіологічними установами світу повстало завдання створення речовин хіміко-фармацевтичного типу, які б захищали організм від дії іонізуючих випромінювань.

2. Хімічний тип захисту населення від іонізуючого випромінювання

В 1949 році практично водночас радіобіологи З. Бак і А. Ерве в Бельгії і Г.М. Патт з співробітниками в США повідомили про дві хімічні сполуки, введення яких лабораторним тваринам перед рентгенівським опроміненням підвищує їх виживання. Перші встановили, що таку дію має дуже сильна отрута ціаністий натрій, ін'єкція якого мишам в кількості всього 5 мг/кг перед опроміненням знижувала ступінь радіаційного ураження. Другі – про амінокислоту цистеїн, яка

при введенні мишам в кількості 1000 мг/кг підвищувала їх виживання при опроміненні в летальній дозі.

Через два роки З. Бак зі своїми співробітниками виявили, що декарбоксильований цистеїн, названий цистеаміном, та його дисульфід цистамін мають набагато більш виражену здатність знижувати ступінь радіаційного ураження як при ін'єкції, так і при згодовуванні тваринам. При введенні мишам лише (в порівнянні з цистеїном) 150 мг/кг цистеаміну ФЗД жосягов 1,8–2 (у ціаністого натрію і цистеїну він не перевищує 1,4). Це означає, що при використанні цього препарату дозу опромінення можна збільшити майже удвічі, щоб одержати такий же радіобіологічний ефект, як без нього.

Незабаром була показана протирадіаційна ефективність всіх трьох сполук і їх аналогів в експериментах з найрізноманітнішими лабораторними тваринами, рослинами, комахами, мікроорганізмами, тобто була продемонстрована універсальність їх радіозахисних властивостей.

Початок 1950-х років слід вважати часом, коли в радіобіології зародилося вчення про біологічний хімічний, або фармакологічний, захист і про радіопротектори.

Хімічний захист – це підвищення стійкості організму до дії іонізуючих випромінювань шляхом введення спеціальних хімічних речовин, що мають захисну дію (радіопротекторів, радіосенсибілізатори).

Радіотоксини, що накопичуються в організмі після опромінення й зумовлюють його отруєння, не є специфічними, характерними тільки для процесів опромінення. При різних стресах, таких, як нервові потрясіння, надмірне м'язове навантаження, гіподинамія (малорухливий спосіб життя), голодування, опіки, інфекція, у печінці піддослідних тварин накопичуються однакові токсичні продукти переокиснення. Ці токсини — перша ознака порушеного обміну, вони неначе «запускають» процес розвитку всіх механізмів стресу, що дозволило назвати їх «стресоїнами». Виведення «стресоїнів» з організму необхідно для зняття пострадіаційного токсемічного синдрому.

Радіомодифікація – це штучне **ослаблення** або **посилення** реакцій біологічних об'єктів на дію іонізуючих випромінювань; спосіб управління радіочутливістю за допомогою зміни умов, в яких відбувається опромінення того або іншого біологічного об'єкту, або шляхом застосований спеціальних засобів — **радіомодифікуючих агентів**.

Завдання **радіомодифікаторів** визначаються її конкретними цілями. Ослаблення радіочутливістю організму, тобто підвищення його стійкості до дії іонізуючих випромінювань (**радіорезистентності**), найбільш важливе при розробці засобів *протипроменевого захисту* в надзвичайних ситуаціях, для захисту нормальних тканин при променевої терапії злоякісних пухлин.

Посилення променевих реакцій використовують в сільськогосподарській радіобіології, радіаційній селекції і генетиці, а також в медицині — для збільшення радіочутливості злоякісних пухлин.

Радіомодифікатори ділять на 2 групи

1. Радіосенсибілізатори – посилюють дію радіації.
2. Радіопротектори – послаблюють дію радіації.

Радіосенсибілізатори. Засоби, що **вибірково підвищують чутливість пухлинних тканин** до іонізуючого випромінювання. Це дозволяє отримувати опромінення в потрібній дозі, не ушкоджуючи довколишні здорові тканини. Для цього використовується, наприклад:

Кисневий ефект – залежність радіочутливості пухлин від парціального тиску кисню в середовищі; заснований на тому, що більшість пухлинних клітин мають дуже низький парціальний тиск кисню і тому характеризуються низькою радіочутливістю.

На цьому базуються **оксигенорадіотерапія** і **оксигенобарорадіотерапія** (опромінення в умовах *гіпербаричної оксигенації*), а також пошуки клінічно прийнятних хімічних радіосенсибілізаторів імітуючих дію кисню (його спорідненість до електрона) тобто проявляючи ті ж електронно акцепторні властивості як і кисень, вони здатні значно посилювати ступінь радіаційного ураження. Такі властивості мають похідні дуже сильного окислювача нітроімідазола – метронідазол і мізонідазол.

Як радіосенсибілізатори використовують **антиметаболіти ДНК**, що включається в молекули, підсилюючи їх пошкодження (напр., **5-фторурацил**); інгібітори синтезу ДНК (напр., **оксисечовина**); специфічні інгібітори синтезу білка (напр., **актиноміцин D**).

Терморадіотерапія заснована на вибірковій протипухлинній дії гіпертермії (унаслідок недостатнього кровотоку в пухлинах тепло з них відводиться сповільнено). Ефект гіпертермії вищий при комбінації з **штучною гіперглікемією**: термочутливість пухлин при цьому збільшується за рахунок зниження внутріклітинної рН, що настає в них після введення в організм великої кількості глюкози через їх високу гліколітичну активність пухлинної тканини.

Хімічні модифікатори (радіосенсибілізатори) використовуються для збільшення ефективності променевої терапії. ФДТ з **фотофрином** застосовується для лікування раку. В теперішній час не знайдений хімічний модифікатор, який діяв би як селективний радіосенсибілізатор.

Особливий інтерес являє сенсибілізація дії іонізуючих випромінювань специфічною сполукою йодацетамідом. Він має здатність утворювати вільні йодні радикали, які зв'язують сульфгідрильні групи білків, послаблюючи тим самим радіозахисну ефективність ендогенних сульфгідрильних сполук. Витримування рослин на розчинах йодацетаміду в концентрації 2×10^{-4} , 2×10^{-3} М посилює ступінь радіаційного ураження майже в два рази.

Аналогічні властивості має мідь. Намочування насіння, витримування рослин у 10^{-4} М розчинів хлоридів або сульфатів міді суттєво посилює дію γ -опромінення – ФЗД складає 0,7–0,75. Така дія міді пояснюється двома причинами.

По-перше, на відміну від іонів інших металів, що мають здатність стабілізувати структури вищих порядків біополімерів клітини, з чим пов'язуються радіозахисні властивості деяких з них, мідь має унікальну здатність до їх дестабілізації, що і може зумовлювати її радіосенсибілізуючий ефект. По-друге, мідь є специфічною отрутою амінокислот, що містять SH- групи. Саме вона каталізує приєднання кисню до сірки цих груп, приводячи до їхнього окислення, що може викликати послаблення радіостійкості, зумовленої природним вмістом сульфгідрильних сполук.

Важливою сферою використання радіосенсибілізаторів в медицині є радіаційна терапія пухлин, коли з метою зменшення радіаційного навантаження на здорові тканини радіосенсибілізатори вводяться безпосередньо в зону опромінення.

Розробка способів радіосенсибілізації досить важлива для багатьох радіаційно-біологічних технологій, в тому числі і тих, що використовуються в сільському господарстві і вимагають високих доз опромінення, наприклад, при радіаційній стерилізації деяких видів продукції рослинництва і тваринництва, радіаційній обробці кормів та інших. Використання радіосенсибілізаторів за рахунок зниження дози дозволяє скоротити час опромінення і витрати енергії. Перспективним є використання радіосенсибілізаторів і в радіаційному мутагенезі рослин при одержанні нових сортів.

Всі існуючі радіосенсибілізатори можна умовно розділити на **дві великі групи** відповідно до специфіки їх впливу на основні параметри, що визначають клітинну радіочутливість :

1. Ті що підсилюють первинне радіаційне пошкодження.
2. Ті що впливають на пострадіаційне відновлення.

Радіоблокатори і радіодекорпоранти

У теперішній час, коли мільйонні контингенти населення опинились на забруднених радіонуклідами територіях і до 90–95% дози одержують за рахунок внутрішнього опромінення, основним прийомом радіаційного захисту слід вважати мінімізацію надходження в організм радіонуклідів з продуктами харчування і водою. Це досягається за допомогою радіоблокаторів – речовин, які зменшують надходження в організм радіонуклідів. І захист від ^{90}Sr і ^{137}Cs за у такій ситуації треба будувати за принципом збільшення надходження в організм речовин їх хімічних аналогів, відповідно, кальцію та калію, які, вступаючи в антагоністичні взаємодії з радіонуклідами зменшують їх надходження в організм; застосування ентеросорбентів і комплексонатів, які поглинаючи і зв'язуючи їх, не дають включитись у процеси метаболізму.

Радіодекорпоранти – це речовини, які прискорюють виведення радіонуклідів з організму. Виведення – це вже терапевтичний захід. І як будь-яка терапія, він менш результативний, ніж профілактичні прийоми, до яких належить використання радіоблокаторів і радіопротекторів. Проте відомі як природні, так і синтетичні препарати, які здатні прискорити цей процес, вибірково зв'язуючи радіонукліди і

разом з продуктами обміну виводити їх з організму. Це комплекси – деякі природні речовини і штучні препарати, які можуть утворювати із стронцієм і цезієм міцні, проте добре розчинні сполуки, котрі, беручи участь в обміні речовин, прискорюють їх виведення.

Зрештою виділяють четверту групу протирадіаційних речовин – так звані ростові фактори, або радіовідновники. Це велика кількість всіляких неспецифічних речовин, які стимулюють метаболізм, прискорюють поділ клітин, активують процесі відновлення, сприяють дезактивації токсичних продуктів та прискорюють їх виведення з організму.

Радіопротектори – це хімічні речовини, введення яких перед опромінюванням в живий організм знижує вражаючу дію іонізуючого випромінювання.

Радіопротекторні речовини поділяються на такі групи:

- антигістамінні засоби;
- ендокринні препарати;
- антигеморагічні засоби (ті, що перешкоджають кровотечі);
- речовини, що відновлюють функції кровотворних органів;
- препарати, що сприяють виведенню радіоактивних речовин і важких металів;
- препарати, які нормалізують окремі ланки обміну речовин.

Радіопротектори суттєво знижують тяжкість променевого ураження. Їх корисна дія найбільше виражена на ранніх стадіях захворювання. Навіть якщо проміжок між введенням препарату й опроміненням обчислюється хвилинами, протектор встигає проникнути в радіочутливий орган і почати діяти.

Прискорити виведення радіонуклідів можна шляхом їх заміщення або комплексоутворення. Так, для захисту від ^{226}Ra , ^{90}Sr , ^{140}Ba використовують сірчаноокислий барій, глюконат кальцію, хлористий кальцій; для ^{239}Pu – пентацин; для ^{137}Cs , ^{131}I – йодистий калій або йодисту настоянку.

Класифікація протекторів

Необхідно чітко розрізняти **три групи** протипроменевих агентів:

1. **Короткочасні** – діють тільки при порівняно короткочасному введенні до опромінювання. Їх захисна дія виявляється впродовж 0,5-4 години після введення. *Вони найбільш ефективні при опромінюванні організму значними дозами.*

РКД в залежності від механізму захисної дії і хімічної структури розділяються на дві групи:

а) відновлювачі, до яких відносяться сірковмісні з'єднання (цистамін, цистеїн, меркаптоетіламін, гаммафос та ін.), антиоксиданти (аскорбінова кислота, віт. Е, токоферол та ін.);

б) препарати, які викликають гіпоксію клітин та тканин (метгемоглобіноутворювачі, цианіди, нітріти та ін.)

2. **Довготривалі** – ефективні при пролонгованому та фракційному

опроміненні, меншою мірою при інтенсивному. Їх дія взагалі спрямована на підвищення резистентності організму і продовжується від одного до декількох днів. До групи РПД включаються:

- а) препарати з анаболічними властивостями (естрогени);
- б) полімери поліаніонної природи (гепарін, полісахариди, нуклеїнові кислоти, полінуклеотиди, деякі вакцини, синтетичні полімери).

3. **Терапевтичні** – їх застосовують після опромінювання і вони повинні діяти не менше трьох років. З вказаних груп препаратів тільки перші є дійсними радіопротекторами (класичні за визначенням), другі не мають сталого найменування, їх якщо і називають протекторами, то другого роду, відстроченого або пролонгованої дії, треті по суті є засобами лікування (терапевтичними агентами).

За хімічним складом радіопротектори поділяють

1 **Сірковмісні сполуки** їх протирадіаційний ефект пов'язаний з **SH-групою** яка (цистамін, L-цистеїн, гамафос, цистофос).

Табельним радіопротектором є цистамін (препарат РС-1) - радіопротектор короткочасної дії - амінокислота, яка має в собі дисульфідний зв'язок. Радіозахисний ефект сірковмісних радіопротекторів реалізується на клітинному рівні в результаті швидкого звільнення в фізіологічних умовах сульфгідрильної групи. Як потужний відновлювач цистамін може нормалізувати збудженні іонізуючими частками молекули біосубстратів, попереджуючи необоротні зміни в них. При цьому променева енергія втрачається і на розрив дисульфідного зв'язку, а не на руйнування біомолекул. Цистамін застосовується: 6 таблеток за 30-40 хв. до опромінення, якщо отримана доза буде складати 100 РАД і більше. Повторний прийом на протязі 3 днів -2-3 рази на добу в добовій дозі не більше 12 таблеток (2-4г).

2 **Біологічно активні аміни** препарати, що порушують в організмі транспорт кисню або його **утилізацію клітинами** знижуючи окислювальні процеси шляхом блокування залізовмісних дихальних ферментів (цитохромоксидази) і як результат зменшується кількість вільних радикалів (ціаніди, нітрит. серотонін, 5-метокситріптамін, адреналін, індолілалкіламін).

Радіопротектор Б-190. Похідний індолілалкіламінів - прямий адреноміметик. Має судинозвужуючу дію в радіочутливих тканинах, внаслідок чого розвивається місцева гіпоксія, при якій знижується кисневий ефект іонізуючого опромінення. Це сприяє зниженню кількості окислюючих активних радикалів, підвищенню рівня ендогенних сульфгідрильних з'єднань, пригніченню рівня обмінних процесів у клітині. Оптимальне дозування препарату - 3 таблетки по 0,45 г. Захисний ефект настає через 20 хв. і зберігається протягом однієї години. Повторний прийом допустимий з інтервалом не менше ніж через 1,5 години. Препарат знижує тяжкість променевого ураження у 70-80% опромінених у дозі до 10Гр.

3 **Антибіотики** – (біомицин, стрептоцид, актиноміцин) зменшують

кількість мутацій в соматичних і статевих клітинах, в тому числі і летальних. До препаратів тривалої дії належить РДД-77. Випускається у таблетках по 0,025 г. Вживають за 1-2 доби до передбачуваного опромінення. Радіозахисна дія настає через 1 добу після вживання і триває 8-10 діб.

Останнім часом як радіопротектори тривалої дії використовуються адаптогени (препарати женьшеню, китайського лимонника). Радіозахисний ефект мають вітаміни С, А, В, Р.

Також виділяють ряд інших за механізмом дії і походженням радіопротекторів. **Інші відновники.** Не тільки сульфгідрильні, а й інші хімічні сполуки, які проявляють відновлювальні властивості, виявляються ефективними радіопротекторами. Добре відомі роботи американського радіобіолога Х. Райлі, котрий показав, що 30-хвилинне витримування рослин в 4×10^{-4} , 4×10^{-3} М розчинах гіпосульфїту, метабісульфїту, сульфгідрату натрію та 1,7 М розчині етаноламіногідрохлориду знижує на 27–55% ступінь радіаційного ураження.

Суттєву протирадіаційну дію має сильний відновник аскорбінова кислота (вітамін С). Намочування насіння протягом 1 год. в 0,06–1 М її розчинах перед γ - і нейтронним опроміненням зменшує ступінь гальмування росту проростків відповідно на 50 і 20%. Добре відома також антиокислювальна дія спиртів. Так, витримування проростків бобів протягом 10 хв. перед і навіть після γ -опромінення в 1,6 М розчині метилового, 0,2 М розчині пропілового або 0,7 М розчині етилового спиртів більш, ніж в 1,5 рази послаблює ступінь індукованого випромінюванням гальмування росту.

Спирти, зокрема етиловий, здатні зменшувати ступінь радіаційного ураження і при опроміненні тварин. Але їх радіопротекторні властивості іноді дещо перебільшуються. Згідно даних цілого ряду дослідників, для того, щоб одержати радіозахисний ефект за допомогою етилового спирту, необхідно довести його концентрацію в організмі до 10–15 мл 25–40%-ного алкоголю на кожний кілограм маси тіла. Значення ФЗД при цій небезпечній для життя кількості ледве досягає 1,2. Як і сульфгідрильні сполуки, названі відновники належать до радіопротекторів універсальної дії. Проте за своєю радіозахисною ефективністю значно ним поступаються – ФЗД для них рідко досягає 1,4. Але вони більш стабільні і мають меншу токсичність, ніж, наприклад, цистеамін.

Соли металів. Роботами багатьох дослідників показана чітка протирадіаційна дія солей деяких металів. Намочування насіння, витримування проростків в 0,05–4 М розчинах солей натрію, кальцію, магнію, калію помітно знижує ступінь пошкоджуючої дії рентгенівського чи γ -опромінення. Значно більший ефект проявляють солі деяких металів, які відносять до важких. Намочування насіння, пророщування чи короткотермінове витримування проростків в розчинах солей заліза, цинку, марганцю, кобальту, нікелю і навіть кадмію у концентраціях 10^{-5} - 10^{-3} М, обприскування рослин розчинами цих солей виявляє радіозахисну дію з ФЗД від 1,3 до 1,7 (рис. 7,3). Деякі з них і при введенні в організм тварин підвищують їх радіостійкість.

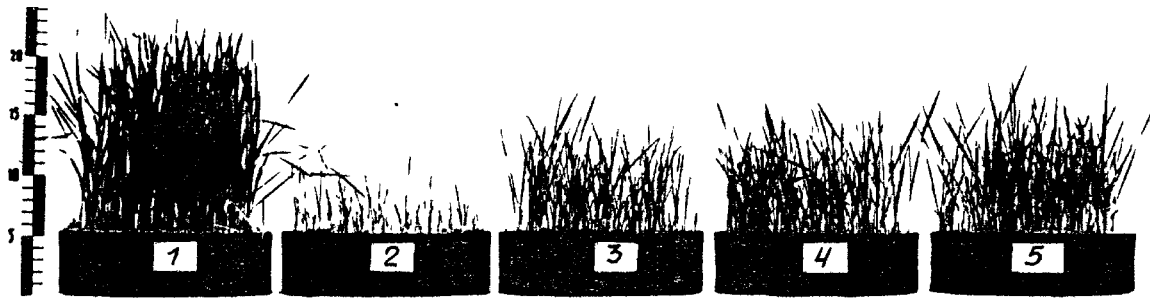


Рис. 7.3 Радіопротекторна дія солей металів при намочуванні насіння пшениці протягом 18 год. у 10–3 М їх розчинах перед γ -опроміненням: 1 – контроль, 2 – опромінення в дозі 300 Гр, 3 – намочування насіння у розчині хлорного марганцю, 4 – хлорного цинку і 5 – хлорного заліза.

Відомо чимало препаратів, що створені на основі цих металів. Як правило, це досить складні хімічні сполуки з одним або декількома металами. Так, серед радіопротекторів на основі кобальту відомі такі, як кобамід, кобадекс, кобамін, кобалін; нікелю – нікавіт, нікамідон. Відомі радіопротектори на основі заліза, цинку, марганцю, селену, комплексів з двох або трьох металів.

За протирадіаційною дією солі металів можна віднести до досить ефективних радіопротекторів. Але багато з них належать до важких металів і мають досить високу токсичність. І хоч в ролі радіопротекторів вони використовуються, як правило, у порівняно низьких концентраціях, з цим не можна не рахуватись. Добре відомо також, що солі металів і їх сполуки в водних розчинах досить довго зберігають свої хімічні властивості: отже, радіопротектори на їх основі мають порівняно високу стабільність.

Враховуючи ту значну роль, яку відіграють більшість з названих металів в живих організмах, можна припустити наявність багатьох механізмів, що зумовлюють їх протирадіаційні властивості. Так, їх можна пов'язати з запобіганням радіаційного пошкодження металовмісних ферментів, які утворюють комплекси з залізом, цинком, марганцем та іншими металами.

Досить плідною є гіпотеза Г. Ейхгорна (1962) про стабілізацію водневих зв'язків в деяких біополімерах клітини під впливом позитивно заряджених іонів металів. Завдяки цьому окремі ланки ДНК і білків, в тому числі і білків-ферментів, підтримуються в такому стані, що після розриву під дією випромінювання чутливих водневих зв'язків вони зберігають своє первісне положення, сприяючи відновленню вторинної структури.

Ростові речовини і гормони. Ростові речовини рослин, зокрема, фітогормони ауксини, гібереліни, цитокініни, абсцизова кислота і етилен, а також деякі інші при введенні в рослини в концентраціях, які індукують прискорення або інгібування ростових процесів в нормі і в більш високих, в значній мірі послаблюють радіаційне ураження. Дія ростових речовин пояснюється звичайно досить просто. Як згадувалося, однією з причин радіаційного ураження рослин, першою візуальною ознакою якого буває гальмування їх росту, є порушення балансу між активаторами та інгібіторами росту. І радіозахисна дія екзогенне

введених активаторів росту пояснюється саме тим, що вони відновлюють це співвідношення. Радіозахисна дія фітогормонів-інгібіторів росту абсцизової кислоти та етилену пояснюється блокуванням поділу клітин та індукцією у рослин стану, близького до спокою.

Фітогормони та інші ростові речовини рослин виявляють протирадіаційні властивості, як правило, тільки по відношенню до рослин.

Але багато відомо і про гормони тваринного походження, які виявляють досить суттєві радіозахисні властивості при опроміненні ссавців. Найбільш ефективними з них вважаються біогенні аміни серотонін, триптамін, резерпін, гістамін, деякі стероїдні (статеві) гормони андрогени і естерогени, гормони надниркових залоз – адреналін і норадреналін, гормон надшлункової залози інсулін, гормон щитовидної залози тироксин.

Противрадіаційна ефективність біологічно активних речовин цього класу досить помірною і для більшості з них ФЗД, як правило, не перевищує 1,3–1,4. Хоча в дослідах з рослинами за допомогою деяких фітогормонів, зокрема, етилену, досягаються і більші значення. Вони більш-менш стійкі і мають невелику токсичність.

Інгібітори метаболізму. До цієї строкатої групи радіопротекторів відносять багато речовин інгібіторів певних процесів біосинтезу, які, розриваючи послідовний ланцюг перетворень різних продуктів, індукують в організмі або блокування поділу клітин, або стан, близький до біохімічного шоку. При введенні в рослини і організм тварин перед опроміненням в концентраціях, зворотно інгібуючих функціонування окремих систем метаболізму, вони можуть проявляти протирадіаційну дію. Такі властивості мають інгібітори синтезу ДНК оксисечовина, інгібітори синтезу білків гідроксиламін, хлорамфенікол, інгібітори дихання азид натрію, амітал та інші.

Маючи на увазі те, що дія інгібіторів метаболізму зазвичай полягає в гальмуванні синтезу й активності ферментів, відповідальних за перебіг окремих процесів, і виявляється на біохімічному рівні, вони не специфічні по відношенню до рослин і тварин і їх варто віднести до радіопротекторів універсальної дії. Деякі з них мають суттєву протирадіаційну ефективність (ФЗД досягає 1,5), вони відносно стабільні і, безперечно, токсичні.

Природні метаболіти. Переважна більшість ефективних радіопротекторів в тій чи іншій мірі токсична для всіх видів організмів. Більше того, багато з них проявляють протирадіаційну дію саме в токсичних концентраціях, з чим іноді і пов'язують їх радіопротекторні властивості. Тому все частіше увагу дослідників привертає можливість використання в ролі радіозахисних засобів природних для організму речовин – його метаболітів. Серед них, крім гормонів, які тут виділені в окрему групу, слід назвати нуклеїнові кислоти, амінокислоти, вуглеводи, ферменти, кофактори, вітаміни.

Чітко виражені радіопротекторні властивості мають препарати ДНК. Практично, незалежно від походження, введення екзогенної ДНК зніжує ступінь

радіаційного ураження рослин. Показано, що такі властивості виявляють як препарати нативної двоспиральної ДНК, так і її гідролізат і окремі нуклеотиди не тільки ДНК, а й РНК. Більш того, радіозахисну ефективність такі препарати проявляли не тільки при опроміненні рідкоіонізуючою рентгенівською і γ -радіацією, але й швидкими нейтронами, при дії яких переважна більшість радіопротекторів виявляється зовсім неефективними.

Високу радіозахисну дію має нуклеотид аденозинтрифосфат (АТФ) переносник і основний акумулятор хімічної енергії в живих клітинах і циклічний нуклеотид аденозинмонофосфат (цАМФ) – універсальний регулятор внутріклітинного метаболізму. Очевидно, через посередництво синтезу АТФ зумовлена протирадіаційна дія гексозних цукрів, які використовуються як субстрати дихання, та деяких інших вуглеводнів, що вводяться екзогенно.

Надзвичайно великий інтерес радіобіологів до питань радіозахисту та лікування променевої хвороби у людини за допомогою вітамінів. Досить вираженим радіопротекторним ефектом характеризуються вітаміни-антиоксиданти С, А, Е, U, В₁, в також В₆, В₁₂, Р, К і різні їх комбінації.

Названі сполуки також слід віднести до радіопротекторів універсальної дії – ефективних як при опроміненні рослин, так і тварин. Вони мають помірні радіозахисні властивості, досить стабільні, як правило, здебільш малотоксичні навіть при високих концентраціях і багаторазового, аж до постійного застосування. Завдяки цим якостям, особливо останній, деякі з них вважаються досить перспективними.

Елементи живлення. Забезпеченість організму основними елементами живлення, впливаючи на об'єми і інтенсивність метаболічних процесів, синтез і накопичення окремих речовин, формує певний ендогенний фон радіостійкості. Цей фон, створений сотнями різних органічних і неорганічних речовин, дуже утруднює пояснення зниження або збільшення радіочутливості рослин при введенні того чи іншого елемента живлення. Не можуть не впливати елементи живлення і на хід процесів відновлення у післярадіаційний період. І роботи багатьох дослідників свідчать про те, що ефективність дії радіації на рослини і тварин в значній мірі залежить від забезпеченості їх поживними речовинами як в перед-, так і в післярадіаційний період.

Так, внесення в ґрунт оптимальних доз фосфорних, калійних і магнієвих добрив зменшує негативну дію γ - і β -випромінювання на рослини, а також сприяє формуванню більш радіостійкого насіння. На високому агрофоні підвищується виживання γ -опромінених рослин. Достатнє забезпечення тварин білковим харчуванням підвищує їх радіостійкість.

Виділяють і інші класи радіопротекторів: ціаніди, нітрили, окислювачі, антимулагени, комплексні сполуки та інші. Дані про протирадіаційну дію деяких з них наведені в табл. 7.1 і 7.2.

Треба підкреслити, що при застосуванні радіопротекторів на практиці, як правило, використовують не які-небудь окремі з них, а комплекси, які поєднують

позитивні властивості представників різних їх класів: високу ефективність одних, наприклад, сульфгідрильних сполук; низьку токсичність інших, наприклад, природних метаболітів; стабільність третіх, наприклад, солей металів. При таких комбінаціях вдається за рахунок зменшення концентрацій кожного з них знизити негативні властивості окремих радіопротекторів і, більше того, збільшити дію протирадіаційного захисту.

Проте, описані ефекти радіопротекторів, значення їх ФЗД, як для тварин, так і рослин відносяться до одноразового гострого γ -, β - чи рентгенівського опромінення. У теперішній час після аварії на Чорнобильській АЕС найважливішим завданням є пошук засобів протирадіаційного захисту для умов хронічного опромінення, яке триває роки, десятиліття, все життя – радіопротекторів так званої пролонгованої, тобто тривалої, дії.

Радіопротектори пролонгованої дії. Цілком очевидно, що в умовах хронічного опромінення захисну дію повинні мати тільки ті радіопротектори, які протягом тривалого часу зберігають свої властивості, тобто мають високу стабільність.

Досить високу стабільність, як відмічалось, мають солі металів. Але вона вважається високою лише в порівнянні з нестійкими згаданими сполуками. Багато металів через деякий час також окислюються, включаються в обмін речовин і виводяться з організму. Тому періодично потрібно вводити нові дози радіопротекторів, що може привести до різних токсикозів.

Порівняно ефективними радіозахисними засобами пролонгованої дії вважаються радіопротектори з природних метаболітів і елементів живлення. Застосування комплексних препаратів на основі гормонів, вітамінів та інших біологічно активних речовин, а також таких макро- і мікроелементів, як кальцій, калій, залізо, цинк, кобальт, марганець, молібден, мідь сприяють стабілізації гормонального та імунного статусу організму, підвищує його неспецифічну стійкість до різних несприятливих чинників, в тому числі і дії іонізуючої радіації. Взагалі, ця проблема ще очікує свого вирішення.

Механізми дії радіопротекторів

1. Вступають у взаємодію з активними молекулами середовища і біосубстрату раніше, ніж вони прореагують між собою.
2. Перехоплювати та знешкоджувати вільні перекисні радикали, що виникають при опроміненні в присутності кисню.
3. Викликають гіпоксію (зниження вмісту кисню в клітинах та тканинах) зменшуючи утворення вільних радикалів.
4. Збільшують рівень ендогенних сульфгідрильних груп які інактивують вільні радикали.
5. Зміщують окислювально-відновний потенціалу у бік відновника.
6. Активують репарацію (відновлення) уражених клітин та тканин.
7. Викликають біохімічний шок чим стимулюють захисні сили організму.

8. Конкурують за окислювачі з вільними радикалами, що утворилися під дією іонізуючого випромінювання.
9. Обривають ланцюгові реакції окислення.
10. Утворюють комплекси з іонами двовалентних металів, які є каталізаторами окислювальних процесів.

Радіопротектори природного походження

1. Препарати нуклеїнових кислот (ДНК, АТФ) сприяють репарації пошкоджених ділянок хромосом та відновлюють енергетичні запаси клітин.
2. Вітамін Е (*токоферол*) пригнічує мутагенез.
3. Вітаміни С (*аскорбінова кислота*) і вітамін Р (*цитрин*) відновлює еластичність та проникність капілярів.
4. Вітаміни групи В – відновлюють кровотворення.
5. Вітамін К (*філохінон*) – нормалізує процес звертання крові.
6. Фенольні сполуки рослинного походження (*прополіс*) – зміцнює кровоносні судини.
7. Флаваноїди, каротиноїди, клітковина (*мандарини, чорноплідна горобина, обліпіха, глід, пустинник, безсмертник, яблука*) – виводять радіоактивні речовини з організму.
8. Етиловий сирт – природній гіпоксид який зменшує концентрацію кисню в тканинах.
9. Екстракти женьшеню та китайського лимонника – мають радіоадаптагенні властивості.
10. Бджолині, зміїні, грибні та бактеріальні отрути – викликають біохімічний шок активізуючи захисні сили організму, мають радіо профілактичну дію.

Таблиця 7.1

Основні радіопротектори

Тип дії	Речовини	Джерело
Анти-оксиданти	Амінокислоти	М'ясо, риба, горох, квасоля,молоко і молочні продукти, соя, хліб, рис, гречка, вівсяні пластівці
	Аміни	Сир, риба, печінка, помідори, банани, апельсини, сливи
	Антоціани	Чорна смородина, чорна горобина, чорна шовковиця, ожина, темні сорти винограду, малини
	Катехіни (вітамін Р)	Чай, какао, смородина, шипшина, чорноплідна горобина, цитрусові
	Кверцетин	Гречка, чай, виноград, хмель
	Вітамін С	Шипшина, смородина, капуста, помідори, суниці, грецькі горіхи, печінка
	Вітаміни Е	Олія, салат, горіхи, петрушка, зелений горошок печінка, яйця, масло
	Вітамін U	Капуста-броколі, всі види рослин родини капустяних, спаржа, помідори
	Селен	Хліб, горох, квасоля, гриби, м'ясо, сир, капуста, морква, салат-латук, цибуля
Стабілізатори ДНК і мембран	Залізо	Печінка, нирки, м'ясо, риба, горох, яйця, гриби, гречка, цибуля, петрушка, яблука, соя, шпинат, салат-латук, горіхи, вівсяні пластівці
	Нікель	Морська риба і моллюски, салатні овочі, квасоля, хліб, огірки, вівсяні пластівці
	Ліпіди	Жири, м'ясо, риба, молоко і молочні продукти

	Вітамін В ₁	Дріжджі, горох, вівсяні пластівці, м'ясо, гречка, картопля, капуста, печінка, нирки, хліб, рис
	Вітамін В ₂	Дріжджі, печінка, нирки, сир, м'ясо, молоко, горох, яйця, капуста, морква
	Вітамін В ₆	Дріжджі, печінка, нирки, м'ясо, кукурудза
	Вітамін В ₁₂	Печінка, нирки, серце, м'ясо, риба, молоко, яйця
	Вітамін К	Капуста, шпинат, горох, шипшина, морква, картопля, печінка
	Вітамін РР	Дріжджі, печінка, нирки, риба, гречка, м'ясо, молоко, горох, хліб, картопля,
Адаптогени	Імуно-стимулятори	Морська капуста, морська риба і моллюски
	Пептиди	М'ясо, риба, молоко і молочні продукти, хліб, рис
	Вітамін В ₁	Дріжджі, горох, вівсяні пластівці, м'ясо, гречка, картопля, капуста, печінка, нирки, хліб, рис
	Вітамін С	Шипшина, смородина, капуста, помідори, суниці, грецькі горіхи, печінка
	Селен	Хліб, горох, квасоля, гриби, м'ясо, сир, капуста, морква, салат-латук, цибуля
	Фітомікстури	Квітково-трав'яні настої, фіточаї
	Рослинні жири	Олія, горіхи, соняшникове насіння

3. Біологічний тип захисту населення від іонізуючого випромінювання

Біологічний захист передбачає підвищення стійкості організму до дії іонізуючих випромінювань шляхом введення захисних речовин, виділених з живих організмів (лікарські рослини, вітаміни і т.д.).

Біологічні добавки природного походження практично позбавлені негативних ефектів, характерних для фармакологічних препаратів (токсичність, побічні дії), створюють захисний поріг в організмі та задовольняють енергетичні потреби.

Такі поживні речовини, як білки, деякі амінокислоти, поліненасичені жирні кислоти, складні некромальні вуглеводи, вітаміни (аскорбінова кислота, тіамін, рибофлавін, вітамін Р, каротин), мінеральні речовини (кальцій, калій, магній, йод, фосфор) мають виражені радіозахисні властивості. Тому збалансоване та різноманітне харчування має велике значення. Вченими доведено, що нестача цих речовин у раціоні сприяє накопиченню в організмі йоду, цезію, стронцію, плутонію, калію.

Якщо клітини організму насичені потрібними мінеральними речовинами, то можливість поглинання радіоактивних речовин зменшується. Оскільки стронцій є хімічним аналогом кальцію, то він може брати участь у тих самих реакціях. Тобто наш організм може використовувати для побудови кісток і зубів радіоактивний стронцій замість кальцію за умови нестачі останнього. Якщо ж кальцію в організмі достатньо, то стронцій практично повністю виводиться з організму. За подібним принципом цезій може замінювати калій, а плутоній – залізо.

Застосування лікарських рослин-біостимуляторів є украй необхідним при впливі іонізуючих випромінювань. У критичній ситуації необхідно забезпечити швидку адаптацію організму за допомогою власних регуляторних механізмів клітини. Особливо корисними щодо цього є препарати тонізуючої дії або рослинні психостимулятори. До них відносять женьшень, золотий корінь, лимонник

китайський, елеутерокок та ін. Після приймання препаратів із зазначених рослин розвивається підвищена опірність організму до променевих уражень, прискорюється пристосовність до екстремальних факторів, нервових стресів, нестачі кисню. Хворі відзначають підвищення загального тонуусу й рівня працездатності, зникають скарги на млявість, швидко стомлюваність, головний біль і зниження апетиту. Поліпшується функціональна діяльність серцевосудинної системи.

В умовах хронічного опромінення у малих дозах багатомільйонних мас людей не може йти мова про застосування спеціальних фармакологічних препаратів, а, скоріше, про раціональне харчування з дотриманням деяких рекомендацій і зосередження уваги на певних продуктах.

Те ж саме стосується і терапевтичних засобів, зокрема прискорення виведення з організму інкорпорованих радіонуклідів. Відомо немало синтетичних фармакологічних препаратів, які можуть значно прискорювати цей процес: **альгісорб, цинкацин, пентацин, тетацин** та інші. Вони успішно застосовуються у клінічній практиці при надходженні в організм великих кількостей тих чи інших радіонуклідів. Проте в зв'язку з певною **токсичністю** вони непридатні для тривалого застосування.

Це ж можна сказати і про ростові фактори, які прискорюють процеси післярадіаційного відновлення, детоксикацію організму від шкідливих метаболітів, що можуть виникати в ураженому радіацією організмі внаслідок порушення певних процесів обміну речовин.

Деякі з речовин, наприклад, **вітаміни, мікроелементи, клітковина, пектини** фігурують не тільки у різних засобах, але й навіть під різними типами дії. Це тільки підкреслює їх багатогранну функціональну роль у забезпеченні життєвих процесів і процесах протирадіаційного захисту.

Отже, збагачуючи раціон певними продуктами харчування можна цілеспрямовано впливати на вміст або синтез в організмі певних речовин, що мають радіозахисну дію, формуючи так званій „ендогенний фон радіорезистентності”. Цей „фон” з одного боку зменшує рівень надходження в організм радіонуклідів, послаблює дію як зовнішнього опромінення, так і випромінювання радіонуклідів, що надійшли і включились в тканини і органи (**інкорпоровувались**), а з іншого, сприяє прискоренню виведення останніх і відновленню ушкоджених радіацією клітин і структур.

Радіодекорпоранти – це сполуки природного та штучного походження які сприяють виведенню радіонуклідів із організму людини

Таблиця 7.2

Основні радіодекорпоранти

Тип дії	Речовини	Джерело
Сорбенти (зв'язують радіонукліди)	Альгінати	Морська капуста, мармелад, морозиво
Комплексопи (утворюють розчинні комплекси з радіонуклідами)	Антоціани	Чорна смородина, чорна горобина, чорна шовковиця, ожина, темні сорти винограду, малини

	Катехіни (вітамін Р)	Чай, какао, смородина, шипшина, чорноплідна горобина, цитрусові
	Кверцетин	Гречка, чай, виноград, хмель
	Кофеїн	Чай, кофе, какао
	Таніни	Чай, кофе

Дезактивація

Ліквідацію радіоактивного забруднення здійснюють шляхом дезактивації, яка полягає у видаленні радіоактивних речовин із зараженої поверхні.

Розрізняють природну та штучну дезактивацію.

Природна дезактивація являє собою зменшення зараженості радіоактивними речовинами внаслідок перетворення атомів, що розпадаються в стабільні. Вона дозволяє без додаткових матеріальних затрат зменшити зараженість до допустимої межі або нижче. Істотним недоліком природної дезактивації є її повільність. Вона найбільш ефективна впродовж перших 15-20 діб після радіоактивного зараження, коли в суміші продуктів поділу наявні переважно короткоживучі радіонукліди.

Штучна дезактивація полягає в очищенні заражених об'єктів від радіоактивних речовин шляхом вилучення цих речовин із заражених поверхонь. Вона застосовується за необхідності ліквідації радіоактивної зараженості в найкоротший термін, але вимагає трудових і матеріальних затрат.

Існуючі види дезактивації можна класифікувати за різними ознаками, які, з одного боку, визначаються умовами радіоактивних забруднень, а з іншого - умовами проведення самої дезактивації. Вибір способу дезактивації диктується особливостями радіоактивних забруднень і самого об'єкта.

Залежно від агрегатного стану дезактивуючого середовища всі способи дезактивації можна поділити на рідинні і безрідинні (рис. 7.4). Для підвищення ефективності дезактивації використовуються комбіновані методи обробки, які являють собою поєднання рідинних і безрідинних методів.

Вилучення радіоактивних речовин ґрунтується на різних фізичних, фізико-хімічних і механічних процесах і явищах. З цієї точки зору розрізняють такі види дезактивації: механічна, фізична і фізико-хімічна.

Механічна дезактивація полягає в механічному вилученні радіоактивних речовин із заражених поверхонь шляхом змітання, струшування, здування або відсмоктування пілососом; у видаленні й вилученні поверхневого шару; в ізоляції зараженої поверхні шаром незараженого матеріалу (безрідинні способи).

Фізична дезактивація – це виділення порівняно слабо зв'язаних із поверхнею радіоактивних речовин струменем води під тиском, обмивання водою, протирання розчинниками, очищення заражених поверхонь фільтруванням, відстоюванням, перегонкою і т.д.

Фізико-хімічний вид дезактивації використовується для вилучення РР, більш міцно зв'язаних із зараженою поверхнею. Він ґрунтується на підвищеній змочувальній здатності води при додаванні в неї поверхнево-активних речовин, кислот, лугів, окиснювачів.

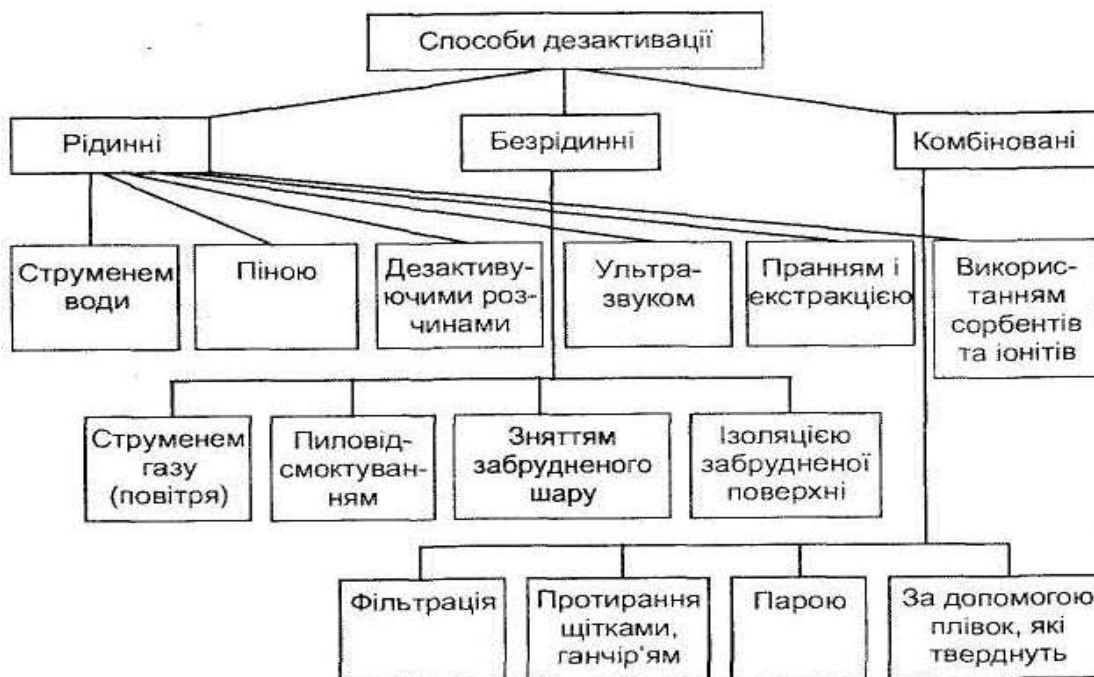


Рисунок 7.4 – Класифікація способів дезактивації

Способи очищення води

Більша частина радіоактивних речовин, що знаходяться у воді, міцно утримуються на частинках ґрунту або пилу і не розчиняються, решта радіонуклідів у вигляді аніонів і катіонів переходить у розчин.

Очищення води можна проводити різними способами (рис. 7.6).



Рисунок 7.5. – Способи очищення води

За умови опромінення молекули води іонізуються, втрачаючи свої біологічні властивості. Очищення питної води здійснюють фільтруванням, відстоюванням та заморожуванням. Після відстоювання води верхній і нижній її шарі не споживають. Для цього слід використовувати спеціальний посуд з краником приблизно біля межі однієї третьї від загального об'єму води знизу. Можлива також обробка води хімічними препаратами, що зв'язуються з радіоактивними елементами і потім легко осаджуються.

Осадження. Очищення води і повітря може бути здійснено шляхом седиментації або осаження. На основі принципу седиментації відбувається

очищення рідких середовищ (води) від радіоактивного забруднення у випадку, коли радіонукліди знаходяться у вигляді нерозчинних частинок. Але седиментація - тривалий процес (до кількох діб). Для її прискорення у воду додають різні реагенти, які сприяють процесу коагулювання.

Коагулювання – це розчинення у воді спеціальних речовин - коагуляторів, які в результаті гідролізу утворюють розсипчастий пластівчастий відстій. У ролі коагуляторів застосовують солі алюмінію $Al_2(SO_4)_3$ або солі заліза $FeSO_4$. Коагулянти у всьому об'ємі води утворюють пластівці, які при осадженні на дні відстійника захоплюють радіоактивні частинки. Після відстоювання заражена вода освітлюється і значною мірою дезактивується. Спосіб очищення води коагулюванням може застосовуватися як операція, що передує фільтруванню.

Фільтрацією називають очищення рідкого або газового середовища шляхом осадження домішок на поверхні фільтра. Як фільтр можна використовувати кварцовий пісок, дроблений антрацит, різні сорбенти (каолін, цеоліт) та іоніти.

Сорбенти, дія яких ґрунтується на іонному обміні, називаються іонітами. Іоніти здатні поглинати з розчину позитивні або негативні іони радіонуклідів в обмін на еквівалентну кількість іонів одного і того самого знаку (реакція заміщення). У результаті радіонукліди, що містяться у воді, утворюють нерозчинні сполуки з іонітами і тим самим звільняють від них заражену воду. У ролі іонітів використовуються іонітообмінні смоли, сульфовуглі, целюлоза.

Випарювання – це випаровування води, концентрування радіоактивних продуктів до утворення твердої маси. У результаті отримуємо чисту воду і концентрований відстій радіоактивних забруднень. Випарювання забезпечує високе очищення води (99,9%), однак цей спосіб потребує часу.

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

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

З метою зменшення переносу радіонуклідів течіями річок улаштовують спеціальні ями-пастки забрудненого мулу, „донні сховища”, які являють собою поперечні канавоподібні заглиблення по дну річок між берегами, різні фільтруючі перемички, греблі, запруди. Ці контрзаходи, що були здійснені під час ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС в 1986–1987 рр. на Дніпрі та його притоках, показали їх достатньо високу ефективність.

Для очищення від радіонуклідів невеликих водойм типу ставків іноді використовують відносно дешеві сорбенти на основі природних мінералів, котрі дозволяють видобути з води, осадити і закріпити їх у донних відкладеннях з

наступним механічним видаленням.

Аналогічно розглянутому вище прийому очищення ґрунтів від радіонуклідів за допомогою рослин – фітодезактивації для очищення водойм також можна застосовувати рослини. Цей спосіб одержав назву різofільтрації (від грецького *rhiza* – корінь). В умовах водної культури рослини, як і всі гідробіонти, мають дуже великі КН радіонуклідів. Так, якщо максимальні їх значення у коренях деяких видів вищих рослин на дерново-підзолистих ґрунтах легкого гранулометричного складу для ^{90}Sr і ^{137}Cs можуть досягти 10–20, то в умовах водойм досягають сотень і навіть тисяч. Саме тому окремі види як водяних, так наземних рослин можуть бути використані для очищення від радіонуклідів невеликих водойм.

Але тут, як і у випадку з фітодезактивацією ґрунтів, виникає проблема утилізації чи ліквідації радіоактивної біомаси. Інститутом мікробіології та вірусології НАН України запропонована мікробна біотехнологія очищення стічних вод від радіонуклідів та важких металів за допомогою штучних мікробних угруповань. На їх основі створені спеціальні препарати „Мікробний біокаталізатор” (МБК), „Змішані мікробні угруповання” (ЗМУ), які являють собою стійкі у воді гранули, що складаються з живих мікроорганізмів і необхідних для них поживних речовин. Гранули зберігають свою структуру та функції протягом 2–3 років. Пропускаючи забруднену радіонуклідами воду через колонки з гранулами, можна досягти практично повного її очищення від ізотопів стронцію, цезію, америцію, плутонію, урану. Безперечно, масштаби застосування такої технології досить обмежені.

В цілому, як показав досвід ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС більшість водоохоронних контрзаходів економічно дуже дорогі і при цьому мають досить обмежену радіаційно-гігієнічну ефективність.

Способи очищення повітря

Основним способом очищення повітря від радіоактивних речовин є фільтрація. За ступенем ефективності очищення повітря від радіоактивного забруднення фільтруючі матеріали можна розташувати в такій послідовності: скловолокно, тканина, неткані волокнисті з металевих волокон, синтетичні і природні матеріали. Для підвищення ефективності очищення використовується електромагнітне поле.

Для очищення повітря у ході промислової експлуатації АЕС використовуються припливні, циркулярні і витяжні вентиляційні системи, при цьому здійснюється ступеневе очищення через різні фільтри.

Дезактивація ґрунту

Залежно від властивостей ґрунту і ступеня його забруднення радіоактивними речовинами, а також виду сільськогосподарських культур, шляхів використання врожаю та інших умов застосовують різні засоби, які можуть забезпечити зменшення радіоактивності продуктів рослинництва. За однією класифікацією вони поділяються на дві групи:

- 1) загальнозживані у сільському господарстві;

2) спеціальні.

За іншою класифікацією розрізняють засоби механічні, агротехнічні, хімічні, агрохімічні та біологічні. Такий поділ їх звичайно умовний, оскільки на практиці важко визначити межу між механічними та агротехнічними засобами, хімічними й агрохімічними, агротехнічними та біологічними тощо. Крім того, при організації та проведенні заходів щодо запобігання над-ходженню радіоактивних речовин у рослини, як правило, доводиться мати справу з комплексом засобів, які технологічно тісно пов'язані між собою. Тому доцільно визначити п'ять головних комплексних систем зниження над-ходження радіоактивних речовин у рослини: 1) обробіток ґрунту; 2) застосування хімічних меліорантів і добрив; 3) зміна структури сівозміни; 4) управління режимом зрошення; 5) внесення спеціальних речовин і сполук.

Ґрунт володіє властивістю сорбувати і утримувати радіонукліди, чим обумовлюється його бар'єрна функція надходження радіонуклідів до рослин. Хоча, ряд радіонуклідів досить легко десорбуються, наприклад ^{90}Sr , ^{137}Cs й надходять до організму рослин, а потім тварин і людини.

Найбільш ефективний засіб профілактики включення радіонуклідів до біологічного колообігу є глибока оранка (понад 25-30 см).

Простим і важливим заходом є перекопування ґрунту на необроблених ділянках зразу після забруднення. Потім здійснюється санітарна обробка ґрунту. На ділянках, що прилягають до місця проживання: прибирання сміття і захоронення харчових відходів. При цьому необхідно дотримуватися певних вимог: захоронення проводити в спеціально виритих ямах глибиною до 1 м. Місце захоронення необхідно загородити і помітити. Внесення до ґрунту вапна зменшує надходження радіонуклідів з ґрунту до рослин.

Основні вимоги щодо ведення рослинництва і тваринництва на забруднених радіонуклідами територіях поширюються і на особисті підсобні господарства. Для безпеки проживання сільського населення при постійному споживанні в їжу місцевих продуктів харчування треба виконувати певні ро-боти. У рік випадання радіоактивних опадів доречно провести дезактивацію садиби – зняти і поховати верхній 5-см шар ґрунту. За допомогою цього за-ходу вдається знизити радіаційний фон і зменшити в подальшому забруднення рослин інколи в десятки разів.

На кислих ґрунтах раз у 4-5 років, після збирання врожаю, внести гашене вапно на всю площу присадибної ділянки, саду чи городу з розрахунку 50 кг на 100 м², після чого ґрунт перекопати або переорати. На ділянках під картоплю рекомендується дозу вапна зменшити в 2 рази. Можна використовувати й інші вапняні матеріали, але при визначенні дози слід враховувати вміст вапна в тому чи іншому матеріалі.

Треба збільшити норми фосфорних і калійних добрив, але лишити без зміни норми азотних. Найдоцільнішим для забруднених радіонуклідами ґрунтів слід вважати відношення азоту до фосфору і калію як 1:1,5:2 від норм, що рекомендовані для даних умов. Рівномірно розподілити добрива по поверхні ґрунту

і перекопати на глибину 20-25 см. Під картоплю треба вносити половину зазначених доз.

Фітодезактивація ґрунтів. Певної уваги серед заходів, що спрямовані на очищення ґрунту від радіонуклідів, заслуговує прийом, який одержав назву „фітодезактивація” (іноді використовуються терміни „фітоекстракція”, „фіторемедіація”). Фітодезактивація – це видалення радіонуклідів з ґрунту за допомогою спеціально вирощуваних на них рослин з наступною переробкою біомаси, концентруванням радіоактивних відходів та їх захороненням у спеціальних могильниках.

Фітодезактивація – один з небагатьох прийомів, який передбачає саме очищення ґрунту від радіонуклідів. Більшість решти прийомів мінімізації переходу їх в рослини базується на утриманні їх у ґрунті за допомогою зв’язування з іншими речовинами, переводом у нерозчинний стан, витісненні конкурентними способами з транспортних шляхів та іншими із сподіваннями на їх подальший природній фізичний розпад.

З метою фітодезактивації звичайно застосовують види рослин, які характеризуються максимальним виносом радіонуклідів з ґрунту, тобто мають високі коефіцієнти накопичення (КН) радіонуклідів, і формують велику біомасу. У найбільшій мірі серед вивчених у цьому розумінні видів рослин цим вимогам відповідає люпин, дещо в меншій мірі люцерна, конюшина та деякі інші бобові рослини, які мають високі КН як щодо ^{90}Sr , так і ^{137}Cs , а також відомі калієфіли кукурудза, соняшник, ріпак, щиріця, які мають високі КН щодо ^{137}Cs , при вирощуванні в ущільнених посівах (на зелену масу), деякі травосумішки, до яких включають конюшину лучну і білу, тимофіївку лучну, лисохвіст лучний, стоколос безостий, кострицю безосту, грястицю збірну. Рекомендуються також деякі мало поширені види, серед яких насамперед слід відзначити рослини з родини бобових козлятник східний, чина лісова і лучна, а також кропива дводомна і коноплевидна, топінамбур, сільвія пронизанолисна, живокіст шорсткий, гірчак забайкальський.

При додержанні основних правил агротехніки, внесенні оптимальних та підвищених доз добрив, проведенні при необхідності зрошення, внесенні у ґрунт активної мікробіоти (наприклад, силікатних бактерій, які прискорюють руйнування радіоактивних частинок та вивільнення радіонуклідів), використанні інших чинників, що сприяють створенню оптимальних умов росту рослин та переводу радіонуклідів у доступний для них стан, можна суттєво підвищити винос радіоактивних речовин з ґрунту.

По відношенню до радіонуклідів цезію (порівняно короткоживучого ^{134}Cs та ^{137}Cs) фітодезактивація найбільш ефективною є у перші роки після їх випадіння на ґрунт. З роками відбувається їх фіксація на ґрунтових частинках, перехід у важкорозчинний слабодоступний для рослин стан (так зване „старіння” радіонуклідів) і ефективність прийому зменшується. Це в більшому ступеню відноситься до ґрунтів, що мають високий вбирний комплекс, у першу чергу до чорноземів, і значно меншому – до бідних на нього торфово-болотних та дерново-

підзолистих найбільш забруднених ґрунтів Полісся. І це майже не відноситься до ^{90}Sr , який протягом десятиліть зберігає високу рухомість.

У звичайних умовах вирощування щорічний виніс ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{239}Pu як абіогенних елементів становить досить невелику величину – 0,1–1,5%. Проте, засвоєння радіонуклідів може бути підвищене. Зокрема, суттєве підвищення доз кислих форм азотних добрив (а саме такою є аміачна селітра – найбільш розповсюджене в Україні, як і у більшості європейських країн азотне добриво) буде сприяти з одного боку підкисленню ґрунту та збільшенню за рахунок цього рухомості і, відповідно, надходження радіонуклідів в рослини, а з іншого – наростанню біомаси рослин. Слід уникати вапнування кислих ґрунтів, застосування фосфорних і калійних добрив та здійснення всіх заходів, які сприяють зв'язуванню радіонуклідів у ґрунті, або зменшують їх надходження за рахунок інших механізмів.

Збільшити надходження ^{137}Cs можна за рахунок складання спеціальних сівозмін з таких видів рослин, які, з одного боку, самі по собі мають високу здатність до його виносу, а з іншого – сприяють підвищенню доступності радіонуклідів рослинам наступної ланки. Так, Ю.О. Кутлахмедов та ін. (2000) в умовах вегетаційного дослідження показали, що вирощування ріпаку, кукурудзи, гороху або соняшника сприяє збагаченню ґрунту на доступні для рослин форми радіоцезію, підвищуючи КН у наступній культурі – озимого жита у 2–4 рази. А після послідовно вирощуваних гороху і соняшника або кукурудзи і соняшника КН у жита збільшується у 7 разів порівняно з вирощуванням жита без будь-якого попередника (чистий пар). В умовах польових дослідів, здійснених на території 30-кілометрової зони відчуження Чорнобильської АЕС, результати виявились більш скромними, хоча в окремих комбінаціях за рахунок вдало підібраного попередника вдавалось досягти збільшення КН у наступної культури в 4,5 рази.

Оцінюючи потенційні можливості фітодезактивації ці ж автори доходять висновку, що максимальну здатність до виносу ^{137}Cs урожаєм, враховуючи КН та біомасу, має люпин, а ^{90}Sr – редька олійна. За їх даними спроможність люпину щодо виносу з ґрунту ^{137}Cs протягом одного вегетаційного періоду можна довести до 10% його кількості у ґрунті. Дезактиваційна здатність редьки значно нижча – вона виносить не більше 1% радіостронцію. Це пов'язане це зі слабкою рухомістю по рослині стронцію у порівнянні із цезієм, як і їх хімічних аналогів – відповідно кальцію у порівнянні із калієм.

П'ятирічні дослідження дозволили дійти висновку, що оптимальна система сівозмін з високими значеннями КН у рослин (2–10) і урожаєм біомаси (40–80 т/га) дозволяє протягом цього періоду зменшити вміст ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{106}Ru у дерново-підзолистому ґрунті в 4–5 разів.

Особливого значення проблема фітодезактивації ґрунтів набуває по відношенню до ^{239}Pu та інших трансуранових елементів α -випромінювачів, які мають дуже довгі періоди піврозпаду (для ^{239}Pu він складає 24000 років). Отже, сподівання на дезактивацію цього радіоактивного ізотопу за рахунок природного

розпаду малоперспективні. Але конкретних відомостей щодо можливостей його вилучення з ґрунту за допомогою певних видів рослин немає. Хоча і є дані про те, що різні види по-різному накопичують його, хоча в цілому і у невеликих кількостях. Справа в тому, що не маючи хімічних аналогів серед біологічно важливих хімічних елементів, цей штучний радіоактивний елемент дуже слабо надходить у рослини і пересувається транспортними шляхами. Але це зовсім не означає, що його можна залишати у ґрунті. Він може надходити в рослини аеральним шляхом, осідаючи на надземних органах з частинками ґрунту під час вітру, злив; в організм тварин та людини через органи дихання, з кормами, зрештою через шкіру. Вважається, що його радіохімічна токсичність при попаданні всередину організму у десятки і навіть сотні разів вища за ^{90}Sr і ^{137}Cs .

Більш того, останнім часом відомості щодо можливостей пересування по рослині ізотопів плутонію, як і інших трансуранових елементів, зокрема америцію, з котрих ^{241}Am з періодом піврозпаду 432 роки є наступним після плутонію забруднювачем навколишнього середовища, переглядаються. Є дані, що ці елементи можуть транспортуватись по рослині разом з залізом, марганцем, кобальтом. При цьому КН можуть досягати 0,1–0,3 і навіть 1. Найвищими вони є також для видів рослин родини бобових.

Отже, з усіх точок зору (пристосованість до умов Полісся, великі КН всіх довгоживучих радіонуклідів, великий вихід біомаси) люпин можна вважати найбільш зручною рослиною для забруднених внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС ґрунтів. Хоча, безперечно, з цією метою залежно від місцевих умов, зокрема характеру радіонуклідного забруднення, прийнятого в культурі набору видів рослин, можуть бути використані й інші з тих, що згадувались.

Перепоною на шляху широкого застосування фітодезактивації є труднощі утилізації великих кількостей забрудненої радіонуклідами рослинної біомаси. Технологічно ця проблема вирішується, і вже існують не тільки проекти, але й створені експериментальні установки, які дозволяють спалювати її без попадання радіоактивних продуктів у навколишнє середовище з одержанням золи з дуже високою концентрацією радіонуклідів (у сотні разів). При цьому передбачене одержання електрики. Існують проекти одержання біогазу з такої маси рослин, білкових концентратів, спирту, паперу. Отже, актуальність проблеми фітодезактивації як унікальної та виняткової біотехнології, а саме так – біотехнологією у самому класичному розумінні цього поняття може бути названий прийом очищення ґрунтів від радіонуклідів за допомогою рослин, не викликає сумнівів, і є всі підстави вважати, що вона знайде своє місце серед комплексних систем і способів мінімізації їх переходу у продукцію рослинництва.

Треба відзначити, що процес спонтанної фітодезактивації ґрунту триває постійно. І в агроценозах на забруднених радіоактивними речовинами територіях велика кількість радіонуклідів виноситься з урожаєм. Порівняно високі темпи такої фітодезактивації на луках і пасовищах. Так, з кормовими травами за вегетаційний період може виноситься до 10–12% кількості радіонуклідів у ґрунті. І за даними

Гідромету рівень радіонуклідного забруднення пасовищ та сіножатей ^{137}Cs з урахуванням його розпаду та міграції по профілю ґрунту у 1997–1998 рр. був у 2–3 рази менший, ніж у 1988–1991 рр. Тепер, через 30 років після аварії, помітні суттєві відміни між рівнями радіоактивності ґрунтів сільськогосподарських угідь, що активно використовуються для вирощування сільськогосподарських культур, і ґрунтів населених пунктів. Зрозуміло, що в усіх цих випадках радіонукліди включаються в трофічні ланцюжки. І в певних ситуаціях є великий сенс прискорити процес очищення ґрунту від них за допомогою цілеспрямованої фітодезактивації і захистити людину від додаткового опромінення.

Деактивація харчових продуктів

Для створення безпеки проживання населення в умовах радіаційного забруднення території при постійному вживанні для харчування місцевих продуктів необхідно дотримуватись низки простих правил. Їх дотримання і своєчасне здійснення виключає надходження до організму і накопичення радіонуклідів вище рівня допустимих норм.

Радіоактивні речовини, що потрапляють на поверхню Землі, включаються до біологічного колообігу речовин перш за все через рослини.

За умови радіаційного забруднення важлива особливість підготовки до використання чи послідуєчої переробки продуктів рослинництва полягає в застосуванні нескладних заходів первинної дезактивації і технологічної обробки. Це такі загальноприйняті заходи, як миття у проточній воді овочів і фруктів, очищення овочів, картоплі, зрізання верхніх листків капусти, обрізання головок коренеплодів тощо. Ці заходи знижують радіоактивне забруднення продуктів у 2–10 разів.

Подальша переробка овочів і фруктів (соління, маринування тощо) зменшує вміст радіонуклідів у продуктах. При цьому розсоли і марінади вживати не рекомендується.

Існують досить прості прийоми очищення деяких видів продукції рослинництва, і складні технології, які можуть бути здійснені тільки за промислових умов. Так, оскільки мінералізовані плівки і оболонки бульбоплодів, коренеплодів, цибулин та інших овочевих культур, продукція котрих часто-густо без будь-якої кулінарної обробки попадає на стіл споживача, можуть бути забруднені частинками ґрунту, містять багато солей кальцію і калію, а з ними, відповідно, стронцію і цезію, промивка водою, ретельне глибоке очищення дозволяє значно знизити кількість в них радіонуклідів. У коренеплодів найбільш забрудненими частинами є головка і кінчик, у голівці капусти – качан, у цибулин – денце, у салатних видів – прикореневі частини. При очищенні це треба враховувати.

Картоплю перед використанням для харчування людини чи годівлі тварин необхідно ретельно очистити й відмити від ґрунту. Мити картоплю необхідно у проточній воді, якщо такої можливості немає, то воду у процесі миття двічі-тричі міняють. Очищення картоплі від лущиння також значно знижує її радіоактивне

забруднення. Після цих операцій вона може бути використана для харчування і для подальшої технологічної переробки (наприклад, для приготування крохмалю).

Дуже високого ступеня очищення продукції можна досягти при переробці забрудненої радіонуклідами картоплі на крохмаль. Технологія виділення крохмалю передбачає подрібнення бульб з наступним відокремленням клітинного соку та видобуванням крохмальних зерен промиванням водою. За цих операцій переважна частина радіонуклідів відходить з водою, а одержаний продукт – полісахарид крохмаль містить їх у середньому в 50 разів менше, ніж сама картопля. Аналогічним шляхом після попереднього намочування у воді видобувається крохмаль із зерна злаків.

Коренебульбоплоди (буряки, морква, бруква, редиска, редька, корені петрушки тощо) перед використанням в їжу або подальшої переробки необхідно очистити від ґрунту і мити у проточній воді. Наступна обробка їх (варіння, соління) ще більшою мірою зменшує їх радіоактивне забруднення.

Огірки, томати тощо перед використанням необхідно ретельно мити у проточній воді. Капуста, цибуля очищаються від верхнього листя і перед використанням теж миються.

Фрукти та ягоди перед використанням ретельно миють. Їх переробка (приготування варення, соків, джемів) теж знижують вміст радіонуклідів.

Олійні культури при очищенні й переробці також знижують вміст радіонуклідів. Надзвичайно високий ступень очищення продукції із дуже забруднених радіонуклідами рослин досягається при одержанні рослинних олій з насіння соняшнику, льону, конопель та інших видів рослин. Технологія одержання олій передбачає проведення таких операцій як віджимання рідкої фракції, екстрагування жиру, його дистиляція та очищення. Головна операція – екстрагування жирів здійснюється за допомогою органічних розчинників, у яких ^{90}Sr , ^{137}Cs та інші радіонукліди не розчиняються. І вже на цьому етапі можна одержати практично чистий від радіоактивних речовин проміжний продукт, який у перебігу наступної дистиляції та очищення шляхом відстоювання, фільтрації, гідратації, а, особливо, рафінування, доводиться до надзвичайно високого ступеня чистоти.

Саме тому зазначені технічні культури рекомендуються для вирощування на особливо забруднених радіоактивним речовинами територіях, де вирощування інших сільськогосподарських рослин неможливе або недоцільне з економічної точки зору.

Зернові і зернобобові культури після очищення й обробки значно знижують вміст радіонуклідів. Горох, боби, квасоля після очищення можуть використовуватись для харчування людини без обмежень при забрудненні до 25 Кл/кг. За умови вищих доз забруднення використання цих культур не рекомендується.

При переробці будь-якої вуглеводмісної продукції рослинництва і плодівництва на етиловий спирт практично всі радіоактивні речовини, як між

іншим, і нерадіоактивні, залишаються у середовищі бродіння. Одержаний же внаслідок дистиляції продукт виявляється у тисячу і більше разів чистішим за вихідний матеріал.

Забруднення радіонуклідами «не небезпечно» для цукрових буряків. Технологія одержання цукру складається з подрібнення коренеплодів на тонку стружку і наступного вимивання його гарячою водою, до якої разом з цукром переходять і всі радіонукліди. Але за наступних операцій видалення та очищення цукру – дефектації, сатурації, сульфитації, випаровування, фільтрації, уварення і, зрештою, кристалізації, одержується так званий «білий цукровий пісок» з кількістю радіонуклідів у 50–70 разів меншою, ніж у коренеплодах.

Для зниження радіонуклідів у молоці можна його переробляти на молочні продукти. У домашніх умовах це роблять двома шляхами: обезжирення сироватки та сиру; виготовлення нежирного сиру, а сироватку для харчування не використовують. При переробці сметани і вершків на вершкове масло основна частина радіонуклідів залишається в пахті. А якщо вершкове масло перетопити, то радіонуклідів в ньому можна позбавитись практично повністю.

Так, після сепарації цільного коров'ячого молока лише 8–16% ^{90}Sr , ^{131}I та ^{137}Cs залишається у вершках, а решта переходить до перегону. Дво- триразове промивання вершків теплою водою та знежиреним молоком зменшує кількість в них ^{90}Sr ще у 50–100 разів. При переробці вершків на вершкове масло значна частина радіонуклідів переходить до склотин і промивних вод. Кількість ^{90}Sr , ^{131}I та ^{137}Cs у маслі при цьому зменшується до 35% та 50% відповідно їх концентрації у вершках. Перетоплення масла дозволяє видалити з нього практично повністю ^{90}Sr та ^{137}Cs і ще 10% ^{131}I . Переробка молока на знежирений сир веде до зниження вмісту ^{90}Sr та ^{137}Cs на 90%, а ^{131}I – на 70%. Отже, не викликає сумнівів, що з забрудненого радіонуклідами молока доцільно виробляти деякі продукти і в першу чергу вершки та вершкове масло. Це переконливо ілюструє табл. 7.3.

Таблиця 7.3

**Перехід ^{90}Sr та ^{137}Cs із забрудненого молока в молочні продукти
(А.С. Соболев 1998)**

Продукт	% від вмісту у незбираному молоці	
	^{90}Sr	^{137}Cs
Молоко незбиране	100,0	100,0
Молоко знежирене	92,0	85,0
Вершки	8,0	15,0
Сколотики	6,5	13,5
Сир знежирений	12,0	10,0
Вершкове масло	1,5	2,5
Молочний жир (топлене масло)	<0,1	<0,1

Продукти переробки молока розрізняються, іноді досить суттєво, по кількості радіонуклідів – ^{90}Sr концентрується переважно у багатих на білки продуктах, а ^{137}Cs в основному залишається у сироватці та склотинах. Оскільки жири не утворюють комплексів із лужними та лужноземельними металами,

невелика частка цих радіонуклідів переходить у вершки і зовсім мала – у масло. Прямі залежності, наведені на рис. 8.4 свідчать про те, як із збільшенням жирності вершків та одночасним зменшенням вмісту у них білку зменшується вміст ^{90}Sr і ^{137}Cs – першого у 2,7 і другого – у 2,3 рази.

Це, однак, не відноситься до галогену йоду, котрий йодує жири, утворюючи з ними міцні сполуки. Саме тому ^{131}I може концентруватись у маслі, як і в інших жирах. Але, зважаючи на короткий період піврозпаду ^{131}I (8 діб), витримування забрудненого масла в холодильнику протягом 40–50 діб дозволяє дочекатись практично повного його зникнення в межах допустимого часу зберігання продукту. Цей прийом був широко застосований навесні 1986 р., що дозволило уникнути великих втрат молока.

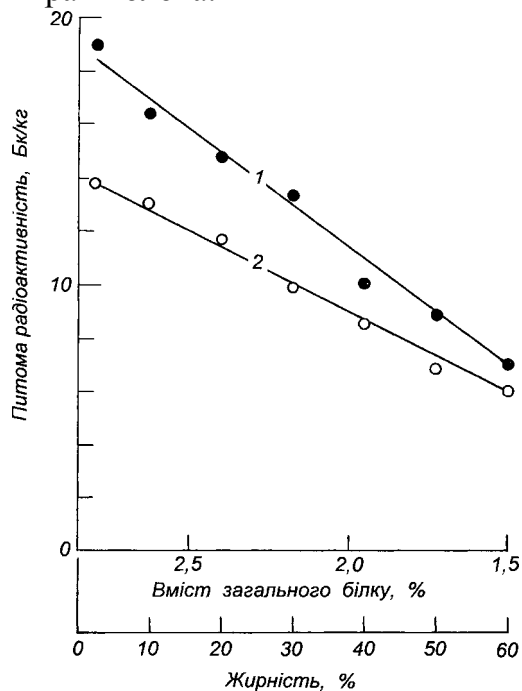


Рис. 7,6 Кінетика зниження питомої радіоактивності ^{90}Sr (1) та ^{137}Cs (2) у вершках зі збільшенням їх жирності та зменшенням вмісту білку в процесі технологічної переробки молока (Ф.А. Федін та ін., 1992, 1993).

Існують також засоби, за допомогою яких можна здійснювати очищення молока від радіонуклідів без суттєвої зміни його хімічного складу та властивостей. Застосування пірофосфатів, які зв'язують стронцій, дозволяє протягом доби вилучити з молока до 80% ^{90}Sr . За допомогою іонообмінних смол можна швидко і досить ефективно очищати молоко і від інших радіонуклідів. Так, один об'єм відомого аніоніту Дауеск2 дозволяє вилучити більш як 95% ^{131}I та 50% ^{90}Sr з 230 об'ємів молока. Створені також установки з очищення молока від ^{137}Cs шляхом сорбції його на фероцині.

Але найбільш ефективним є електродіалізний метод очищення молока, котрий дозволяє вивести з нього до 90% ^{90}Sr . А при електродіалізі через аніонообмінні мембрани з нього вилучається до 99% ^{137}Cs і до 70–90% ^{131}I . Собівартість молока при цьому збільшується лише на 10%.

Радіоактивну забрудненість м'яса можна знизити, наприклад, шляхом його

засолювання. При цьому найвищого ефекту досягають за умови, якщо м'ясо ріжуть на шматочки, а потім засолити, 2-3 рази змінюючи розсіл. Можлива також обробка м'яса проточною водою або 0, 85% розчином кухонної солі. Ефективність цього способу зростає зі збільшенням тривалості вимочування. Вимочування м'яса у воді, особливо підкисленій оцтом, лимонною чи іншими харчовими кислотами, виварювання протягом 10 хвилин з наступним відливанням рідини дає змогу зменшити вміст як ^{137}Cs , так і ^{90}Sr у 2-5 разів. Хоча ^{90}Sr переважно накопичується в кістках разом із кальцієм і, навіть за умови тривалого виварювання він, як і кальцій, до бульйону практично не переходить.

В процесі ж варіння м'яса 7-місячного бичка у бульйон переходить до 60% ^{90}Sr і ^{137}Cs , а після додавання до води лимонної або молочної кислоти – до 75–85%. Приблизно стільки ж цих радіонуклідів переходить до бульйону при варінні курячого м'яса. При цьому половина радіонуклідів переходить у бульйон протягом перших 10 хв., але далі із збільшенням часу темпи вивільнення радіонукліду падають (рис. 7.7). Отже, виварювати м'ясо довше не має сенсу. І ця перша порція бульйону без особливого жалю може бути відкинута.

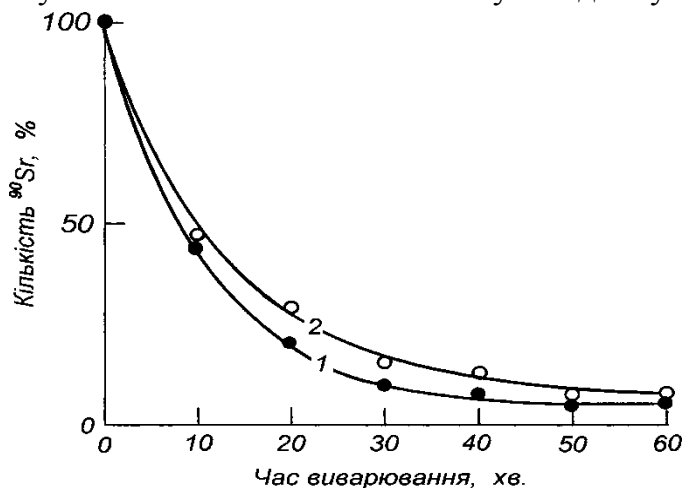


Рис. 7.7 Кінетика зменшення кількості ^{90}Sr (1) та ^{137}Cs (2) у курячому м'ясі при виварюванні (А.М. Сироткін та ін., 1994).

Знизити кількість радіоактивних речовин у м'ясі в декілька разів можна шляхом тривалого (10–12 год.) його промивання у проточній воді, вимочування у 0,8–1%-х розчинах повареної (кухонної) солі з наступним промиванням. Досить ефективним є вимочування м'яса у підкисленій оцтовою, лимонною кислотами воді. Ступінь очищення м'яса при цьому залежить від розмірів шматочків, тривалості вимочування, кількості обробок, реакції середовища, ступеня забрудненості, хімічної природи радіонукліду.

При перетопленні сала більш як 95% ^{137}Cs залишається у шкварках, внаслідок чого кількість його в топленому жирі зменшується в 20 разів.

Для оцінки ступеню зниження радіоактивності продукції внаслідок застосування окремих прийомів існує коефіцієнт очищення продукції (КОП) від радіонуклідів, який визначається відношенням питомої радіоактивності одержаного внаслідок обробок чи переробок продукту до питомої радіоактивності

сирого матеріалу. Фактично це різновид коефіцієнту переходу (КП). В табл. 7.4 приведені значення КОП, які можна одержати після застосування деяких кулінарних обробок і технологій.

Таблиця 7.4.

Вплив кулінарних обробок та харчових технологій на коефіцієнт очищення (КОП) м'яса (яловичина, свинина, баранина, кролятина) від ^{137}Cs (Л.О. Матола, М.Л. Долгий, 1993)

Методи обробки продукції	Коефіцієнт очищення продукції (КОП)
Запікання	0,5–0,8
Варіння	0,25–0,5
Тушкування	0,5–0,6
Смаження	0,5–0,8
Соління	0,1–0,6
Засіл	0,05–0,9
Маринування	0,1–0,3
Консервування	0,5
Виробництво ковбас	0,25–0,95

В табл. 7.5 наведені узагальнені і усереднені дані щодо впливу деяких чисто кулінарних обробок і технологічних переробок на зниження вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr у деяких видах продукції рослинництва і тваринництва. Вони свідчать про дуже високу радіозахисну ефективність деяких з них.

Таблиця 7.5

Радіозахисна ефективність технологічних переробок продукції рослинництва і тваринництва

Технологія		Кратність зниження	
		^{137}Cs	^{90}Sr
Рослинництво	Промивка картоплі та овочів	1,5–3	1,5–3
	Очищення зернівок зернових культур	1,5–2	1,5–2
	Виварювання картоплі та овочів (10 хв.)	1,5–2	–
	Дворазове виварювання грибів (по 10 хв.)	2–4	–
	Виварювання грибів (60 хв.)	5–10	2–3
	Переробка картоплі і зерна на крохмаль	10–15	10
	Переробка олійних рослин на олію	100–200	100–200
	Переробка вуглеводмісної продукції на спирт	500–1000	500–1000
Тваринництво	Переробка молока на вершки	6–12	5–10
	Переробка молока на сири	6–10	2–5
	Переробка молока на масло	30	30
	Виварювання м'яса і риби (10 хв.)	2–4	–
	Вимочування м'яса в харчових кислотах (1 доба)	2–3	–

Одже, кулінарна обробка, очищення зерна, виробництво олії, одержання спирту, одержання крохмалю, одержання цукру, сепарація молока, очищення молока, виготовлення сирів та масла дозволяють значно знизити вміст радіонуклідів у продуктах харчування.

Зменшення забруднення житлових приміщень

Житлові приміщення забруднюються радіонуклідами через повітря; при спалюванні дров, вугілля та торфу; побутові предмети, що заносяться з вулиці, брудне взуття та одяг, забрудненні продукти харчування.

Зменшення забруднення житлових приміщень досягають, дотримуючись чистоти: роблять вологе прибирання, робочий одяг і взуття слід залишати поза житловими приміщеннями, попіл з печі вибирають після попереднього зволоження його водою, побутові предмети протирають вологими серветками тощо.

Воду після волого прибирання, миття взуття тощо слід зливати у визначеному місці, віддаленому від природних водойм та джерел питної води не менше, ніж на 200 м.

Особливу уваги необхідно звертати на провітрювання і вентиляцію підвальних та приміщень, що знаходяться на перших поверхах, оскільки в них може накопичуватись значна концентрація газу радону. Феранки і вентилятори корисно облаштовувати фільтрами, наприклад, ватно-марлевими, які легко зволожувати.

Радон до приміщень може надходити з води і природного газу. У сирій воді радону значно більше, ніж у кип'яченій. До легень радон проникає з парами води. Це може здійснюватись при прийманні гарячого душу, в парилках. З природнім газом радон змішується під землею, а при спалюванні в кухонних плитах потрапляє до житлових приміщень.

До житлових приміщень радіація може надходити з вугілля, що використовується для опалення. З камінів, груб житлових приміщень виділяється значна кількість радіонуклідів.

Істотно знижує надходження радіонуклідів до приміщень з порошком, коли навкруги будинків висаджені дерева і кущі. Будинки, розміщені вздовж вулиць, слід відгоробжувати насадженнями дерев від проїзної частини.

До приміщень радіація може надходити і з будівельних матеріалів. Дерево, цегла, бетон виділяють невелику кількість радіації, а граніт і залізо – значно більше. Дуже радіоактивні глиноземи. Тому досить високу радіоактивність має червона глина, відходи виробництва алюмінію, домений шлак – відходи чорної металургії, пил попелу при спалюванні вугілля.

Деяка частина радіації до житлових приміщень надходить від використання кольорових телевізорів, комп'ютерів, фосфоролюючих вмикачів та циферблатів, хоч ці дози зазвичай невеликі, але вони можуть перевищувати природній фон.

Особливості мінімізації надходження і накопичення радіонуклідів в організмі людини. Концепція мінімізації надходження і накопичення радіонуклідів в організмі людини з метою зменшення формування дози внутрішнього опромінення базується на трьох основних положеннях: 1) обмеження надходження радіонуклідів з продуктами харчування і водою; 2) блокування процесів всмоктування радіонуклідів у шлунково-кишковому тракті та їх депонування в окремих органах; 3) прискорення виведення з організму

радіонуклідів, що включились у тканини (інкорпорувались).

Цілком очевидно, що основна мета всіх прийомів і заходів з захисту різних об'єктів навколишнього середовища від накопичення радіоактивних речовин у підсумку спрямована на реалізацію першого положення – обмеження надходження радіонуклідів в організм людини з їжею. Що стосується здійснення другого і третього принципів, то в цілому вони засновані на додержуванні принципів раціонального харчування та споживання деяких спеціальних речовин, які з урахуванням особливостей фізико-хімічних властивостей і поведінки радіонуклідів перешкоджають їх засвоєнню в організмі і прискорюють виведення природними шляхами.

При надходженні більшості радіонуклідів з їжею значна їх кількість, незалежно від вихідних форм в продуктах харчування, внаслідок кислої реакції у шлунку переходить у розчинний стан. З одного боку, це прискорює їх всмоктування у шлунково-кишковому тракті, але з іншого – створює відносно сприятливі умови для конкурентної взаємодії радіонуклідів з іншими елементами, а також їх зв'язування різними сполуками. Серед цих речовин, які одержали загальну назву радіоблокаторів, виділяють три основні класи: антагоністи-конкуренти радіонуклідів, ентеросорбенти і комплексоутворювачі.

Антагоністами-конкурентами основних дозоутворюючих радіонуклідів ^{90}Sr і ^{137}Cs є вже неодноразово згадувані елементи, відповідно, кальцій і калій. Нормальне забезпечення організму кальцій- і калієвмісними продуктами знижує перехід цих радіонуклідів в тканини. Тому абсолютно недопустимим є дефіцит цих елементів у раціоні населення, особливо дітей і підлітків, що проживає на забруднених радіонуклідами територіях. В першу чергу це стосується кальцію – головного мінерального компоненту скелету, потреба у котрому у молодого організму, що росте і формується, особливо велика. При нестачі кальцію стронцій, в тому числі і радіоактивний, маючи до нього чітко виражену хімічну спорідненість, легко включається у каркас кристалічної решітки оксиапатиту – структурної основи кісткової тканини і накопичується в ній, піддаючи опроміненню червоний кістковий мозок – критичний орган хребетних.

Основним джерелом кальцію для людини є молоко і молочні продукти. В умовах проживання на забруднених радіонуклідами територіях у раціоні харчування людини акцент слід робити на зневоднених молочних продуктах – вершках, сметані, сирах, як м'якому, так і твердому, при одержанні котрих значна частина радіонуклідів видалається з відвійками та сироваткою. Джерелом кальцію є також рослини-кальцефіли, у першу чергу бобові – горох, квасоля, боби, соя та інші. Підвищену його кількість у порівнянні з іншими рослинами містять плоди деяких видів розоцвітих – шипшини, абрикосу, суниці, полуниці.

Головним джерелом калію є овочі і фрукти. Такі розповсюджені і популярні рослини як капуста, картопля, столові буряки, гречка, кукурудза, овочевий перець, котрі складають суттєву частку раціону жителів середньої смуги Євразії, накопичують його у великих кількостях. Дуже багато калію містять виноград і

абрикос – їх можна вважати чемпіонами за вмістом цього елемента серед видів, що культивуються в Україні. Всі ці рослини належать до рослин-калієфілів.

Практично всі види рослин є основними поставниками в організм людини мікроелементів, багато з яких, в першу чергу залізо, цинк, марганець, кобальт, мідь, нікель, літій проявляють антагоністичні властивості по відношенню до стронцію і цезію, блокуючи їх всмоктування у шлунково-кишковому тракті. Особливо багато мікроелементів містять салатні овочі – салат-латук, звичайний салат, шпинат, петрушка, селера.

Найбільш відомий сорбент активоване вугілля, який широко застосовується у лікувальній практиці при різних харчових отруєннях, виявився малоефективним як засіб поглинання продуктів поділу урану, в тому числі ^{137}Cs , а в особливості ^{90}Sr . Ефективним сорбентом ^{137}Cs у травному тракті є фероцін – сполука, більш відома під назвою берлінської лазури, та його похідні – фероціаніди заліза, кобальту, нікелю. Фероцін вибірково утворює з цим радіонуклідом нерозчинні сполуки, які не проникають через стінки шлунку та кишок і виводяться з організму з продуктами обміну. Однак, якщо у тваринництві вони знайшли достатньо широке застосування, то для захисту людини використовуються тільки в особливих випадках під медичним контролем. Це зумовлене неоднозначним відношенням до можливості прояву деяких негативних побічних ефектів препаратів на їх основі, зокрема впливом на печінку, нирки, селезінку, підвищеним виведенням у деяких ситуаціях разом з цезієм калію.

Здатність вибірково адсорбувати ^{90}Sr , знижуючи його всмоктування у травному тракті, зменшувати перехід в тканини і відкладення в організмі мають солі альгінових кислот – альгірати натрію, калію, кальцію, магнію – кислі полісахариди, які виділяють з деяких видів морських бурих водоростей, зокрема ламінарії біломорської, японської, екваторіальної, водорості цитозіри. На основі альгіратів створені спеціальні сорбенти, які мають селективність до стронцію. Так, препарат „Альгісорб” запобігає всмоктуванню у шлунково-кишковому тракті 60–85% ^{90}Sr . В зв'язку з тим, що цей радіонуклід являє особливу небезпеку для дітей, альгірати додаються до деяких продуктів дитячого харчування.

Разом зі стронцієм альгірати можуть блокувати і надходження кальцію. Але встановлено, що добове споживання 3–4 г альгірату натрію дитиною і 6–8 г дорослою людиною, знижуючи всмоктування ^{90}Sr в 3–3,5 рази, суттєво не впливають на кальцієвий обмін.

Альгірати, головним чином натрієва сіль, використовуються у деяких виробництвах як емульгуючі засоби. Особливо широко вони застосовуються як стабілізатори при виробництві морозива. І цей молочний продукт, особливо його вищі сорти, з усіма підставами можна віднести до продуктів харчування, що мають радіозахисні властивості.

Подібний ефект мають пектинові речовини – також кислі полісахариди, вміст яких достатньо великий у коренеплодах, зокрема буряках і моркві, багатьох рослинах родини гарбузятих і в першу чергу саме у гарбузах, плодах цитрусових,

плодах сім'ячкових плодових порід – яблуні, груші, айви, деяких кісточкових – сливи, абрикосу, плодах шипшини, смородини, журавлини.

Аналогічну дію проявляє агар-агар, добре відомий бактеріологам і мікробіологам високомолекулярний полісахарид, який виділяють з деяких видів червоних (багряних) водоростей і використовують для приготування твердих поживних середовищ. Агар-агар широко застосовується і в кондитерській промисловості при виготовленні мармеладу, пастили, різних фруктових желе, джемів.

Але, мабуть, найпростішими комплексоутворюючими речовинами слід вважати сполуки фосфору – похідні фосфорних кислот і деякі інші, котрі здатні утворювати з багатьма металами, переважно другої групи періодичної системи елементів, в тому числі зі стронцієм, досить прості, але слабо розчинні і практично нерозчинні в воді комплекси, тобто переводити їх у малодоступний для засвоєння організмом стан. Тому при наявності у складі раціону людини достатньої кількості сполук фосфору значна частина ^{90}Sr може транзитом проходити через шлунково-кишковий тракт. Показано, що додаткове введення в раціон людини фосфатів, наприклад у вигляді гліцерофосфату, зв'язує у травному тракті до чверті ^{90}Sr , що надійшов.

Джерелом фосфору в раціоні людини є риба, м'ясо, горіхи; багато його у зерні злаків, бобових, олійних видів рослин, салатних овочевих рослинах.

Особливо ефективним виявляється спільне підвищення вмісту у раціоні фосфору і кальцію, тобто ці елементи проявляють адитивність у впливові на зменшення надходження ^{90}Sr . І це цілком зрозуміло, так як механізми блокування ними всмоктування цього радіонукліду принципово різні.

Виключно вибірково здатність до комплексоутворення з цезієм і стронцієм мають антоціани – пігменти поліфенольної, точніше флавоноїдної природи, котрі надають рослинам, головним чином квіткам та плодам, рідше листям, характерного червоного, коричневого, синього, фіолетового аж до чорно-фіолетового забарвлення. Хімічною основою всіх антоціанів є фенольні глікозиди, котрі утворюють комплексні сполуки з іонами калію та кальцію, і, відповідно, цезію і стронцію. Антоціани, що надають рослинами червоних відтінків зобов'язані цій властивості особливим сполукам з іонами калію. Пігменти, що надають синього і фіолетового кольорів – сполукам з іонами кальцію. Відповідно, вони утворюють комплекси з цезієм і стронцієм. Велику кількість антоціанів містять плоди чорної смородини, чорноплідної горобини, ожини, баклажанів, темнозабарвлені сорти сливи, винограду, шовковиці, червоної капусти. Але у плодів томатів червоний колір зумовлений за рахунок пігменту каротину, рослини столових буряків зобов'язані фіолетовому забарвленню пігменту бетаїдину – сполукам іншої природи.

Прискорення виведення з організму інкорпорованих радіонуклідів, що відклалися в певних тканинах і органах, є дуже актуальним, але надзвичайно складним завданням. Є відомості, що такою властивістю володіють і деякі форми

антоціанів.

Прискорюють виведення радіонуклідів різні чаї та настої на основі рослинних зборів з відомих лікарських трав. Є дані про те, що зелений чай і навіть звичайний чорний також мають здатність до прискорення виведення не тільки відносно добре розчинного ^{137}Cs , але й ^{90}Sr . Це також пов'язується зі вмістом у чаї і деяких видах рослин великої кількості здатних до комплексоутворення речовин флавоноїдної природи – флавонов, катехінов, тих же антоціанів, рутину, кверцетину, гесперидину та інших, а також дубильних речовин. Всі вони належать до великого класу фенольних сполук, здатність котрих до зв'язування іонів важких металів у стійкі комплекси добре відома. Хоча іноді прискорення виведення радіонуклідів у даній ситуації пояснюється звичайним їх розчиненням та «вимиванням» з організму. Є відомості про те, що здатність прискорювати виведення радіонуклідів не тільки з шлунково-кишкового тракту, але й інкорпорованого у деякі тканини і органи, мають фероцин і альгінати. Так, при побутовій радіаційній аварії в Гойянії (Бразилія) у 1987 р. з метою прискорення виведення ^{137}Cs у 250 чоловік успішно застосовували фероціанід заліза.

Взагалі ж у практиці радіаційної медицини для виведення застосовують спеціальні синтетичні комплексони, що мають вузьку вибірну здатність по відношенню до зв'язування строго визначених радіонуклідів. Це специфічні комплексні сполуки, які, зв'язуючись з радіонуклідом в тканинах, збільшують їх розчинність, прискорюють транспорт і включення в системи природного виведення. Вони одержали назву радіодекорпорантів. Найбільш відомі з них – пентацін, цинкацін, тетацін. Так, пентацін (кальцію тринатрію пентенат) таким чином прискорює виведення з організму інкорпорованих ізотопів плутонію, церію, ітрію, свинцю і цинку. На жаль, він не виявляє помітної дії на швидкість виведення ізотопів цезію і стронцію. Мабуть саме тому не впливає на вміст калію і кальцію, котрі часто-густо виводяться при застосуванні деяких сорбентів і комплексонів, в тому числі і природних.

Високо оцінюючи важливість певних продуктів харчування, в особливості рослинного походження, в мінімізації надходження і накопичення радіонуклідів в організмі людини, слід підкреслити, що вони проявляють свою дію на фоні забезпечення його оптимальними кількостями вуглеводів, жирів в особливості білків. Доведено, що всмоктування більшості радіонуклідів у шлунково-кишковому тракті суттєво залежить від того, надходять вони натще чи з їжею. Наприклад, після 12-годинного голодування поглинання ^{90}Sr зростає в 2–3 рази. Що стосується білків, то, крім того, що вони самі по собі містять багато речовин, що проявляють радіозахисні властивості, достатня їх кількість у раціоні не тільки перешкоджає всмоктуванню радіонуклідів, але й сприяє виведенню ^{137}Cs з крові, м'язів, печінки, нирок, селезінки, легень та інших органів. При білковому голодуванні накопичення цього радіонукліду в організмі зростає. І абсолютно однозначно встановлено, що за низького вмісту білків у раціоні період піввиведення радіонуклідів з організму зростає, і, відповідно, збільшуються поглинуті дози внутрішнього опромінення.

Таким чином, проблема захисту різних компонентів навколишнього середовища від надходження радіонуклідів є такою, що в принципі вирішується на всіх етапах їх міграції трофічними ланцюгами. Вона є головним елементом системи реабілітації забруднених радіонуклідами біоценозів. У практичній реалізації таких радіозахисних заходів приймають участь не тільки радіобіологи і радіоекологи, але й озброєні основами цих наук спеціалісти багатьох інших напрямів – агрономи, меліоратори, гідрогеологи, спеціалісти лісового господарства, технологи харчової промисловості, лікарі радіологи і гігієністи та багато інших. Тільки в такому комплексі може бути достатньо результативно вирішена проблема захисту об'єктів навколишнього середовища від забруднення радіоактивними речовинами і, відповідно, зменшення радіаційного ураження його живих компонентів і в кінцевому підсумку – людини.

4. Післярадіаційне відновлення рослин і тварин

Післярадіаційне відновлення організму – це відновлення після радіаційного ураження функцій клітин його критичних органів, що забезпечує нормалізацію їх діяльності і одужання організму як цілісної системи. Таке визначення поняття «відновлення» з усією повнотою відбиває суть процесів, що приводять до нормалізації функцій багатоклітинного організму, ураженого іонізуючим випромінюванням.

4.1. Класифікація видів післярадіаційного відновлення

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

Згідно наведеної на рис. 9.1 схеми, загальне відновлення досягається за рахунок чотирьох способів післярадіаційного відновлення: репараційного, репопуляційного, регенераційного і компенсаторного.



Рис. 7.8. Види післярадіаційного відновлення живих організмів.

Репараційне, або поклітинне, відновлення, досягається за рахунок відновлення макромолекул клітини, в першу чергу ДНК, та окремих структур клітини – хромосом, мембран та інших. *Репонуляційне відновлення* забезпечується розмноженням клітин, які в момент опромінення перебували в радіостійкому стані і зберегли здатність до поділу. *Регенераційне відновлення* є результатом проліферації тканин і органів, що знаходяться в стані спокою. На відміну від інших організмів цей тип відновлення відіграє дуже важливу роль у вищих рослин. І, нарешті, *компенсаторне відновлення*, яке досягається за рахунок того, що функції пошкоджених клітин (тканин, органів), несучи підвищене навантаження, виконують неушкоджені клітини (тканини, органи), та за рахунок дедиференціації спеціалізованих клітин і тканин у проліферуючі.

4.2. Репараційне відновлення

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

Відповідно розрізняють два типи репарації – від потенційно летальних і від сублетальних пошкоджень. Можливість репарації від сублетальних пошкоджень звичайно доводиться дослідами по фракціонованому опроміненню, в основі яких лежить гіпотеза про те, що якби радіаційне ураження носило повністю незворотний характер, то ефект, викликаний фракціонованим опроміненням при певній сумарній дозі, був би таким же, як і при одноразовому опроміненні у тій же дозі. Але це не так. Величезна кількість даних, одержаних в дослідженнях з найрізноманітнішими організмами свідчить про те, що при фракціонуванні дози ступінь радіаційного ураження зменшується. При цьому ураження тим слабше, чим більший проміжок часу розділяє фракції і чим більша кількість фракцій, на які розділена доза (рис. 7.9).

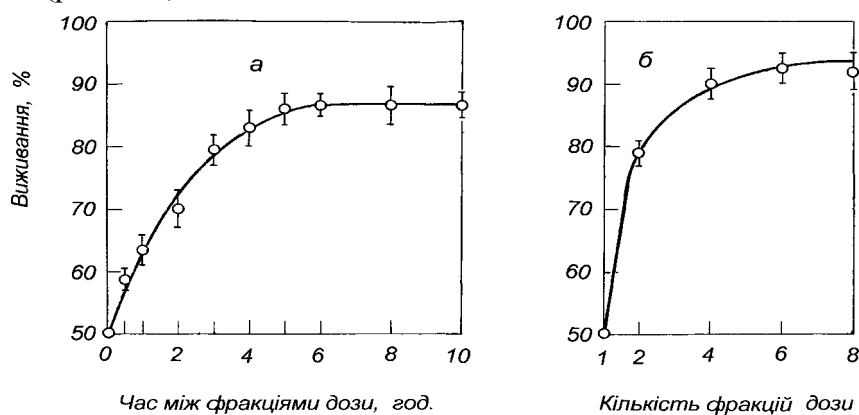


Рис. 7.9. Криві виживання проростків гороху при фракціонуванні дози 8 Гр γ -опромінення: а – дворазове опромінення (4+4 Гр) з різними проміжками часу між окремими фракціями дози, б – різна кількість фракцій дози при однаковому сумарному часі опромінення 3 год.

В сухих системах (насінні, спорах, пилку), при обмеженні доступу кисню ефект фракціонування і потужності дози не проявляється або значно послаблюється. І найбільш переконливе пояснення цього явища можна знайти саме у визнанні реальності існування поклітинного відновлення, обов'язковою умовою якого є підтримування в клітинах активного обміну речовин.

Проте виявити природу відновлення за допомогою прийому фракціонування дози неможливо. Це вимагає проведення спеціальних досліджень з використанням сучасних методів молекулярної біології.

Молекулярне відновлення. Основним пошкодженням клітини при дії іонізуючих випромінювань, як уже не раз відзначалось, є пошкодження молекул ДНК. Головним структурним пошкодженням ДНК – одно- і двониткові розриви її полінуклеотидних ланцюгів. Репарація цих типів пошкоджень, яким приписується головна роль в загибелі клітини, вперше була показана в дослідях з бактеріями, які дають змогу одержувати штами, дефектні на окремі ферменти, що контролюють певні етапи репарації. На рис. 7.10. наведена схема основних етапів репарації однониткового розриву молекули ДНК.

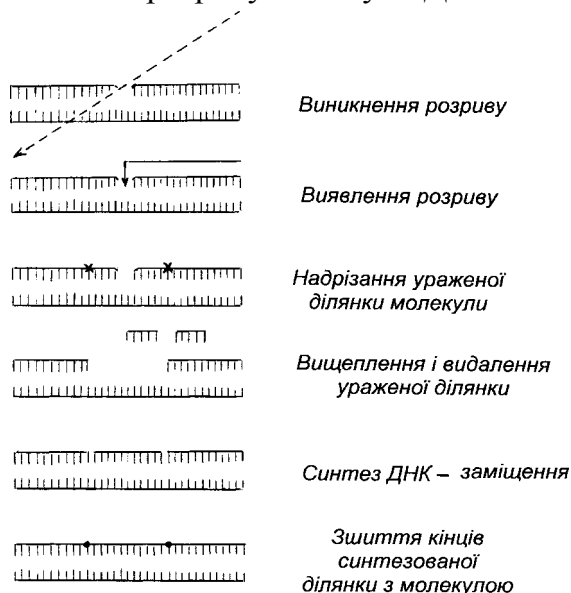


Рис. 7.10. Схема механізму репарації ДНК.

Згідно неї, на першому етапі після утворення розриву відбувається виявлення місця пошкодження за допомогою спеціальних контролюючих систем, котрі отримали назву «клітинної поліції». Потім ділянка полінуклеотидної нитки з пошкодженими нуклеотидами з обох боків надрізається за допомогою ферментів ендонуклеаз, вищеплюється з молекули – інцизія і видаляється – ексцизія. Останній етап здійснюється за допомогою ферментів екзонуклеаз. Розмір утвореного розриву буває різним від декількох одиниць до декількох тисяч нуклеотидів. Вслід за цим на місці бреші відбувається комплементарний синтез ДНК з використанням залишку непошкодженої нитки ДНК в ролі матриці – так звана репаративна реплікація. Цей етап контролюється ферментами ДНК-полімеразами, які беруть участь і у звичайному реплікативному синтезі ДНК. І, нарешті, відбувається

зшивання кінців синтезованої ділянки з полінуклеотидною ниткою.

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

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

Безперечно, механізми репарації ДНК «створені» не для протистояння дії іонізуючого випромінювання. Ендогенні пошкодження ДНК в результаті гідролітичних реакцій, впливу активних форм кисню, та й дії радіаційного фону постійно виникають в клітинах. Підраховано, що в ДНК однієї клітини, що ділиться, протягом доби може виникати до 50000 одониткових розривів, 10 двониткових розривів, 10 міжниткових поперекових зшивок та тисячі інших видів пошкоджень. Переважна більшість їх усувається за допомогою репарації і досить швидко. Так, репарація одониткових розривів здійснюється за 1–4 год., а двониткових – протягом 24 год.

Існують дані і про молекулярне відновлення РНК, деяких білків, зокрема, ядерного білку хроматину, окремих основ ДНК. Але і в їх основі лежать механізми, аналогічні репарації ДНК. Тому репарація ДНК вважається основним механізмом молекулярного відновлення, який зрештою забезпечує відновлення клітин і тканин ураженого іонізуючим випромінюванням організму.

Свідченням актуальності і важливості цієї проблеми є те, що у 2015 г. одна з Нобелівських премій була присуджена саме за вивчення і розкриття механізмів відновлення ДНК.

Відновлення клітинних структур. Ще в 1950-і роки була висунута гіпотеза про можливість відновлення радіаційних пошкоджень на рівні хромосом. Вона була заснована на підставі експериментальних даних про те, що при фракціонуванні дози опромінення кількість аберацій хромосом на клітину суттєво залежить від інтервалу часу між фракціями дози. Але якщо при невеликих інтервалах, вимірюваних хвилинами-годинами, практично завжди спостерігається зменшення числа аберацій, то при подальшому зростанні часу між фракціями або їх кількості результати виявляються досить суперечливими: в одних випадках відбувається їх зменшення до певного рівня, а в інших – після зменшення знову спостерігається збільшення. І практично всі дані, одержані як в дослідах з рослинами, так і з тваринами, описуються або кривою типу 1, або кривою типу 2 (рис. 7.11), яка одержала назву кривої Лейна від імені автора, який вперше виявив таку залежність.

В цілому ж вважається, що в післярадіаційний період відбувається відновлення хромосом. Але досі ще не встановлено якихось певних механізмів їх репарації. Безперечно, що відновлення хромосом, що візуально спостерігається як зменшення кількості їх порушень, являє собою більш складний процес, ніж

відновлення окремих молекул ДНК. Структурна організація хромосом еукаріотів досить складна. Крім ДНК до їх складу входить певна кількість РНК, різноманітні білки, з якими нуклеїнові кислоти утворюють міцні зв'язки. Важко уявити собі, щоб, наприклад, електрон міг зруйнувати таку складну структуру, а ще важче – механізм відновлення, який повинен охоплювати всі перераховані компоненти хромосом.

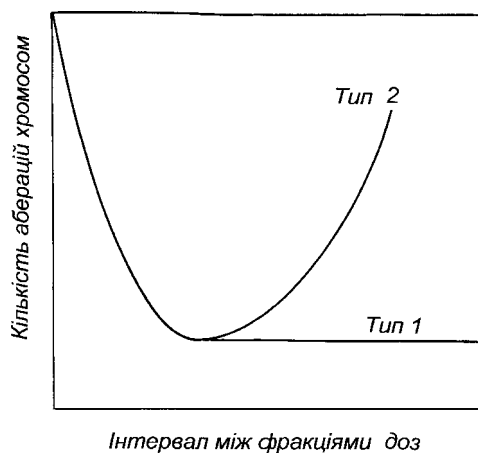


Рис. 7.11 Схематичне зображення двох типів залежності пошкодження хромосом іонізуючим випромінюванням від інтервалу часу між фракціями доз.

Є дані і про репараційне відновлення деяких інших структур клітини і, зокрема, мембран, котрі, відіграють важливу роль в розвитку радіаційного ураження. Встановлено, що структура мембран, її проникливість, пошкоджені іонізуючими випромінюваннями, можуть з часом відновлюватися. Але молекулярні механізми цього процесу досліджені поки що слабо.

Втім, всі клітинні мембрани являють собою рухомі текучі структури, оскільки молекули білків і ліпідів не зв'язані між собою ковалентними зв'язками й здатні досить швидко переміщатися у площині мембран. Тобто, мембрани – структури досить динамічні, легко розтягуються і утискуються при клітинних рухах, можуть змінювати свою конфігурацію. Саме тому вважається, що мембрани швидко відновлюються при ураженнях чинниками різної природи, у тому числі й іонізуючим випромінюванням. Безперечно, до певного ступеня ураження.

Але це може бути й досить складний процес, у який залучаються молекулярні механізми розпізнавання і самозбірки окремих елементів мембран. Так, розгалужені ланцюги глікопротеїнів і гліколіпідів, що виступають з клітинної мембрани, приймають участь у розпізнаванні чинників навколишнього середовища, а також у взаємному узнанні певних її елементів. У цьому випадку близькі за будовою ділянки за допомогою розпізнавальних елементів плазмалеми правильно орієнтуються відносно один одного, забезпечуючи тим самим їх зціплення і відновлення розруйнованої випромінюванням ділянки.

Яку роль відіграє репараційне відновлення в загальному відновленні багатоклітинних організмів, не встановлено. Досить переконливо не показана кореляція між радіостійкістю видів вищих організмів, наприклад вищих рослин, та їх здатністю до репарації. Відомі лише окремі роботи, в яких на основі дуже

вужьких досліджень висловлюється думка про можливість такого зв'язку.

Хоча не викликає сумнівів, що у збереженні кількості проліферуючих клітин процесам репарації повинно належати неабияке значення. Але розгляд часових характеристик кінетики відновлення будь-яких постійно оновлюваних тканин рослин і тварин свідчить про те, що для нормалізації здатності критичних органів до виконання своїх функцій необхідні, як мінімум, декілька клітинних циклів, тобто декілька діб, а не кілька годин, достатніх для поклітинного відновлення. І післярадіаційне відновлення будь-якої багатоклітинної системи є не стільки функцією репарації окремих її клітин, скільки здатністю до розмноженням клітин, які зберегли здатність до поділу – репопуляції.

4.3. Репопуляційне відновлення.

Джерелом репопуляційного відновлення є клітини, які зберегли репродуктивну здатність після опромінення. З одного боку, це клітини, що в момент дії іонізуючого випромінювання перебували в радіостійких періодах клітинного циклу, а з іншого боку – клітини, що знаходилися в стані спокою «поза циклом». Розмноження клітин, які перебувають в радіостійких фазах клітинного циклу. Радіостійкість клітин в залежності від фази і періоду клітинного циклу може розрізнятися в 2–3 рази. Тому завдяки асинхронності поділу, що є нічим іншим, як механізмом підтримки стійкості тканин до ушкоджуючих чинників, в популяціях твірних клітин в будь-який момент часу присутні клітини на різних фазах. І така клітинна популяція після опромінення являє собою досить строкату картину, так як в ній в залежності від радіочутливості окремих клітин будуть присутні три основних їх пули (рис. 7.12): клітини, що втратили здатність до поділу (перебували в момент опромінення в найрадіочутливіших періодах циклу); клітини практично не пошкоджені (знаходились в найрадіостійкіших періодах), і клітини, що несуть потенціально летальні пошкодження, які в залежності від умов і ситуації можуть перейти як в клас 1, так і в клас 2 (які перебували в проміжних за радіочутливістю періодах клітинного циклу).

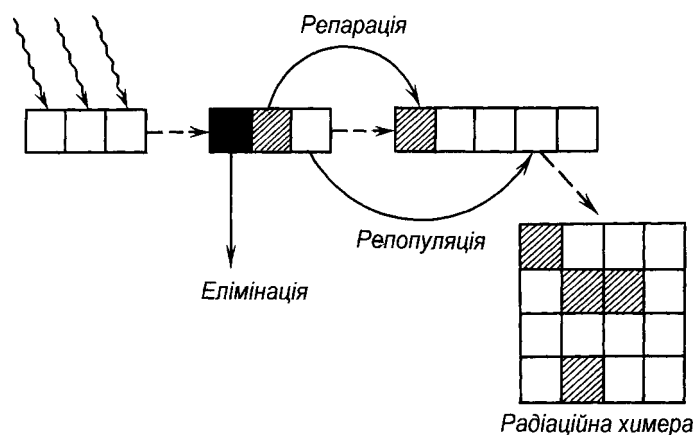


Рис. 7.12 Схема репопуляційного відновлення опроміненого організму (Д.М. Гродзинський, 1972).

Розмноження клітин, які знаходяться поза циклом поділу. Резервом репопуляції є клітини в стані спокою – такі, що перебувають поза циклом поділу. У

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

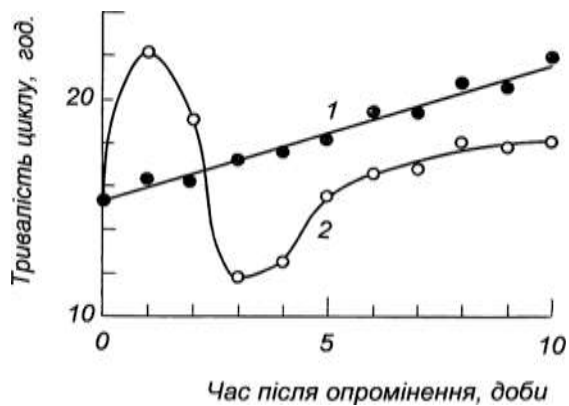


Рис. 7.13. Зміна тривалості клітинного циклу в меристемі кореня гороху в нормі (1) і з часом після γ -опромінення в дозі 4 Гр (2).

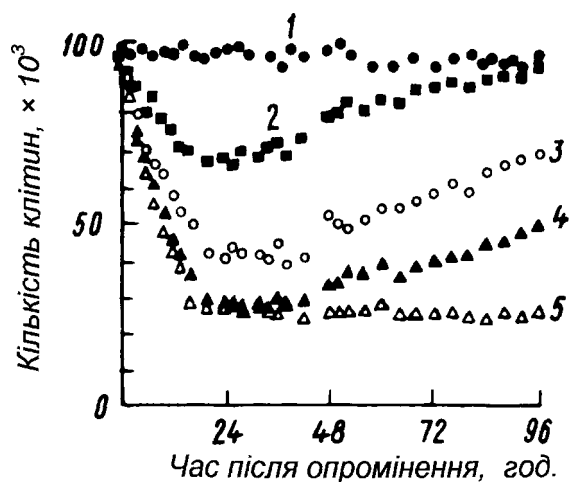


Рис. 7.14 Зміна кількості клітин в меристемі кореня гороху з часом після опромінення: 1 – без опромінення, 2 – 2 Гр, 3 – 4 Гр, 4 – 8 Гр і 5 – 12 Гр (І.М. Гудков, Д.М. Гродзинський, 1974).

Клітини в стані спокою мають більш високу радіостійкість, ніж ті, що діляться. І при дії випромінювань в дозах, що ведуть до втрати репродуктивної здатності у всіх або в певній кількості клітин, що діляться, до процесів репопуляції підключаються клітини, які перебувають поза циклом поділу, але які готові завжди приступити до поділу. Що служить сигналом для них? Безперечно, критична ситуація, що виникає в тканині, її спустошення. Саме тому перехід клітин в стан спокою варто розглядати як спосіб створення резервів тканини, які є фондом її репопуляційного відновлення.

Можливість репопуляційного відновлення і його темпи залежать від розміру пулу клітин, що зберегли здатність до поділу. Із збільшенням дози опромінення його об'єм зменшується і імовірність відновлення цим шляхом знижується.

Теоретично репопуляційне відновлення можливе при наявності в популяції навіть однієї клітини, яка зберегла здатність до поділу. І дійсно, в досліджах з ссавцями було показано, що ті крихти кишкового епітелію, в яких виживає хоча б одна клітина, можуть повністю відновлюватися.

Слід відзначити, що найефективніший на теперішній час прийом лікування променевої хвороби людини, який полягає у трансплантації кісткового мозку здорового індивідууму хворому, являє собою ні що інше, як репопуляційне відновлення кровотворної тканини за рахунок розмноження непошкоджених радіацією клітин донора. Цей прийом застосовується саме тоді, коли при високих дозах опромінення втрачають повністю здатність до поділу кровотворні клітини червоного кісткового мозку.

4.4. Регенераційне відновлення

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

Тут будуть розглянуті два основні типи регенерації у вищих рослин – регенерація тканин, які перебувають в стані спокою, і регенерація органів, які перебувають в стані спокою.

Регенерація тканин, які перебувають в стані спокою. На самому кінчику кореня, на межі з кореневим чохлаком знаходиться особлива група клітин, яка має форму півсфери або двояко випуклої лінзи (рис. 7.15). Клітини цього утворення, яких нараховується не більше 1–2 тис., діляться дуже рідко раз на 200–500 год., в той час як тривалість клітинного циклу переважної кількості оточуючих їх проліферуючих клітин меристеми складає лише 12–24 год. Англійський фізіолог рослин Ф. Клаус, який відкрив і перший почав дослідження цієї ділянки кореня у 1954 р., назвав його центром спокою.

Функції центру спокою до кінця не з'ясовані. Саме тому деякі ботаніки, не вбачаючи його на анатомічних препаратах за звичайних методах фарбування клітин, взагалі ігнорують його існування. Але інші дослідники вважають його основою меристеми, з якої походять всі типи клітин кореня. Деякі дослідники вважають, що клітини центру спокою є надзвичайним резервом меристеми. При пошкодженні меристеми і втраті здатності до поділу її клітин клітини центру спокою починають ділитися і відновлюють первинний клітинний об'єм.

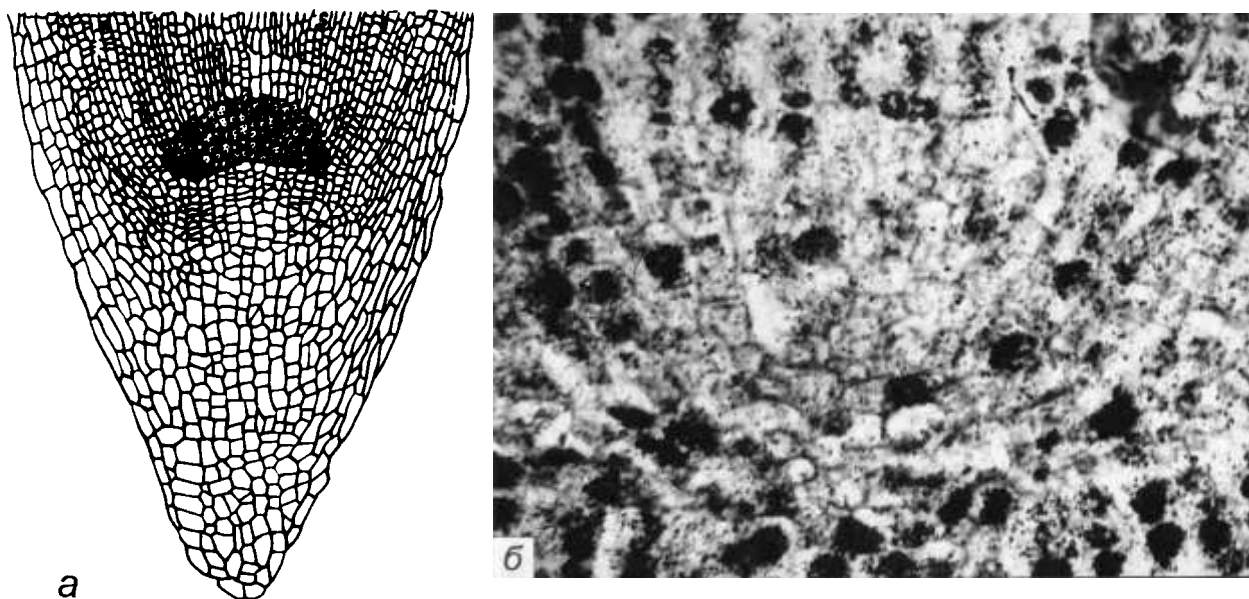


Рис. 7.15. Центр опкою у кінчику кореня: а – схематичне зображення (Ф. Клаус, 1954), б – радіоавтограф зрізу кінчика кореня гороху, одержаного після витримування проростків протягом 24 год. на середовищі з ³H-тимідіном – чітко видна зона більш світлих клітин, що не діляться, – не включають цей попередник синтезу ДНК ($\times 600$) (І.М. Гудков, 1979).

Існує певний критичний рівень пошкодження меристеми, при якому індукується поділ клітин центру спокою. Тільки при втраті здатності до поділу у певної кількості клітин до процесів репопуляційного відновлення можуть підключатися клітини центру спокою. Очевидно, це є результатом міжклітинних взаємодій, що існують між субпопуляціями клітин, які діляться і які перебувають в стані спокою.

Після повного відновлення меристеми, коли кількість клітин, що діляться, досягає в ній рівня норми, виникає новий центр спокою.

Регенерація органів, які перебувають в стані спокою. Верхівкова меристема пагона вищих рослин, яка активно росте, в значній мірі, а іноді і повністю, придушує поділ клітин в меристемах бокових бруньок. Це явище, що отримало назву апікального домінування, являє собою сильну міжклітинну взаємодію, яка відбувається на рівні цілісного організму. Видалення верхівки приводить до зняття апікального домінування і посилення проліферативної активності тканин, які перебувають в стані спокою і пробудженню бокових бруньок. Всі ці явища належать до регенераційних.

Апікальне домінування визначається гормональним типом впливу на точки росту. Це підтверджується чисельними дослідженнями, в яких за допомогою таких рістактивуючих речовин, як кінетин і гетероауксин, вдавалося знімати апікальне домінування або, навпаки, відновлювати його при видаленій верхівковій меристемі. Опромінення рослин іонізуючою радіацією, природно, веде до більшого пошкодження верхівкових меристем, клітини яких активно діляться і ростуть. І якщо у рослини існують органи, які перебувають в стані спокою і мають підвищену

радіостійкість, то її загибель повинна викликати їх регенерацію. І, безумовно, описані в радіобіологічній літературі факти, які свідчать про сильне гілкування опромінених рослин (дихотомія, фасціації), активацію утворення бокових коренів, про підвищення кущування та інше, що призводить до виникнення різноманітних морфологічних змін, пояснюється саме зняттям апікального домінування і посиленням регенераційних процесів.

Найкраще апікальне домінування вивчене у бобових рослин, які здавна вважаються класичними об'єктами для його демонстрації. Бокові бруньки у бобових розміщені в пазухах листків і тому називаються пазушними. За нормальних умов росту і розвитку вони знаходяться в стані спокою протягом всього онтогенезу. Але при знятті апікального домінування, наприклад, шляхом механічного видалення верхівкової бруньки, одна (іноді дві) бокова брунька вступає в ріст і розвивається в пагін, який повністю повторює організацію головного пагона і формує в подальшому всю рослину.

Аналогічна ситуація виникає при опроміненні рослин, як, до речі, і при пошкодженні апікальної бруньки хімічними агентами, її усиханні, відмерзанні і дії інших чинників. Існує мінімальне порогове значення дози опромінення, при якій апікальне домінування повністю знімається. Безумовно, воно залежить від видової радіочутливості рослини і визначається тим рівнем дози, який веде до припинення поділу у певної критичної кількості клітин і інгібування синтезу фітогормонів, що пригнічують ріст пазушних бруньок (рис. 9.9). Саме тоді клітини меристем пазушних бруньок приступають до проліферації.

Регенераційне відновлення дійсно слід віднести до найпотужнішої системи відновлення, якою еволюція нагородила вищі рослини, котрі не мають можливості захищатися від пошкоджень за допомогою інших засобів. В його основі лежать неспецифічні пристосувальні реакції, які розширюють межі зміни умов існування рослин, і механізм регенераційного відновлення ефективний при дії будь-якого пошкоджуючого агента.

4.5. Компенсаторне відновлення

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

Дедиференціація спеціалізованих клітин і тканин. У перебігу розвитку організму в ньому відбувається формування спеціалізованих клітин, тканин і органів за рахунок виникнення протягом морфогенезу відмінностей між однорідними клітинами і тканинами – процес диференціації. Так, меристематична клітина після здійснення декількох (п'яти-семи) поділів переходить до розтягнення,

в процесі якого змінюється її форма і збільшуються розміри, потім до диференціації, при якій зовнішньо однакові клітини набувають різних властивостей та формують різні типи тканин, і далі до спеціалізації, яка характеризується різними рівнями метаболічної активності і ступенем структурної організації тканин і органів.

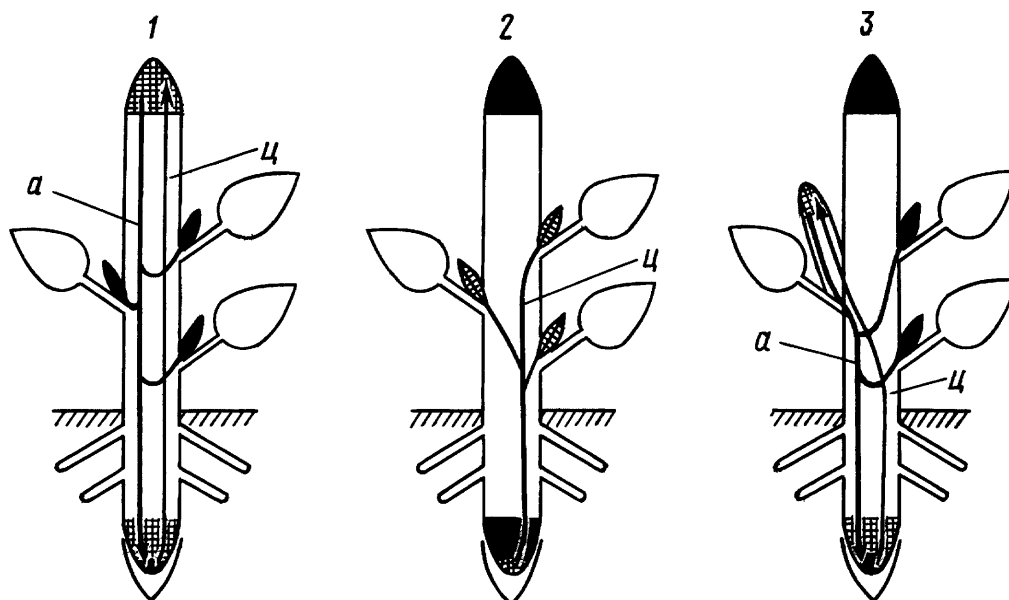


Рис. 7.16 Взаємодія фітогормонів в рослині в нормі і при знятті апікального домінування в результаті опромінення іонізуючою радіацією: 1 – рослина в нормі: цитокініни (ц), що синтезуються в корені, транспортуються в апікальну бруньку пагона, викликаючи поділ її клітин, а синтезовані в ній ауксини (а), рухаючись вниз по стеблу, за допомогою індукції утворення етилену та абсцизової кислоти пригнічують поділ клітин бокових бруньок і центру спокою кореня; 2 – при опроміненні і знятті апікального домінування пригнічується синтез ауксинів, а цитокініни спрямовуються до бокових бруньок і центру спокою, клітини яких починають поділ; 3 – в пагоні відновлюється домінування нового апікального органу, а центр спокою відновлює меристему кореня.

Звичайно диференціація необоротна. Але в умовах пошкодження тканин, при злякисному рості і деяких інших ситуаціях, що ведуть до зміни балансу фізіолого-активних речовин, природний хід руху клітин по життєвому циклу порушується, і вони можуть набути здатності до диференціації в зворотному напрямі, тобто дедиференціації. Саме такі умови можуть скластися при опроміненні рослин, коли, як згадувалося, змінюється баланс фітогормонів, і клітини меристеми втрачають здатність до поділу. При цьому диференційовані клітини починають ділитися і стають джерелом відновлення меристеми або виникнення нових твірних тканин.

Дедиференціація – один з найяскравіших прикладів компенсаторного відновлення, коли опромінені клітини набувають не властивих їм функцій.

До компенсаторного шляху післярадіаційного відновлення слід віднести нерідко констатоване після опроміненні посилення функцій клітин, тканин і органів, які зберегли свої функції. Так, при опроміненні кущових форм злаків при зменшенні кількості стебел ті, що вижили, як правило, бувають більш рослими і

міцнішими, ніж окремі стебла в неопромінену контролі. При пошкодженні генеративних органів і зменшенні кількості зав'язі на рослині сформовані колоски, стручки, плоди виявляються більш продуктивними, ніж в контролі. При зменшенні кількості зерен в суцвітті ті, що залишились, за абсолютною масою перевищують контрольні.

Ці факти можна пояснити з позицій зміни характеру перерозподілу поживних речовин, що надходять з кореневої системи – те, що призначалося для семи, дістається одному. В цьому відношенні не менш ілюстративними, але однозначно трактованими з позицій компенсаторного посилення функцій, є дані, одержані на рівні клітин, тканин. Зокрема, вище згадувалось, що при γ -опроміненні рослин в дозах, при яких кількість клітин в меристемах зменшується в 2–3 рази, різко зростає швидкість їх поділу. Виявляється, що клітини, які залишаються непошкодженими або відновили здатність до поділу, намагаючись поновити початковий клітинний об'єм меристеми, починають активно розмножуватися. В цей період після короткочасного гальмування швидкість поділу клітин суттєво зростала – майже на чверть скорочувалась тривалість їх клітинного циклу. Потім, по мірі досягнення меристемою норми, вона поступово збільшувалась і досягала початкового рівня (рис. 7.14).

Таке, навіть короткочасне, але досить суттєве посилення швидкості поділу клітин є характерним прикладом прояву компенсаторних явищ на рівні клітинної популяції.

Свідченням компенсаторного типу відновлення може бути нерідко спостережуване після опромінення у пошкоджуючих дозах тимчасове посилення синтезу нуклеїнових кислот, білків, фітогормонів, ферментів, макроергічних та інших сполук. Саме наслідком всіх цих процесів і є посилення поділу клітин, яке можна вважати їх інтегральним показником.

В цілому, розуміючи під терміном «відновлення» сукупність процесів, що забезпечують збереження організму від пошкодження або загибелі при дії іонізуючої радіації як системи, якій притаманне виконання певних функцій, варто уважно вивчати особливості прояву певних його реакцій, спрямованих на відновлення саме втрачених функцій. Управляючи цими процесами, можна сприяти більш або менш значному відновленню опромінених організмів у післярадіаційний період.

4.6. Управління процесами післярадіаційного відновлення

Буквально до 1960-х років була поширена думка, що наслідки радіаційного ураження не піддається модифікації у післярадіаційний період.

І хоча часто описувались зміни реакцій опромінених рослин і тварин протягом часу, їх залежність від різних фізичних факторів, це пояснювали звичайно дією на організм умов навколишнього середовища, які не мають безпосереднього відношення до процесів формування радіобіологічних ефектів.

Є не мало даних і про те, до багато хімічних речовин – ті ж відновники, солі різних металів і елементи живлення, гормони, ферменти, макроергічні сполуки та

інші фізіологічно-активні речовини здатні суттєво впливати на хід розвитку радіаційного пошкодження при введенні їх в поживне середовище у післярадіаційний період.

Механізми дії більшості модифікаторів радіаційного ураження як фізичної, так і хімічної природи звичайно пов'язують з їх впливом не на віддалені етапи розвитку радіаційного ураження, а саме на первинні. Так, дія підвищених температур, вологості, газового стану, хімічних відновників пояснюється збільшенням швидкості рекомбінації вільних радикалів – фактором пошкодження, що реалізується в близькому післярадіаційному періоді. З відновлювальними ефектами на рівні репарації молекул ДНК і хромосом часто зв'язується дія низьких температур, ультрафіолетової радіації. Дія деяких чинників хімічної природи, які застосовують перед опроміненням, може тривати і після нього, впливаючи на відновлювальні процеси. Так, безпосередньою участю в процесах післярадіаційного відновлення пояснюється протирадіаційна дія препаратів ДНК, окремих нуклеотидів, ферментів, гормонів та інших.

З пригнобленням процесів репараційного відновлення пов'язана радіосенсибілізуюча дія ряду хімічних речовин. Таку властивість, зокрема, мають специфічні інгібітори репарації ДНК кофеїн, акрифлавін, аміноптерін. Ефективність репопуляційного та регенераційного відновлення визначається, головним чином, темпами розмноження клітин, які зберегли здатність до поділу після опромінення. Тому, діючи на швидкість їх поділу, можна управляти цими шляхами післярадіаційного відновлення. Так, створюючи оптимальні умови для вирощування рослин за допомогою регулювання температурного і газового режиму, освітленості, забезпечення елементами мінерального живлення, фітогормонами-активаторами росту можна сприяти ходу цих процесів. Саме це відкриває деякі, хоча і не такі вже й великі можливості до регуляції наслідків радіаційного ураження. Тому необхідно уважно вивчати і узагальнювати знання про вплив різних факторів на наслідки радіаційного ураження організмів у відповідності зі шляхами післярадіаційного відновлення на різних рівнях організації живого.

Особлива стратегія повинна формуватися у післярадіаційний період щодо опромінених рослин. Як вже згадувалось вище, при аварійних ситуаціях на підприємствах ядерного паливного циклу і деяких інших гострому зовнішньому опроміненню і тривалому радіонуклідному забрудненню можуть бути піддані живі організми на досить значних територіях, що призводить до суттєвого радіаційного ураження біоценозу. Заходи, спрямовані на прискорення його післярадіаційного відновлення, повинні носити комплексний характер і по відношенню до рослинного компоненту визначатися двома основними прийомами: створенням для опромінених рослин в післярадіаційний період оптимальних умов для росту і розвитку та застосування фізіологічно-активних сполук, які прискорюють хід всіх типів післярадіаційного відновлення, а головним чином розмноження клітин, проліферацію тканин і органів, що зберегли ці функції. Це може значно знизити

наслідки радіаційного ураження фітоценозів, в тому числі і лісових угруповань, в умовах господарювання на забруднених радіонуклідами територіях.

4.7. Радіоадаптація

З механізмами протирадіаційного захисту і післярадіаційного відновлення тісно пов'язане явище радіоадаптації – пристосування живих організмів до дії певних рівнів іонізуючого випромінювання. Ця проблема вкрай актуальна і цікавить не тільки дослідників, а й багатомільйонні верстви населення, що вимушені мешкати на територіях з підвищеним вмістом природних чи штучних радіонуклідів в об'єктах навколишнього середовища. До останнього часу вважалося, що популяції живих організмів можуть пристосуватися до дії підвищених рівнів іонізуючого випромінювання тільки шляхом відбору радіостійких особин, тобто тільки протягом багатьох поколінь. Але з'являється все більше даних про те, що механізми радіоадаптації можуть формуватися у живих організмах протягом онтогенезу за рахунок низки радіозахисних реакцій, пов'язаних з індукцією процесів післярадіаційного відновлення, накопичення певних продуктів обміну. І натеper виділяють три основних типи радіоадаптації.

Перший тип – негайна радіоадаптація на основі індукції запуску систем репараційного відновлення під впливом опромінення іонізуючою радіацією. Це явище відносно добре досліджене і отримало назву радіоадаптивної відповіді. В часі цей тип радіоадаптації займає хвилини– години. Однією з форм індукцибельної опромінення репарації ДНК є так звана SOS-репарація, яка може миттєво включатися у дію, знешкоджуючі нанесені молекулі «травми». За рахунок високої ефективності для неї характерна відносно висока частота помилок, що виникають при відновленні первинної структури ДНК.

Другий тип – радіоакліматизація, форма радіоадаптації, пов'язана із зростанням активності функціонування антиоксидантних систем, накопиченням речовин, що мають радіозахисні властивості, наприклад, деяких амінокислот, вітамінів, циклічних сполук та інших і в цілому зміною характеру певних процесів метаболізму, як і його активності. Цей тип радіоадаптації потребує часу, що може дорівнювати тривалості періоду індивідуального розвитку організму, тобто формуватися протягом усього онтогенезу.

Третій тип – еволюційна радіоадаптація, яка пов'язана з відбором більш радіостійких форм індивідів, виникненням нової генетичної інформації, що детермінує нові адаптивні фенотипічні ознаки. Це найбільш тривалий процес пристосування до умов підвищеного радіаційного тиску, який потребує багатьох поколінь і може бути віднесений до мікроеволюційних процесів.

Всі ці три типи радіоадаптації можуть формуватися в організмі водночас, забезпечуючи підвищення рівня його радіостійкості і можливості нормального функціонування всіх систем життєзабезпечення, в тому числі і збереження репродуктивної здатності.

Тема 8

Використання іонізуючих випромінювань у біолого-природничих сферах діяльності людини

1. Радіаційна техніка, що використовується в радіаційно-біологічних технологіях.
2. Радіаційно- біологічні технології в рослинництві.
3. Радіаційно-біологічні технології в тваринництві.
4. Використання іонізуючих випромінювань в харчовій промисловості.
5. Використання іонізуючих випромінювань в медицині.

Розвиток загальної радіобіології та окремих її напрямів відкрив широкі перспективи для використання виявлених закономірностей прояву радіобіологічних ефектів в різних сферах діяльності людини: медицині, сільському господарстві, мікробіологічній, фармацевтичній, харчовій промисловості та інших. Але практичне використання іонізуючих випромінювань вимагає не тільки знання таких закономірностей, а й розробки спеціальних прийомів і операцій, створення принципово нової опромінювальної техніки. Саме при такому комплексному розвитку науки, технології і техніки в радіобіології виникла нова область – *прикладна радіобіологія*. Вона поєднує результати фундаментальних досліджень радіобіологічних явищ, які можуть бути покладені в основу певних технологічних процесів, з кращими техніко-економічними показниками, включає розробку та створення приладів і установок для опромінення живих об'єктів на певних етапах цих технологій при забезпеченні умов радіаційної безпеки людини. Саме тому на стику технологічних наук і прикладної радіобіології виникла ціла низка так званих радіаційно-біологічних технологій (РБТ).

Радіаційно-біологічна технологія – це технологія, яка на певному етапі застосовує опромінення живих організмів іонізуючою радіацією.

І вже десятки таких технологій знайшли широке використання в народному господарстві. Особливо багато їх розроблено для сільського господарства, перш за все для рослинництва, а також для медицини.

Діапазон доз іонізуючих випромінювань, які використовуються в радіаційно-біологічних технологіях, досить широкий – він охоплює дози від декількох десятків грея (сантигреї), які застосовують з метою стимуляції росту і розвитку вегетуючих рослин і тварин, до декількох мільйонів грей, які використовують для опромінення грубих кормів, що містять целюлозу, з метою покращення їх поживних цінностей (рис. 10.1). Тому для опромінення різних об'єктів необхідні джерела іонізуючих випромінювань, які мають різну потужність і різні технологічні можливості.

1. Опромінювальна техніка, що використовується в радіаційно-біологічних технологіях

Довгий час єдиними джерелами іонізуючої радіації були малопотужні рентгенівські апарати і дуже дорогі препарати радію. Це гальмувало широке застосування випромінювань в народному господарстві. Але з 50-х років минулого

століття почалося масове виробництво штучних радіоактивних ізотопів, що зумовило появу порівняно недорогих джерел радіації високих енергій. І хоча зараз в прикладній радіобіології використовуються рентгенівське, γ -, β -, електронне і нейтронне випромінювання, найбільш широке застосування знайшло γ -випромінювання на основі штучних радіоактивних ізотопів ^{60}Co і ^{137}Cs , а також електронне випромінювання прискорювачів. Широкому застосуванню перших сприяють такі характеристики: тривалі періоди піврозпаду (відповідно, 5,3 та 30 років), висока проникаюча здатність випромінювань, відсутність наведеної радіоактивності у опромінених об'єктів, можливість створення джерел будь-якої питомої активності від часток до тисяч кюрі на грам і сприятливі з технологічної точки зору властивості джерел, які дають змогу довго експлуатувати їх в установках різного типу за мінімальних витрат енергії.

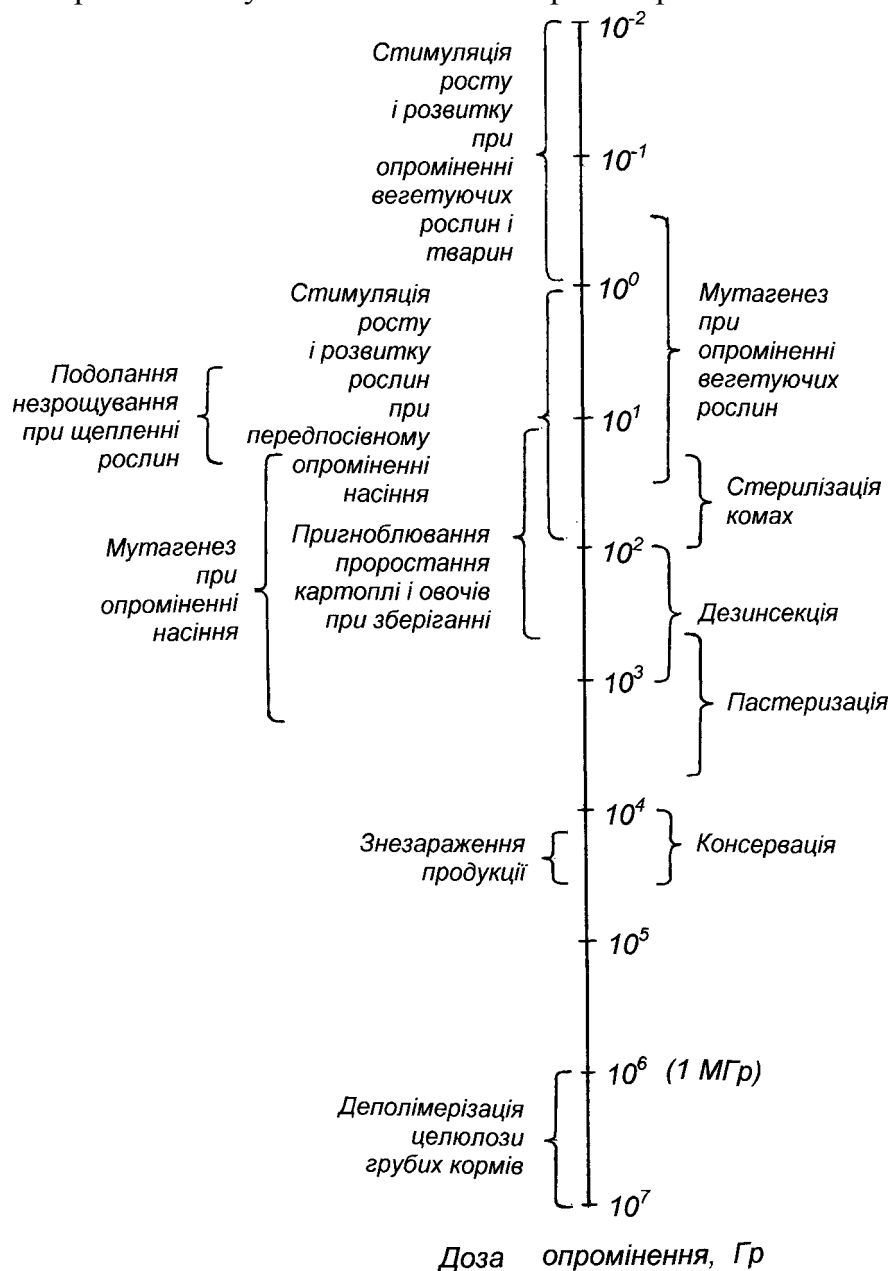


Рис. 8.1. Діапазони доз γ -радіації, що застосовуються у різних радіаційно-біологічних технологіях.

Саме з їх використанням створені установки різних типів, які дають змогу опромінювати найрізноманітніші об'єкти в малих і великих дозах. Крім того, використовуються джерела випромінювання ядерних реакторів – так звані радіаційні контури реакторів, але частіше їх частково або повністю відпрацьовані тепловиділяючі елементи (твели) – вузли реактора, які містять ядерне паливо.

Основні вимоги, які ставляться до джерел випромінювань, що використовуються як в народному господарстві, так і в інших сферах їх застосування, такі: забезпечення певної поглинутої дози в межах необхідної точності; рівномірне одержання заданої дози по всьому об'ємові; забезпечення умов радіаційної безпеки і окупність собівартості технології (порівняльна дешевизна матеріалів, невисока енергоємність).

Таким вимогам відповідають серійні установки, які виробляються в Росії: експериментальні – МРХ-гамма-25М, РХ-гамма-30, „Исследователь”, дослідно-промислові і виробничі установки "Стерилизатор", "Стебель", "Генетик", промислові установки "Колос", "Стимулятор", "Универсал", "Гамма-панорама" та деякі інші.

2. Радіаційно-біологічні технології в рослинництві. Сільське господарство стало одним з найбільших споживачів досягнень радіобіології для вирішення своїх практичних завдань. І це не випадково. Використання іонізуючих випромінювань в рослинництві і тваринництві є досить потужним фактором інтенсифікації агропромислового виробництва. В цілому у світі на теперішній час в рослинництво і плідівництво впроваджено понад 30 різних радіаційно-біологічних технологій. Деякі з них досить широко випробувалися і були впроваджені в Україні.

Передпосівне опромінення насіння для підвищення продуктивності сільськогосподарських рослин. Практично відразу ж після відкриття ефект радіаційної стимуляції привернув увагу біологів як одна з можливостей підвищення урожайності сільськогосподарських рослин. Тепер передпосівне опромінювання насіння – це радіаційно-біологічна технологія, яка дає змогу підвищити економічну ефективність вирощування різних культур за рахунок прискорення росту і розвитку рослин, скорочення періоду вегетації, збільшення врожаю, в деяких випадках і покращення його якості.

Найявний експериментальний матеріал про вплив стимулюючих доз на продуктивність рослин величезний. Він узагальнений в десятках монографій і сотнях оглядових робіт. Розроблені детальні методичні вказівки і практичні рекомендації по передпосівному γ -опроміненню насіння різних сільськогосподарських культур. Були створені спеціальні пересувні установки для опромінювання насіння в польових умовах, зокрема згадані "Колос" (рис. 10.2), "Стимулятор". Проведені масові науково-виробничі випробування технології в різних країнах. У другій половині минулого століття він був впроваджений в значних масштабах в Молдові, Латвії, Киргизії, Казахстані, у багатьох областях Росії, у 60–70-х роках широко випробувався в Україні.



Рис. 8.2. Виробнича пересувна гамма-установка "Колос".

В табл. 8.1 наведені орієнтовні дози γ -радіації, що індукують при передпосівному опроміненні насіння прибавку урожаю різних сільськогосподарських культур. В окремих випадках вона досягає 30–40%.

Впливаючи на процеси обміну, опромінення насіння може приводити до збільшення в рослинах вмісту окремих речовин, які характеризують якість продукції рослинництва. Відмічають збільшення вмісту білку в зерні зернових і зернобобових культур, цукру в цукрових буряках, жиру в насінні соняшнику і льону, вуглеводів та вітамінів в овочах. За рахунок стимуляції росту спостерігали збільшення довжини і міцності волокна у льону і конопель – показників, що характеризують якість продукції цих технічних видів рослин.

Таблиця 8.1

Узагальнені дані про прибавку урожаю сільськогосподарських культур при передпосівному опромінюванні насіння (Д.А. Каушанський, О.М. Кузін, 1984)

Культура	Стимулююча доза, Гр	Прибавка урожаю, %
Кукурудза (зерно)	5–10	10–15
Кукурудза (зелена маса)	5	10–30
Пшениця	5–8	9–11
Ячмінь	10–30	7–15
Гречка	5–7	15
Соняшник	10	10–20
Горох	3	15–40
Люпин	10	18–27
Жито	5–10	12–14
Конюшина	5–10	30
Бавовник	10	10–20
Капуста	20	13–20
Помідор	5–10	10–15
Редис	10	15–30
Морква	25–40	25–35
Огірок	3	10–40
Цукрові буряки	10–20	15–20
Столові буряки	10–15	20–30
Рис	5–20	10–12
Квасоля	7,5–10	10
Льон	7,5–10	12
Соя	7,5	12–17

Прискорюється і досягання рослин. Як правило, воно буває невеликим, складаючи лише декілька днів, тиждень. Але для деяких видів овочевих культур навіть таке більш раннє дозрівання товарної продукції може давати суттєвий економічний ефект.

Передсадивне опромінення органів вегетативного розмноження та розсади для прискорення їх росту та збільшення продуктивності рослин. Стимулююча дія іонізуючих випромінювань проявляється і при опроміненні вегетуючих рослин, окремих їх вегетативних органів. Дози при цьому бувають значно нижчими за ті, що використовуються для опромінення насіння – звичайно вони вимірюються десятими частками і одиницями грей.

Серед сільськогосподарських культур, що розмножуються вегетативно, найбільш широко в цьому напрямі проводиться робота з картоплею. Максимальна стимуляція картоплі відбувається при опромінюванні бульб в дозах від 0,5 до 5 Гр – підвищення врожаю на 18–25% при збільшенні вмісту крохмалю з 15 до 16%.

Досить перспективним є опромінення живців рослин, що розмножуються вегетативно, перед садінням і щепленням. Є немало робіт, які свідчать, що опромінення чубуків винограду, живців агрусу, чорної і червоної смородини в дозах 2–5 Гр стимулює процес коренеутворення, посилює наступний ріст і розвиток коренів і пагонів, активізує інтенсивність дихання і фотосинтезу, що забезпечує підвищення урожайності більш, як у 1,5 рази. Опромінювання живців як цих культур, так і багатьох плодкових – яблуні, груші, сливи, абрикосу та інших покращує зростання прищепи та підщепи.

При передсадивному опроміненні кореневищ м'яти і солодкого кореня в дозах 5–10 Гр спостерігали значно більшого порівняно з контролем пробудження кількості бруньок і утворення пагонів, приросту зеленої маси. Опромінення вусів полуниці в дозах 5–15 Гр приводило до збільшення урожаю ягід на 20–30%. Є дані про підвищення на 6–30% урожаю пера при опроміненні цибулин ріпчастої цибулі та часнику в дозах 0,5–3 Гр. Опромінення розсади помідорів, овочевого перцю, баклажанів, капусти в дозах 0,5–5 Гр зумовлює збільшення урожаю на 25–30% і прискорення його досягання.

Через меншу технологічність у порівнянні з передпосівним опроміненням насіння прийом передсадивного опромінення органів вегетативного розмноження і розсади не набув широкого поширення за винятком, мабуть, опромінення бульб картоплі.

Опромінення насіння та рослин з метою одержання нових сортів. Після відкриття мутагенної дії іонізуючих випромінювань вони зараз же стали використовуватись для одержання нових форм живих організмів. Але як метод отримання нових сортів радіаційний мутагенез набув найбільш широкого застосування саме в селекції рослин.

Процес одержання нового сорту з використанням іонізуючих випромінювань включає два етапи: опромінення рослин для одержання максимальної кількості мутантних форм як вихідного матеріалу для селекції і на основі одержаних

мутантів виведення за допомогою загально прийнятих прийомів і методів нового сорту, його випробування, розмноження та впровадження у виробництво. Специфічним етапом, який саме має відношення до радіобіології, є перший. Він полягає у виборі доз опромінення для насіння, вегетативних органів, генеративних органів, вегетуючих рослин, які індукують виникнення максимальної кількості нових форм рослин, і власне масового опромінення матеріалу.

Кількість мутацій, що виникають під впливом іонізуючих випромінювань, прямо пропорційна дозі опромінення. Але виживання рослин і здатність їх дати насіння для розмноження обернено пропорційна дозі. Тому слід використовувати такі дози, при яких вихід мутантних форм є досить високим і виживає достатня для розмноження кількість рослин. Такими дозами окремі дослідники звичайно вважають ЛД₇₀, ЛД₈₀, навіть ЛД₉₀, коли виживає, відповідно, близько 30, 20 або 10% рослин, частина з яких здатна дати насіння. Відомий шведський генетик і радіобіолог А. Густафссон назвав таку дозу "*критичною дозою*", так як тільки невелике її збільшення приводить до загибелі всієї сукупності рослин.

Російський радіобіолог О.І. Преображенська узагальнила власний і наявний в літературі матеріал з радіостійкості насіння рослин 63 родин, 262 родів, 506 видів і 218 внутривидових форм в книзі "Радиоустойчивость семян растений" (1971), яка дотепер залишається одним із основних орієнтирів для дослідників в галузі радіаційного мутагенезу. В табл. 8.2 наведені значення критичних доз для насіння деяких видів сільськогосподарських рослин, а в табл. 10.3 – для насіння деяких видів деревних і чагарникових плодівих культур та лісоутворюючих порід.

Таблиця 8.2

Критичні дози (ЛД70) γ - або рентгенівського випромінювання для насіння деяких видів сільськогосподарських рослин (О.І. Преображенська, 1971)

Рід і вид	Доза, Гр	Рід і вид	Доза, Гр
Боби кінські	50–125	Овес посівний	150–300
Бруква кормова	2500	Огірок посівний	500
Гірчиця біла	1000–2000	Помідор їстівний	200
Горох посівний	75–250	Просо посівне	300–400
Гречка посівна	250	Пшениця м'яка	150–250
Диня посівна	200	Пшениця тверда	200
Жито посівне	100–200	Редька звичайна	1500–2000
Капуста качана	800–1000	Рис посівний	300
Картопля культурна	250–500	Рицина перська	1000
Квасоля звичайна	100–200	Ріпак посівний	1000–1500
Конюшина червона	2000	Сорго звичайне	300
Кукурудза маїс	100–200	Тимофіївка лучна	100
Льон звичайний	400–1000	Турнепс кормовий	700–1500
Люпин білий	500	Цибуля ріпчаста	100–150
Люцерна посівна	1000–1500	Шпинат городній	200
Морква посівна	300	Ячмінь культурний	200–350

Критичні дози (ЛД70) γ - або рентгенівського випромінювання для деяких видів культурних і дикоростучих деревних рослин (О.І. Преображенська, 1971)

Рід і вид	Доза, Гр	Рід і вид	Доза, Гр
Агрус відхилений	50	Мигдаль звичайний	60–150
Айва довгаста	100	Обліпіха крушиновидна	200
Виноград культурний	150–200	Персик звичайний	60–150
Вишня піщана	75	Слива домашня	60–150
Гранат звичайний	100	Смородина чорна	50
Лимон звичайний	200–300	Яблуня домашня	40–100
Груша звичайна	50	Шовковиця біла	100–200
Береза бородавчата	50–100	Лавр благородний	30
Вільха клейка	50	Липа серцевидна	150
Гледичія звичайна	200	Модрина сибірська	10–50
Горіх чорний	60–150	Піхта сибірська	15
Дуб черешковий	50	Сосна звичайна	15–20
Каштан кінський	150	Шипшина корична	100
Кедр сибірський	10–50	Ялина звичайна	5–10
Кипарис вічнозелений	50	Ялина сибірська	50–100
Клен ясенелистий	200	Ясень високий	450

Для цілей радіаційного мутагенезу використовуються і інші типи іонізуючих випромінювань, зокрема нейтрони. Для різних видів рослин відносна біологічна ефективність (ВБЕ) нейтронів варіює в межах 3–10, хоча може досягати і 20. Існує думка, що нейтрони вибірково діють на геном клітини і значно слабше зачіпають апарат поділу і цитоплазму. У всякому разі, їх ефекти в меншій мірі, ніж рідкоіонізуючих випромінювань, супроводжуються порушенням обміну речовин, і вони менше, ніж γ - або рентгенівське опромінення, впливають на виживання рослин при однаковій кількості мутацій.

Говорячи про виникнення мутацій під дією іонізуючих випромінювань, слід підкреслити, що воно не індукує появу нових типів мутацій у порівнянні з природним мутаційним процесом. Воно лише збільшує їх кількість, що полегшує роботу селекціонерів, даючи їм більше можливостей для відбору. Але при збільшенні частоти появи різних типів мутацій зростає імовірність виявлення таких, які важко виявити в нормі.

Певні переваги при одержанні нових форм рослин порівняно з опроміненням насіння може дати опромінення пилку. На відміну від насінини, у якої зародок складається з тисяч клітин, пилкове зерно являє собою одну клітину з генеративним ядром. І виникаючі в ньому мутації зараз же переходять в усі клітини утвореної із зиготи рослини. Таким чином, рослина вже в першому поколінні після запліднення опроміненим пилком стає мутантною, що у деяких випадках дає змогу скоротити строки селекційного процесу, як мінімум, на рік.

З метою одержання нових форм рослин можна також опромінювати бульби, коренеплоди, цибулини, живці та інші органи вегетативного розмноження.

Використання іонізуючих випромінювань в селекції рослин серед усіх

радіаційно-біологічних технологій, що використовуються в сільському господарстві, одержало найбільше поширення і продовжує розвиватися високими темпами. Так, якщо до 1980 р., за даними Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) в світі було одержано за допомогою радіаційного мутагенезу і впроваджено 225 нових сортів культурних рослин, то на 1990 р. досягло 1500, на 2000 р. – 3000, а на 2015 р. – 3500.

В Україні давно і успішно проводяться роботи з одержання нових сортів сільськогосподарських культур за допомогою іонізуючої радіації. Серед сортів, одержаних українськими вченими широко відомі скоростиглі, високоврожайні, стійкі до низьких температур і хвороб сорти гречки Аеліта, Лада, Галлея; низько алкалоїдні сорти люпину Київський мутант, Мутант 486; сорт м'яти Зимостійка 1; сорт тютюну Безпасинковий та інші.

Радіаційна біотехнологія подолання несумісності тканин і стимуляції зростання при вегетативних щепленнях рослин. Добре відомо, що за допомогою щеплення – трансплантації частини однієї рослини на іншу було вирішене надзвичайно складне завдання збереження властивостей і господарсько-корисних ознак у тих видів рослин, які виявилися нездатними до вегетативного кореневласного розмноження. Однак нерідко при міжсорткових, а тим більше при міжвидових, щепленнях зростання прищепи і підщепи буває ускладнене або не відбувається взагалі. Головною причиною такого незрощення є біологічна несумісність тканин компонентів, зумовлена їх віддаленою біологічною спорідненістю.

Теоретичні основи і практичні можливості пригнічення біологічної несумісності у рослин були розвинуті в працях українських радіобіологів Д.М. Гродзинського і А.А. Булаха в 70-і роки. Ними було показано, що γ -опромінення прищепи або підщепи перед щепленням веде до придушення імунних систем рослин і підвищує якість зростання щеплених компонентів, збільшуючи тим самим вихід прищеплених саджанців. Цей спосіб був покладений, зокрема, в основу радіаційно-біологічної технології підготовки лози в щепленому виноградарстві. В чому її суть?

Відомо, що філоксера – комаха підряду тлі є дуже небезпечним шкідником європейських сортів винограду. Філоксера пошкоджує листя, пагони, вусики, а, головне, підземний штаб і кореневу систему виноградної лози. Найбільш надійним способом боротьби з нею є щеплення європейського сортименту на філоксеростійкі американські підщепи. Однак, внаслідок поганої сумісності вітчизняних сортів з американськими вихід стандартних саджанців складає всього 20–35% від загальної кількості проведених щеплень, а деякі комбінації не зрощуються взагалі. Опромінення підщеп в дозах 15–30 Гр або прищеп в дозі 5 Гр, або обох компонентів дає змогу в 2–3 рази збільшити кількість щеплень у важкосумісних комбінаціях та індукувати їх появу у несумісних.

Крім того, опромінення прищеп дає змогу уникнути однієї важливої і досить трудомісткої в повному розумінні слова «операції» – так званого «осліплення»

прищеп – видалення на них зайвих бруньок (вічок). Ці бруньки, розвиваючись, відволікають на себе поживні речовини, різко гальмують процес калусоутворення, що призводить до поганого зростання його з підщепою. Тому одним з елементів технології виробництва щепленого виноградного садивного матеріалу є їх видалення, яке проводиться, як правило, вручну і вимагає великих затрат праці. Опромінення прищеп γ - радіацією в дозі 25 Гр дозволяє досягти більш, ніж 90%-го їх «осліплення» (при ручному або механічному способі ця цифра не перевищує 70%). При 50 Гр можна добитися 100%-го ефекту.

Опромінювання щеплених компонентів є ефективним і при вегетативному щепленні плодкових культур. Воно значно полегшує одержання вегетативних гібридів рослин при важко сумісних і повністю несумісних комбінаціях не тільки між біологічно віддаленими сортами і видами, але і дозволяє отримувати міжродові гібриди, наприклад, комбінації типу яблуня-груша, слива-абрикоса, абрикоса-персик, малина-ожина.

Радіаційна технологія запобігання проростання бульб, коренеплодів та цибулин при зберіганні. При зберіганні соковитих видів продукції рослинництва, особливо картоплі, коренеплодів, цибулин відбувається погіршення їх якості і значні втрати за рахунок триваючих процесів обміну та проростання. За допомогою опромінення таких видів продукції рослинництва в певних дозах вдається затримати або навіть повністю придушити процеси обміну і проростання меристематичних тканин в зонах росту і суттєво збільшити строки зберігання. Так, встановлено, що γ -опромінення бульб картоплі у дозах від 50 до 150 Гр в залежності від сорту і умов зберігання дає можливість благополучно перенести період весняно-літнього потепління і подовжити строк зберігання до року і більше, тобто в 2–2,5 рази, в умовах неохолоджуваних сховищ при температурі 6–8°C.

Аналогічна ситуація складається при зберіганні коренеплодів. Опромінення близькими до вказаних доз дає змогу продовжити строки їх зберігання. Так, досить ефективним є опромінювання коренеплодів цукрових буряків. Звичайно при зберіганні в буртах до переробки за рахунок триваючих процесів дихання цукристість коренів протягом декількох місяців зберігання може знижуватися у 1,5–2 і більше разів. Опромінення коренеплодів γ -радіацією перед укладкою в бурти дає змогу значно знизити ці втрати.

Опромінення цибулі і часнику після збирання урожаю в дозах 10–100 Гр збільшує термін їх зберігання до двох років при умові підтримування температури і вологості, що запобігають загниванню і пошкодженню шкідниками (рис. 8.3).

Природно, що опромінена у таких дозах продукція не годиться для садіння і може бути використана тільки для харчових та кормових цілей або технологічної переробки.

Радіаційна технологія продовження строків зберігання ягід, фруктів та овочів. Величезна кількість продукції рослинництва і садівництва, гине після збору урожаю внаслідок процесів загнивання, індукованих різними мікроорганізмами. Традиційні способи продовження строків зберігання такої продукції пов'язані зі

всілякими обробками, в основі яких лежать або процеси нагрівання і охолодження, або хімічна дія. Всі вони, як правило, погіршують якість продуктів. Дія іонізуючої радіації в дозах, що сповільнюють розвиток мікрофлори або повністю пригнічують її активність по суті є процесами холодної пастеризації, при якій в продукції знищуються майже всі або навіть всі мікроорганізми, що дає можливість зберігати її тривалий період при температурі навколишнього середовища.

Найбільш переконливі дані одержані при γ - і електронному опроміненні суниці. Дози 2–3 кГр – півлетальні для більшості видів мікроорганізмів продовжують строк її зберігання при 4–5°C у 2,5–3 рази (рис. 10.5) і при 15–18° – 2 рази. Це дає змогу транспортувати ягоди на великі відстані. Значний практичний інтерес являє використання радіаційної обробки для збільшення строків зберігання помідорів, смородини, малини, винограду, абрикосів, персиків, вишні, сливи, яблук, груш, бананів.

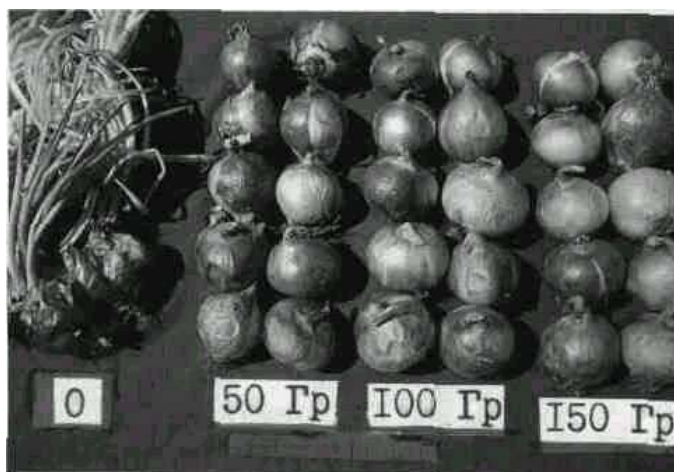


Рис. 8.3. Стан навесні неопроміненої і γ - опроміненої восени цибулі.

На рис. 8.4 наведена типова багатоцільова установка, призначена саме для забезпечення радіаційно-біологічних технологій з опромінення бульб картоплі, коренеплодів, цибулі, фруктів та іншої продукції.

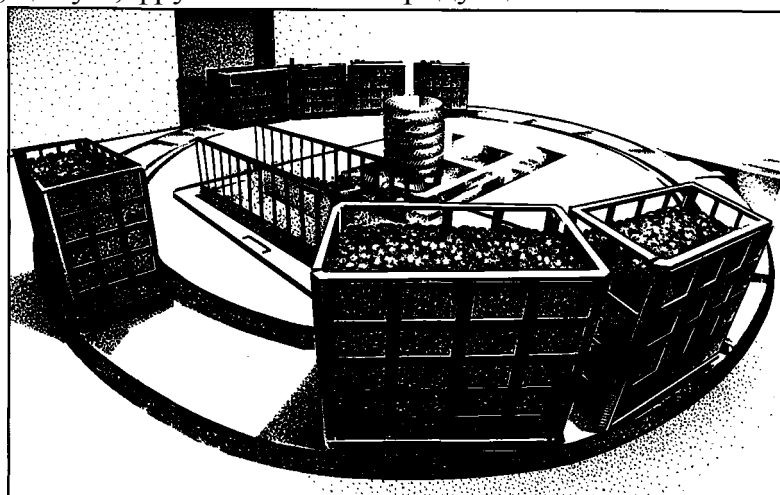


Рис 8.4. Багатоцільова виробнича гамма установка для опромінення картоплі, овочів, фруктів та іншої продукції (Джерело опромінення знаходиться в центрі контейнерів з продукцією які рухаються навколо по колу.



Рис. 8.5. Неопромінена і γ -опромінена суниця через 15 днів при зберіганні за 4°C.

При цьому було встановлено, що γ -опромінення плодів груші і лимону, а також помідору в дозі 3 кГр сповільнює їх дозрівання на 10–15 діб, плодів бананів в дозах 0,25–0,5 кГр – на 8–26 діб. Аналогічний ефект був відмічений при опроміненні зелених та стиглих плодів апельсинів в дозах 0,14–2,8 кГр. Це також дає змогу продовжити строки зберігання цих видів продукції, що особливо важливо при її транспортуванні на великі відстані, наприклад, пароплавом з Африки в Україну. Існує думка, що внаслідок інгібування іонізуючою радіацією процесів метаболізму в нестиглих плодах гальмується утворення фітогормону етилену, який прискорює процеси дозрівання.

Радіаційнастатева стерилізація комах-шкідників сільськогосподарських культур. В основі біотехнології лежить відмінність в радіочутливості соматичних і статевих клітин будь-якого організму. І шляхом експериментальних досліджень радіочутливості різних процесів у комах можна підібрати такі дози, при яких опромінення практично не впливає на нормальне виконання ними більшості фізіологічних функцій, в тому числі і на здатність до спарювання, але в статевих клітинах спостерігаються необоротні зміни. У самців, наприклад, сперма зберігає здатність до запліднення яєць, але розвиток зиготи незабаром припиняється, тобто опромінені самці стають стерильними.

Життєздатність комах, як окремого виду, визначається їх винятковою плодючістю. Відомі види, здатні до відкладення протягом життя, вимірюваного декількома місяцями, десятків тисяч яєць. Саме за рахунок цього випуск в популяцію стерильних самців здатний різко знизити темпи її росту і чисельність. При неодноразовому повторенні прийому протягом декількох років вдається повністю знищити окремий вид в певному регіоні.

У порівнянні з іншими методами, зокрема, з хімічним, ця біотехнологія має ряд переваг. Головною з них є те, що вона спрямована строго проти конкретного виду комах, в той час як хімічні речовини діють і проти інших, в тому числі і корисних. З цих же причин вона є нешкідливою, для тварин і людини, тобто є екологічно чистою.

Біотехнологія являє собою здійснення трьох основних етапів. Головний з них – розведення комах-шкідників певного виду на спеціальних біофабриках.

Другий етап – опромінення комах, якому передуює дослідницька робота по визначенню радіочутливості виду. З цією метою комахи переносяться у камери з зниженою температурою (4–8°C) або піддаються дії спеціального газу, що пригнічує їх фізіологічну активність, в тому числі і рухливість, і потім поміщуються в контейнери, в яких і проводиться їх опромінення. Нерідко опромінення проводять на природній нерухомій стадії розвитку комах, найчастіше – лялечки. І третій етап – випуск опромінених комах в поле з літаків і вертольотів.

До цього часу в різних країнах світу за допомогою використання технології радіаційної стерилізації виконано більше 50 програм по боротьбі з різними видами комах-шкідників. Відомо немало яскравих прикладів успішного її використання. Особливо результативна вона в умовах островних регіонів, де утруднене поповнення місцевих популяцій комах за рахунок їх міграції з інших місць. Так, ця біотехнологія була використана у боротьбі зі середземноморською плодовою мухою в умовах Коста-Ріки. Для цього на Гавайських островах була створена біофабрика продуктивністю 10 мільйонів особин за тиждень. Протягом першого ж року за рахунок декількох випусків стерильних мух щільність популяції знизилась більш, ніж в 130 разів. На острові Рота, який знаходиться в південній частині Тихого океану, в результаті 35 щотижневих випусків 257 мільйонів опромінених комах цей вид був повністю знищений. Ефективна боротьба з плодовою і динною мухами проведена на ряді островів Японії.

Відомі приклади успішного застосування біотехнології і в континентальних умовах. У США в Каліфорнії та в Мексиці за її допомогою була значно знижена чисельність популяції середземноморської плодової мухи, у тій же Каліфорнії – рожевого коробчатого черв'яка бавовнику, в Канаді в Британській Колумбії – яблуневої плодохерки. Для захисту від мігруючих популяцій цих видів комах підтримуються спеціальні карантинні бар'єри, що являють собою систематичний випуск (раз на 2–3 тижні) деякої кількості стерильних комах. В усіх випадках використання цього методу боротьби з комахами-шкідниками виявляється економічно в декілька разів більш вигідним, ніж використання інсектицидів.

Радіаційна дезинсекція продукції рослинництва. Комахи-шкідники сільськогосподарських культур, такі як комірний довгоносик, кукурудзяний довгоносик, рисовий довгоносик, суринамський мукоїд, зерновий шашіль, мучний жучок приносять значну шкоду зібраному врожаю, знищуючи близько 15% світових запасів зерна при його зберіганні. Якісні втрати складають ще більшу величину, так як комахи виїдають головням чином внутрішню найбільш поживну частину зерна з високим вмістом білку.

Для боротьби з ними в основному застосовується хімічний метод з використанням інсектицидів та деяких інших сильнодіючих отрутохімікатів. Він є досить радикальним засобом, але має ряд серйозних недоліків, зокрема, токсичність використовуваних речовин для організму людини. В зв'язку з цим був розроблений і в останні десятиліття все більшого поширення в різних країнах

набув прийом радіаційної дезинсекції зерна – γ - або електронне його опромінення перед завантаженням в елеватор.

Вихідною точкою для оцінки величин доз, необхідних для радіаційної дезинсекції зерна, є летальні дози для комах. Для більшості їх видів вони складають величини порядку 100–500 Гр. Саме тому рекомендовані для дезинсекції дози, як правило, знаходяться в цьому діапазоні.

Але при проведенні дезинсекції окремих партій зерна слід враховувати не тільки індивідуальну видову радіочутливість комах-шкідників, а і стадію їх розвитку в момент опромінення. Так, для стадії лялечки та імаго комірного та кукурудзяного довгоносика летальна доза складає 200 Гр. Але для стадії яйця і личинки – лише 55 Гр. Зрозуміло, що таке урахування може значно прискорити радіаційний обробіток зерна.

В Україні є серійні промислові радіодезинсектори зерна РДЗ-200 і РДЗ 400. В ролі джерела випромінювання в них використовуються прискорювачі електронів з енергією 1,4 МеВ. РДЗ другого типу з виробничою здатністю до 400 тон зерна у годину введений в експлуатацію на Одеському портовому елеваторі в 1980 р. Досвід його експлуатації показав, що радіаційна дезинсекція є ефективним заходом боротьби з комахами-шкідниками не тільки при зберіганні зерна, але й знищення їх при можливому завезенні з-за кордону.

Опромінення успішно використовується для дезинсекції і іншої продукції рослинництва і плодівництва, зокрема, борошна, круп, сушених овочів, фруктів, грибів, лікарських трав.

Радіаційна технологія покращення якості лікарських рослин. Рослини синтезують велику кількість різних речовин вторинного походження, деякі з яких виявляють дуже сильну біологічно активну дію на організм тварин і людини. Це найрізноманітніші алкалоїди, глікозиди, терпеноїди, флавоноїди. Тільки алкалоїдів відкрито близько 10000. Серед них добре відомі кокаїн, морфін, атропін, стрихнін, нікотин, хінін, теобромін, котрі широко використовуються в медицині як лікарські засоби, в сільському господарстві як інсектициди. Фізіологічна роль багатьох з цих речовин в самих рослинах не встановлена. Висловлюється думка, що вони є відходами метаболізму, звідки й пішла назва «вторинні».

При опроміненні насіння, проростків вегетуючих рослин у досить високих ушкоджуючих дозах іонізуючого випромінювання в них нерідко спостерігається посилення синтезу цих вторинних речовин, особливо фенольної і хіноїдної природи, з чим іноді навіть пов'язують механізм дії випромінювань (гіпотеза радіотоксинів), або розглядають як захисну реакцію на дію несприятливих чинників. Так, γ -опромінення насіння дурману звичайного в дозах 50–100 Гр різко підвищує вміст в усіх частинах рослини алкалоїдів тропанового ряду (атропін, скополамін, гіосциамін). Опромінення насіння і проростків барвінку рожевого (катарантус) веде до збільшення в листях вмісту групи алкалоїдів, з яких виділяють онкостатичні препарати вінбластин і вінкрістин. Опромінення рослин наперстянки і строфанта веде до збільшення в них кількості глікозидів дігітоксину та дігоксину,

які використовуються при захворюваннях серця.

Зрозуміло, що при використанні високих доз опромінення може спостерігатись гальмування росту рослин, зниження валового виходу цих біологічно активних речовин. Але експериментальним шляхом можна підібрати такі дози опромінення, за яких при порівняно невеликому гальмуванні приросту біомаси може відбуватися значне збільшення виходу вторинних речовин, що підвищує якість лікарської сировини.

3. Радіаційно-біологічні технології в тваринництві

Іонізуючі випромінювання знайшли застосування і в тваринництві. Але масштаби їх використання в цій галузі сільськогосподарського виробництва поки що поступають рослинництву з цілого ряду причин, головною з яких є менша "технологічність" для цих цілей багатьох об'єктів тваринництва.

Найбільш широкі дослідження з практичного використання стимулюючої дії випромінювань були одержані в птахівництві. Показано, що опромінення курячих яєць до інкубації або в період інкубації в дозах 0,03–0,05 Гр веде до скорочення строку інкубації, збільшення виводку курчат, прискоренню їх постембріонального розвитку і росту. Кури, які виростили з опромінених яєць, починали раніше яйцекладку. Опромінення курчат в дозах 0,2–1 Гр прискорює їх ріст, розвиток і настання періоду яйцекладки. Опромінення добових поросят в дозах 0,1–0,25 Гр веде до прискореного збільшення їх розмірів і маси тіла. Опромінення сперми райдужної форелі в дозах 0,25–0,5 Гр на 35–40% збільшує запліднюваність ікри. Перелік подібних прикладів можна продовжити, але переважна кількість даних такого роду носить чисто дослідницький характер. Тільки спроби використання малих доз в птахівництві доведені до рівня виробничих випробувань.

Не набагато ширше використовується в тваринництві **метод радіаційного мутагенезу**. Тут можна відмітити, що за його допомогою російськими вченими виведена порода норки з оригінальним сріблястим кольором хутра. Є відомості про успішний досвід застосування австралійськими вченими цього методу у птахівництві.

Проте на деяких радіаційно-біологічних технологіях у тваринництві все ж таки слід зупинитись. Біотехнологія радіаційної статевої стерилізації комах-рознощиків хвороб сільськогосподарських тварин застосовується і в цій галузі. Першим прикладом успішного її використання було знищення м'ясної мухи, яка наносить значну шкоду свійським і диким тваринам західної півкулі, здійснене на острові Кюрасао у США ще в 1964 р. Пізніше м'ясна муха повністю була знищена в США і Мексиці. За ініціативою МАГАТЕ в Африці реалізується багаторічна програма боротьби за допомогою цієї біотехнології з мухою цеце – переносником трипаносом, які паразитують в крові ссавців, викликаючи важкі часто з летальним кінцем у тварин так звану „хворобу нагана”, а у людину „сонну хворобу”. В Нігерії і Занзібарі вже знищено три види мухи цеце.

Радіаційне консервування, знезараження кормів та покращення їх

якості. Іонізуючі випромінювання використовують для консервування свіжих, знезараження зернофуражних і комбінованих кормів, а також для радіаційно-хімічної модифікації грубих кормів з метою покращення їх якості при відгодівлі сільськогосподарських тварин.

Так, γ -опромінення зеленої маси рослин в дозах 10–40 кГр замінює силосування, даючи можливість їй добре зберігатися протягом зимового періоду.

Опромінення фуражної картоплі в дозах, що на порядок перевищують рекомендовані для пригнічування її проростання, тобто складають 5–15 кГр, запобігає загниванню бульб. З метою збільшення строків зберігання за рахунок пригнічування розвитку плісняви і зменшення бактеріального обсіменіння проводять опромінення фуражного зерна (овес, ячмінь, кукурудза) з підвищеною вологістю в дозах 1–3 кГр.

Велику небезпеку для людей і тварин являє сальмонельоз – гостре інфекційне кишкове захворювання, яке спричиняється бактеріями роду сальмонела, котрі потрапляють в організм тварин разом з зараженим кормом, а потім через м'ясо, молоко, яйця та інші продукти в організм людини. Звичайні способи боротьби з сальмонелою малоефективні або економічно не вигідні. Сильні хімічні препарати небезпечні для здоров'я людей і тварин. Тепловий обробіток веде до значних втрат поживних речовин і вітамінів. У цьому розумінні радіаційний спосіб боротьби з бактеріями виявився досить результативним, в зв'язку з чим виникла спеціальна радіаційна технологія знезараження кормів від сальмонели.

Дози γ -опромінення, які застосовують для боротьби з сальмонелою, тобто летальні для всіх її штамів, складають величини порядку 4–5 кГр. Опромінення в цих дозах повністю знезаражує борошняні корми та комбікорми, м'ясо-кісткове та рибне борошно, призначені для годівлі тварин. З метою підвищення поживної цінності грубих целюлозовмістких кормів – соломи злакових культур, стрижнів кукурудзяних качанів, вижимок винограду, гілок, хвої і навіть деревного борошна їх опромінюють у дуже високих дозах 1–10 МГр. При цьому відбувається радіаційно-хімічна деполімерізація целюлози і пектину, а також екстракція з корму лігніну – делігніфікація, що підвищують їх здатність до ферментації, покращують використання клітковини мікроорганізмами рубця жуйних тварин.

Вітчизняний та зарубіжний досвід показали значні переваги відмічених технологій радіаційного обробітку кормів у порівнянні з іншими способами їх консервування, знезараження і покращання якості. Головна з них – опромінення зберігає поживну цінність кормів, так як на відміну від традиційних технологій з використанням високих температур радіаційна обробка не знижує в них вмісту білків, вітамінів та інших поживних та біологічно-активних речовин.

Радіаційна технологія продовження строків зберігання продукції тваринництва. У багатьох країнах іонізуючі випромінювання використовують для подовження строків зберігання не тільки продукції рослинництва, а й продукції тваринництва, і в першу чергу м'яса і м'ясних продуктів, особливо при тривалому транспортуванні. Досить переконливий багаторічний досвід свідчить про те, що γ -

або електронне опромінення м'яса в дозах 1–5 кГр дає змогу продовжити термін його зберігання при 0–4°C в декілька разів.

Так, в Австралії і Новій Зеландії, де в жарких умовах перевозять на великі відстані баранину і яловичину, показано, що опромінення м'яса в дозах 4 кГр дає можливість замінювати його транспортування у замороженому вигляді або в контейнерах з інертним газом. Роботами англійських дослідників встановлено, що опромінення свіжої яловичини в дозах 1–5 кГр збільшує строк її зберігання при 2–8°C в 2–6 разів.

Великі економічні перспективи має радіаційна обробка птиці і яєць. Так, канадські дослідники встановили, що доза 5 кГр збільшує збереження свіжих тушок курчат при 4°C від 6 до 16 діб, а при 0°C – до трьох місяців.

Радіаційне знезараження деяких видів продукції тваринництва. Великої шкоди сільському і в цілому народному господарству завдають такі інфекційні хвороби тварин, як чума м'ясоїдних, стригучий лишай, сибірське виразка, лістеріоз. Крім того, одержана від хворих тварин продукція – вовна, хутро, шкіряна сировина, щетина нерідко виявляється і джерелом зараження здорових тварин, а також людей спільними хворобами. Хімічні способи дезинфекції такої сировини досить трудомісткі, а деякі з них, пов'язані з використанням вологих обробок, ведуть до зниження якості продукції. Використання іонізуючої радіації для знезараження цих матеріалів, а також пуху, пера є досить перспективним.

В Австралії вже не одне десятиліття діє промислова гамма-установка для знезараження овечих шкір і вовни – одного з головних об'єктів сільського господарства та предметів експорту цієї країни. Сировина опромінюється в тюках об'ємом близько 1 м³ в дозі 20 кГр, яка індукує загибель мікроорганізмів-переносників перерахованих хвороб. Така стерилізація виявляється значно більш елективною, ніж хімічна, і більш дешевою.

Дослідженнями російських радіобіологів показана висока ефективність радіаційного знезараження хутра норки, песця, лисиці, кролика. Дози γ -радіації порядку 20–25 кГр повністю знезаражують продукцію. При цьому її товарні якості не знижуються.

Така радіаційна технологія дезинфекції продукції тваринництва у порівнянні з хімічною-вологим способом дезинфекції отруйними речовинами підвищує продуктивність праці в десятки разів за рахунок швидкості обробки, можливості опромінення продукції в уже упакованому вигляді.

4. Використання іонізуючих випромінювань в харчовій промисловості

В основному використання іонізуючих випромінювань в харчовій промисловості зводяться до радіаційної пастеризації і консервації продукції, і принципово ці технології не відрізняються від подібних, що застосовуються у сільському господарстві..

Слід відмітити, що не раз ставилося питання про можливий вплив опромінення на якість продуктів харчування, які нібито можуть змінюватися за рахунок різних радіаційно-хімічних процесів і навіть ставати шкідливими для

здоров'я. З цією метою у різних країнах були проведені всебічні дослідження, які дали змогу встановити граничні значення доз опромінення, що можуть бути використані для опромінення продуктів харчування без зміни їх якості. В Міжнародний стандарт включені вказівки про допустимість опромінення з метою дезинсекції зерна та продуктів його переробки, а також харчових продуктів γ -радіацією і потоком електронів в дозах до 1 кГр, причому енергія електронів для запобігання наведеної радіоактивності обмежена 10 МеВ (енергія γ -випромінювання, що використовується для цих цілей на порядок менша). В Україні дозволено опромінення продуктивного зерна з метою дезинсекції в дозах до 1 кГр, а енергія електронів обмежена 4 МеВ.

Треба відзначити, що межа дози 1 кГр застаріла і практично безпідставна. Наведені вище дози, що застосовують для радіаційної пастеризації і консервації продуктів із значно більшим вмістом вологи, тобто значно вищими радіаційно-хімічними виходами, рівно у десять разів вищі. І ще у 1981 р. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) опублікувала звіт, згідно якого γ - і електронне опромінення будь-яких харчових продуктів в дозах до 10 кГр і енергіями до 10 МеВ для здоров'я людини нешкідливі.

Щодо опромінення іншої продукції рослинництва і тваринництва, в тому числі і кормів, то тут обмеження стосуються лише енергії випромінювання, так як за енергій вище 10 МеВ сам опромінений продукт за рахунок наведеної радіоактивності може ставати радіоактивним.

І нині масове опромінення десятків видів продукції рослинництва і тваринництва, а також готових продуктів харчування з найрізноманітнішими цілями проводиться у десятках країн світу від США і Франції до Бангладеш і Таїланду.

Радіаційне консервування продукції рослинництва і плодівництва. Дози вище 10 кГр ведуть до повної загибелі переважної більшості видів мікроорганізмів і можуть бути рекомендовані для радіаційної консервації продукції рослинництва. З цього випадку іонізуючі випромінювання використовуються як для консервації свіжих овочів і фруктів, так і для продуктів їх переробки, наприклад, овочевих і фруктових соків. Найважливішою і цілком унікальною властивістю проникаючої радіації є те, що при її застосуванні як консервуючого засобу не вимагається суворих вимог щодо дотримання стерильності, так як опромінення дає змогу провести процес стерилізації безпосередньо вже в упакованому вигляді.

Крім того, на відміну від термічної обробки, яка застосовується при традиційному консервуванні, при радіаційній не відбувається руйнування в продуктах вітамінів – головного компоненту, що складає цінність овочів і фруктів. Хоча за рахунок радіаційного окислення за таких високих доз деяких пігментів, утворення при радіаційно-хімічних реакціях деяких речовин можуть змінюватися колір і смакові якості продуктів.

Деякі специфічні види продукції рослинництва і плодівництва у процесі звичайної технологічної обробки висушуються і в подальшому зберігаються саме у

такому вигляді. До них належить чай, тютюн, махорка, сухофрукти, пряні рослини, лікарські рослини та інші. У перебігу вирощування, збору, сортування, висушування сировини відбувається її природне зараження різними мікроорганізмами, деякі види котрих можуть приводити до втрат продукції при зберіганні, а деякі можуть являти і потенційну небезпеку для людини. Гамма-опромінення такої продукції в дозах 5–10 кГр повністю знезаражує її. Герметично упакована перед опроміненням у пластикові пакети чи іншу тару, така продукція може зберігатися дуже довго без втрат властивостей і якостей. Цю технологію, яку іноді називають радіаційною дезинфекцією, можна вважати різновидністю радіаційної консервації.

Радіаційне консервування продукції тваринництва. Розроблені спеціальні технології радіаційного консервування курчат, у відповідності з якими їх тушки герметично упаковуються в жерстяні або скляні банки або просто запаюються у пластикові пакети і опромінюються в дозах 5–15 кГр. Виключення з технологій високотемпературних обробок підвищує поживну цінність продуктів.

Аналогічним шляхом консервують молоко і молочні продукти, опромінюючи їх вже в упакованому вигляді.

Як і при радіаційній обробці кормів, при опромінюванні м'яса і м'ясних продуктів особлива увага приділяється дослідженням, спрямованим на розробку ефективних способів боротьби з сальмонельозом. У зв'язку з тим, що летальні для бактерій дози лежать в межах 4–5 кГр, рекомендується, щоб дози, використовувані для опромінення м'яса і м'ясних продуктів в різних технологіях, не були нижче цього рівня. За даними багатьох авторів ці дози є оптимальними, так як при них не змінюється білкова цінність продуктів і не відбувається помітного зменшення вмісту вітамінів.

Все вищесказане дозволяє зробити висновок про великі переваги радіаційної обробки м'ясних продуктів у порівнянні з традиційними низькотемпературними (заморожування) або високотемпературними (консервування) обробками. Одна з головних її переваг – висока економічна ефективність.

5. Використанні іонізуючих випромінювань в медицині

Вважається, що медицина стала першою сферою діяльності людини, яка застосувала іонізуючі випромінювання для своїх проблем. Є підстави вважати, що сам В.К. Рентген був автором ідеї використання відкритих ним променів для діагностики переломів кісток (рис. 8.6), котра досить оперативно була реалізована травматологами, а згодом і іншими напрямками медицини. Американський лікар Г. Джіллман і фізик Д. Груббе буквально через 23 дні після повідомлення про відкриття рентгенівських променів зробили успішну спробу їх застосування для лікування неоперабельного раку молочної залози. До теперішнього часу ці напрями – застосування іонізуючих випромінювань у діагностиці та лікуванні захворювань залишаються основними в їх використанні медициною. Але можна виділити ще два важливих напрями застосування випромінювань в медицині – для стерилізації

медичних інструментів і матеріалів і при трансплантації органів і тканин.



Рис. 8.6. Рентгенограма руки анатома Куллікера, зроблена В.К. Рентгеном у січні 1986 р., тобто через декілька місяців після відкриття Х- променів. Це перша рентгенограма, яка поклала початок застосуванню рентгенівських променів у медичній діагностиці.

Застосування іонізуючих випромінювань у діагностиці захворювань. У теперішній час рентгенівська радіація стала одним з найбільш потужних і широко застосованих інструментом діагностики найрізноманітніших захворювань різних органів. У більшості цивілізованих країн не менш половини населення щорічно проходять рентгенологічне обстеження не так з діагностичною, скільки з терапевтичною метою раннього виявлення захворювань або навіть схильності до них. Принцип одержання рентгенівського зображення заснований на здатності рентгенівських променів проходити через організм, по-різному поглинаючись окремими по щільності тканинами і органами. В результаті на фото- чи іншому світлочутливому матеріалі можна одержати рентгенограму зображення зламаної чи пошкодженої кістки, морфологічні зміни органів, виразки, пухлини, появу в організмі сторонніх тіл.

До теперішнього часу рентгенограма на фотоматеріалі є основним способом одержання рентгенівського зображення. Однак, з кінця минулого століття ситуація почала змінюватись. Вже в багатьох рентгенівських пристроях промені, що пройшли через організм, падають не на фотоплівку, а на світлочутливі кристали, котрі перетворюють їх в електричні імпульси. В результаті зображення переводиться на дисплей комп'ютера, фіксується на відеодиску, опрацьовується за допомогою електронах пристроїв для одержання додаткової інформації і може бути оперативно передане на будь-яку відстань.

Буквально в останні десятиліття у практичній рентгенодіагностиці одержав широке розповсюдження метод рентгенівської комп'ютерної томографії, який дозволяє за допомогою спеціального скануючого пристрою одержати на заданій глибині надзвичайно чітке зображення органу у вигляді своєрідного «тонкого зрізу», на котрому можна визначити будь-які відхилення від норми (рис. 10.7). Більш того, шляхом накладення на знімок багатьох таких зрізів-шарів можна

одержати об'ємне комп'ютерне зображення деталей внутрішньої будови органів. Прилад, який так і називається – рентгенівський комп'ютерний томограф (гр. tomos – шар), в умовах мінімальної дози опромінення дозволяє одержати зображення перетину усього тіла людини в будь-якому місці, роздивитись його з різних боків, одержати синтезоване зображення його органів. Він застосовує не тільки рентгенівське, а й γ -випромінювання, електрони, нейтрони різних енергій, в залежності від завдань. Тоді він називається, відповідно, гамма-, електронна, нейтронна комп'ютерна томографія.

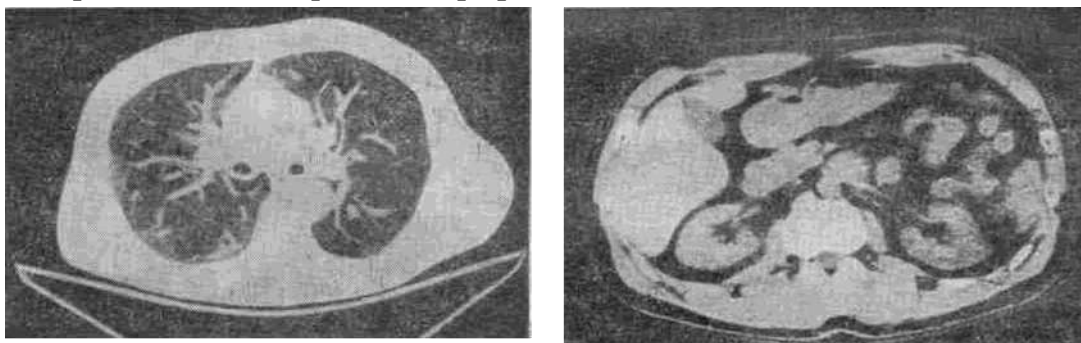


Рис. 8.7. Комп'ютеротомографічна скенограма поперечного зрізу тіла людини на рівні тазу, на якій видно печінку.

Специфічною областю рентгенівської діагностики є мамографія – спосіб виявлення пухлин молочної залози у жінок (лат. mamma – груди) за допомогою особливих низькоенергетичних рентгенівських апаратів, які дозволяють ідентифікувати м'які тканини. Після рентгенографії грудної клітини мамографія у теперішній час – це другий діагностичний метод масового обстеження населення, який дозволяє на ранніх стадіях виявляти виникнення пухлини.

Поява радіоактивних ізотопів відкрила в медицині новий напрям, відомий як радіоізотопна діагностика. Одним з перших методів, розроблених у цій області, була оцінка стану і функцій щитоподібної залози. За допомогою радіоактивних препаратів йоду – специфічного елемента, необхідного для утворення в залозі ферменту тироксину, що вводились в організм, вдається за ступенем його засвоєння упевнено діагностувати порушення у функціонуванні цього органу.

Як при пониженій, та і при підвищеній функції щитоподібної залози в ній можуть виникати ділянки із зміненою структурою, котрі з часом можуть розвиватися у пухлину. За допомогою гамма-сканеру одержують сцинтиграми залози з зображенням картини розподілу ізотопу по органу і пухлині, на підставі котрої приймають рішення про методику лікування чи необхідності операції. Важко переоцінити значення цього методу в діагностиці найрізноманітніших захворювань щитоподібної залози у багатотисячних контингентів населення, що постраждало внаслідок викидів у навколишнє середовище великих кількостей радіоактивного йоду при аварії на Чорнобильській АЕС.

Аналогічно за допомогою радіоактивних ізотопів досліджуються структура і функції інших органів – печінки, нирок, легень, мозку, кісток. Так, для виявлення пухлини у мозку використовують радіоактивний ізотоп миш'яку ^{74}As , котрий

накопичується в ній у значно більших кількостях, ніж у здоровій тканині. Атоми радіоактивного миш'яку випускають позитрони, які, анігілюючи з електронами речовин мозку, утворюють γ -кванти. Гамма випромінювання легко реєструється за допомогою звичайних детекторів, котрі і дають повну картину розподілу ізотопу у мозку. Для виявлення пухлин чи каменів у нирках у якості мітки використовують радіоактивні ізотопи ртуті ^{197}Hg або ^{203}Hg , які вводяться у формі спеціальних препаратів. Для одержання інформації про стан різних функцій печінки застосовують колоїдний розчин радіоактивного золота ^{198}Au , фарбник бенгальський рожевий, мічений ^{131}I . При дослідженні легень хворий вдихує газоподібну мітку або радіоактивний аерозоль с ^{11}C і т.д. В принципі для будь-якого метаболічного процесу можна підібрати, а при необхідності спеціально синтезувати речовину з включеним до її складу потрібним радіоактивним ізотопом. Слід відзначити, що з метою зведення до мінімуму імовірності нанесення шкоди здоров'ю внаслідок опромінення іонізуючою радіацією, для радіоізотопної діагностики застосовують препарати, що містять мізерні кількості короткоживучих ізотопів у складі речовин котрі, як правило, швидко виводяться з організму.

Одним з різновидів методу радіоізотопної діагностики є радіоімунний аналіз – надчутливий спосіб вимірювання дуже малих кількостей гормонів, що містяться, наприклад, в крові хворого. Принцип аналізу нескладний. Дані про концентрацію антигену в біологічному зразку одержують, порівнюючи його інгібуючий вплив на процес зв'язування міченого радіоактивним ізотопом антигену з антитілом і інгібуючий вплив на цей же процес антигену з стандартних зразків. По рівню радіоактивності зв'язаної фази «антиген-антитіло» у порівнянні з радіоактивністю стандарту, оцінюють кількість гормону.

Важливою перевагою цього методу обстеження, який набуває масовості, є те, що радіоактивна речовина не вводиться в організм, а додається до зразка, наприклад, в пробірку з кров'ю, сечею, слиною хворого. Тому людина не піддається ризику, пов'язаного з можливим опроміненням, і тест при необхідності може бути багаторазово повторений.

Застосування іонізуючих випромінювань у лікуванні хвороб. Основним шляхом використання іонізуючих випромінювань в цьому напрямку медицини є радіаційна, або променева, терапія локалізованих злоякісних захворювань. Приблизно 70% хворих мають потребу у радіаційній терапії, котра застосовується як самостійно, так і у сполученні з іншими переважно хірургічними і хімічними методами лікування.

Пухлина росте внаслідок неконтрольованих поділів клітин. Радіаційна терапія, в основі якої лежить закон Бергонь'є-Трибондо, базується на здатності випромінювань за певних доз вибірково вбивати клітини пухлин, що діляться, котрі мають більш високу радіочутливість порівняно з клітинами оточуючих диференційованих тканин, що не діляться.

Головна трудність при проведенні радіаційної терапії – це, так би мовити, «доставка» необхідної летальної для клітин дози до пухлини всередині організму,

не викликаючи надто великих уражень оточуючих тканин. Це досягається за допомогою різних прийомів, основним з котрих є визначення точної локалізації пухлини з наступним опроміненням на спеціальних ротаційних рентгенівських, гамма- або установках іншого типу випромінювань з точним фокусуванням пучка у центрі пухлини (рис. 8.8).

Крім такого зовнішнього опромінення хворого для лікування пухлин застосовують метод вкорінення джерела опромінення безпосередньо в пухлину. Таке джерело у вигляді голки, проволочки або зерен, що містять радіоактивну речовину, оперативним шляхом імплантується в пухлину і залишається в ній на деякий час, звичайно 3–10 діб, для забезпечення необхідної дози. Коли застосовують джерела з короткоживучими радіоактивними ізотопами, наприклад ^{125}I з періодом піврозпаду 60 діб, вони залишаються в тканинах назавжди, де розпадаються і розсмоктуються. Необхідність у повторній операції для їх виймання відпадає.

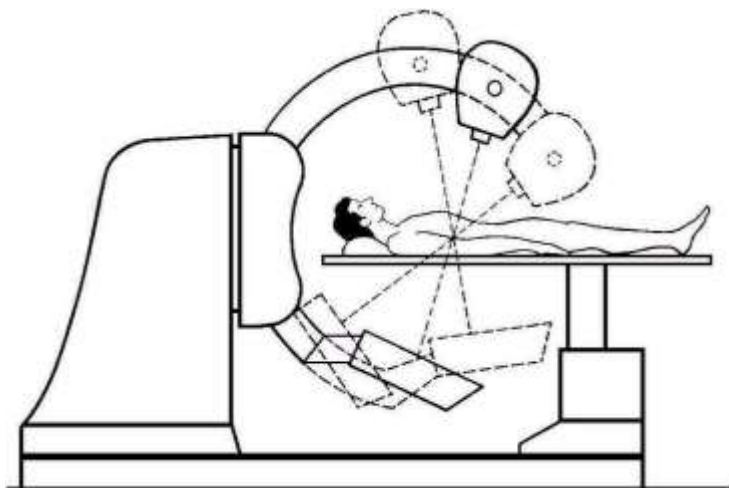


Рис. 8.8. Схема гамма-терапевтичної установки для лікування пухлин людини: джерело опромінення ^{60}Co або ^{137}Cs у свинцевому контейнері з вузьким отвором переміщується в процесі опромінення по окружності у різних площинах, фокушуючи пучок на пухлині.

Застосовують у радіаційній терапії пухлин і радіоактивні ізотопи, котрі можуть локалізуватись у строго визначеному органі чи тканині. Так, ізотопи йоду використовуються не тільки для розпізнавання захворювань щитоподібної залози, але й для лікування деяких її хвороб, передусім вузлуватого зобу і пухлин, що розвиваються на фоні гіперфункції цього органу. При цьому для забезпечення необхідної дози опромінення, безумовно, значно збільшується питома радіоактивність препарату у порівнянні з тою, що застосовується для діагностичних цілей. Вона у цих випадках досягає 0,3–0,5 Гр на залозу.

Своєрідне застосування знайшов ізотоп плутонію ^{238}Pu – його α -випромінювання використовують як автономне джерело енергії у кардіостимуляторах – мініатюрних приладах, що задають нормальний ритм скорочень серця. Такі прилади разом з джерелом живлення операбельним шляхом вживлюються в організм. Плутонієве джерело забезпечує роботу

кардіостимулятора протягом 10–25 років, в той час як електрична батарейка вимагає заміни, тобто повторної операції, кожні 2–3 роки.

У наш час радіаційна терапія стала виключно ефективною технологією боротьби з раком. Вона забезпечує більш високу частоту видужування, ніж при хірургічному втручанні, при лікуванні таких форм злоякісних захворювань, як рак молочної залози, шийки матки, передміхурової залози, гортані, жовчного міхура, язика, піднебіння та багатьох інших. А при лікуванні раку шкіри за допомогою використання м'якої рентгенівської радіації, що не глибоко проникає, виліковується до 95% випадків захворювань.

Радіаційна стерилізація матеріалів і інструментів в медицині. Головним поштовхом для застосування радіаційного способу стерилізації у медицині стало широке впровадження матеріалів і інструментів з пластмас і полімерних матеріалів. Традиційні методи стерилізації на основі високих температур виявились непридатними через низьку термостійкість більшості видів таких матеріалів, а також можливості виникнення при дії на них температурного фактору деяких токсичних продуктів. І в багатьох випадках радіаційна стерилізація виявилась єдиним з можливих способів стерилізації. Більш того, вона яскраво продемонструвала свої незаперечні переваги, головна з яких – це можливість стерилізувати медичну продукцію у вже герметично упакованому вигляді. Крім того, завдяки технологічній простоті – необхідність контролю тільки одного показника – дози опромінення, високої продуктивності і внаслідок цього високої економічної ефективності радіаційна стерилізація стала успішно витіснити звичайні способи стерилізації.

В основі радіаційної стерилізації лежить вже згадувана здатність іонізуючого випромінювання за певних рівнях доз викликати загибель мікроорганізмів. Теоретично величина стерилізуючої дози визначається характером контамінації матеріалу і радіостійкістю мікроорганізмів. Практично ж у більшості країн прийнята стерилізуюча доза 25 або 30 кГр рідкоіонізуючого (звичайно γ -) випромінювання. У свій час в СРСР для підприємств медичної промисловості мінімальна стерилізуюча доза була визначена як 25 кГр. Вважається, що вона є летальною для всіх видів і форм мікроорганізмів.

У теперішній час на основі цієї радіаційно-біологічної технології стерилізують сотні видів медичної продукції. В першу чергу це, безперечно, інструменти і матеріали на основі полімерів: шприци для ін'єкцій, системи взяття і переливання крові, катетери, серцеві клапани, штучні кровоносні судини, предмети ендопротезування, деталі до апаратів штучного кровообігу, штучна нирка та інші чисельні матеріали. Радіаційній стерилізації піддаються шовні і перев'язочні матеріали – кетгут, бинти, вата, тампони та інші, багато які лікувальні матеріали і препарати, що можуть бути стерилізовані і звичайними методами.

Крім перерахованих позитивних якостей радіаційна стерилізація дозволяє зберігати після обробки незмінними первинні властивості і функціональні особливості матеріалів, що особливо стосується лікувальних препаратів. Внаслідок

цього номенклатура матеріалів, що можуть піддаватися радіаційній стерилізації постійно зростає.

Дуже специфічну групу матеріалів і області медицини, котру необхідно піддавати стерилізації, являють собою біологічні тканини – кров, кровоносні судини, кістки, хрящі та деякі інші, що призначені для трансплантації. Ані термічні, ані хімічні методи стерилізації у цьому випадку абсолютно непридатні, так як пошкоджують клітини живих тканин. Не можна для цього застосовувати і вказані для стерилізації дози, котрі можуть призводити до денатурації високополімерних речовин клітин.

Вихід було знайдено в комбінації термічних і радіаційних приймів при щадних рівнях. Так, для стерилізації крові рекомендується опромінення в дозі 7,5 кГр при її підігріві до 60⁰С. Цей режим дозволяє одержати стерильний препарат з практично повністю природними біологічними властивостями. В даному випадку підвищена температура грає роль радіосенсибілізатора, а не стерилізатора.

Застосування іонізуючих випромінювань при трансплантації органів і тканин. Під впливом іонізуючих випромінювань в клітині змінюється контроль біосинтезу білків. З цим порушенням важливої функції клітинного обміну речовин пов'язаний прояв деяких радіобіологічних ефектів на цьому рівні, зокрема пригноблення імунобіологічного пізнання – імунітету, який захищає організм від проникнення чужорідних білків. Застосування радіації для послаблення міжклітинного пізнання, відповідального за цей процес, є основою для вирішення багатьох практичних задач і, зокрема, подолання несумісності при пересадці тканин і органів. Ця методологія знайшла практичне втілення при трансплантаціях нирок, печінки та інших органів.

Безперечно, потужним гальмом для широкого впровадження в нашій країні радіаційно-біологічних технологій не тільки в сільському господарстві, а й в інших галузях, є вкрай недостатня кількість радіаційної техніки спеціального призначення.

Не можна й не враховувати те, що аварія на Чорнобильській АЕС підірвала у світовій громадськості довіру до атомної енергетики як в цілому, так, зокрема, і до можливостей використання ядерної енергії, джерел іонізуючих випромінювань, радіоактивних ізотопів у різних сферах господарської діяльності. Хіба що виняток склала медицина. Тепер, через три десятиліття після тих драматичних подій відбувається повільне, проте більш об'єктивне сприйняття й оцінка можливостей «мирного атому» і, безперечно, з часом вдасться більш строго і зважено використовувати потенціал ядерної енергії не тільки в атомній енергетиці, але й в інших сферах діяльності людини, включаючи аграрне виробництво.

Список використаної літератури:

1. Гайченко В. А. Практикум з радіобіології та радіоекології / В. А. Гайченко, І. М. Гудков, В. О. Кашпаров. – К.: Кондор, 2010. – 286 с.
2. 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, 2018. – 208 с
3. Гродзинский Д.М. Радіобіологія рослин.- К.: Наукова думка, 2017.-380с.
4. Гродзинский Д.М. Радіобіологія.- К.: Либідь, 2018.- 448 с.
5. Гродзинський Д.М. Радіобіологія / Д.М. Гродзинський – К. : Либідь, 2001. – 448 с.
6. Гудков І. М. Основи сільськогосподарської радіобіології і радіоекології / І. М. Гудков, Г. М. Ткаченко. – К.: Вища школа, 1993. – 262 с.
7. Гудков І. М. Радіобіологія/І. М. Гудков. – К.:НУБіП України, 2016. –485 с.
8. Гудков І.М. Сільськогосподарська радіобіологія / І. М. Гудков, М. М. Віннічук. – Житомир: Вид-во ДАУ, 2003. – 472 с.
9. Давиденко В.М. Радіобіологія (словник понятійних термінів) / В.М. Давиденко – Миколаїв : МДАУ, 2017. – 50 с.
10. Давиденко В.М. Радіобіологія (навчальний посібник) / В.М. Давиденко – Миколаїв : МДАУ, 2018. – 229 с
11. Дудок К. П., Старикович Л. С., Дацюк Л. О. Радіобіологія: Навчально-методичний посібник / К. П. Дудок, Л. С. Старикович, Л. О. Дацюк. – Львів: Вид. центр ЛНУ імені Івана Франка, – 2007. – 118 с.
12. Кічно В.О. Основи радіобіології та радіоекології. Навчальний посібник / В.О. Кічно, С.В. Поліщук, І.М. Гудков – К. : Хай-Тек Прес, 2017. – 320 с
13. Константинов М.П., Журбенко О.А. Радіаційна безпека: Навчальний посібник. – Суми: ВТД „Університетська книга”, 2003. – 151с.
14. Кутлахмедов Ю. О. Основи радіоекології: Навч. посіб. / Ю. О. Кутлахмедов, В. І. Корогодін, В. К. Кольтовер; За ред. В. П. Зотова.– К.: Вища шк., 2003. – 319 с.
15. Кутлахмедов Ю.О. та ін. Основи радіоекології: Навч. посібник / Ю. Кутлахмедов, В.І. Корогодін, В.К. Кольтовер; За ред. В.П. Зотова. – К.: Вища школа, 2015. – 319 с.
16. Кучеренко М.Є., Мірутенко В.І. Основи молекулярної радіобіології. –К.: Наук. думка, 2016.- 216 с.
17. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ–97). – К., 1997. – 121с.
18. Радіобіологія : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / Ю. О. Кутлахмедов, В. М. Войціцький, С. В. Хижняк ; М-во освіти і науки України, Київ нац. ун-т ім. Т. Шевченка. – К. : ВПЦ "Київ. ун-т", 2011. – 543 с.