

ЛЕКЦІЯ 2.
ЗАГАЛЬНІ УЯВЛЕННЯ ПРО ПРИРОДУ ДІЇ ІОНІЗУЮЧИХ
ВИПРОМІНЮВАНЬ НА ЖИВІ ОРГАНІЗМИ

Основою взаємодії іонізуючих випромінювань з речовиною, в тому числі з речовинами клітин живих організмів, як уже зазначалося, є іонізація, під час якої електрони відриваються від атомів, приєднуються до інших атомів і виникає іонізований стан атомів та молекул, наслідком якого є індукціювання різних хімічних та біохімічних реакцій в тканинах і органах.

Енергія зв'язку електрона з ядром атома, як відомо, в середньому становить 60 еВ. Енергія найпоширенішого в наш час штучного радіонукліда, що утворився внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС, — цезію-137 дорівнює 660000 еВ. Це означає, що при проникненні в клітину лише один квант спричинить утворення 11000 пар іонів ($660000 : 60 = 11000$), оскільки взаємодітиме з її речовинами до повної втрати або, як кажуть фізики, до повного «розміну» енергії. При дозі лише 1 Р, як підраховали вчені, в кожному 1 см³ живої тканини виникає $2,8 \times 10^9$, а при летальних для ссавців дозах 4—18 Гр (див. табл. 8) відповідно до 5×10^{12} пар іонів. На перший погляд це нібито багато — все ж таки 5 000 000000 000! Але якщо всі ці іонізації виразити у вигляді сумарної теплової енергії, її ледве буде досить, щоб підвищити температуру опроміненої тварини на 0,1 °С.

Загальні уявлення про природу дії іонізуючих випромінювань на живий організм.

На початку 1920-х років німецький фізик Ф. Десауер почав досліджувати причини радіобіологічного парадокса. Він міркував так. В 1 см³ живої тканини міститься до 10 млрд (10^9) клітин, у кожній клітині — до 10 млрд (10^9) біологічно важливих молекул, якщо такими вважати молекули масою понад 5000 (нуклеїнові кислоти, білки та ін.). Отже, в 1 см³ тканини 10^{18} молекул.

При опроміненні організму летальною дозою в такому об'ємі тканини, як щойно підраховали, виникне 5×10^{12} іонізацій, наслідком яких стане утворення саме такої кількості пар іонів. Така ж максимальна кількість молекул може зазнати ушкодження внаслідок опромінення. Відносно загальної кількості молекул це становитиме дуже малу величину — ушкодження зазнає 1 з 200 000 молекул ($10^{18} : 5 \times 10^{12}$). І це призводить до загибелі організму. Чи можливо уявити собі, що коли з будинку, збудованого з 200 000 цеглин, витягти одну цеглину, він упаде? Це неймовірно, навіть якщо цеглину витягти з фундаменту. А живий організм гине. Це і є *радіобіологічним парадоксом*.

Тоді Десауер висунув сміливу гіпотезу: ушкодження не всякої молекули шкідливе для клітини. От коли воно відбувається в особливо відповідальних місцях, наприклад в молекулах хромосом, то це може призвести до ушкодження всієї клітини. А ушкодження багатьох клітин цілком природно уражує весь організм.

Нині 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. Але в живому організмі природа зв'язків між окремими молекулами має не тільки характер хімічних зв'язків, як у неживій речовині, а й виявляється ще у вигляді своєрідних міжмолекулярних взаємодій, конкретних узгоджених взаємовідносин. Ще більшою мірою це виявляється на рівні клітин, окремих систем, органів і в цілому зумовлює постійно діючий обмін речовин, що становить суть прояву життя, принципову властивість, що відрізняє живу матерію від неживої.

Кожна з молекул ДНК є так званою матрицею, своєрідним взірцем для синтезу десятків молекул рибонуклеїнової кислоти (РНК). Тому, якщо молекула ДНК дістала ушкодження своєї структури, вона передає його й молекулам РНК. В свою чергу, 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. Більше 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. Це також є шляхом посилення його біологічної дії. 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, врешті-решт, до різних радіобіологічних ефектів,

Радіобіологічні ефекти

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

Серед соматичних ефектів розрізняють такі 5 основних типів: радіаційна стимуляція, морфологічні зміни, променева хвороба, прискорення старіння, що призводить до скорочення тривалості життя, і загибель. Генетичні, або мутагенні, ефекти утворюють самостійний клас.

Радіаційна стимуляція

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

Описаний вперше французькими вченими М. Мальдінеєм та К. Тувінею ще в 1898 р., усього через 3 роки після відкриття рентгенівських променів, як явище прискорення проростання опроміненого ними насіння, ефект привернув увагу багатьох дослідників, що працювали з іонізуючими, випромінюваннями. В наступні роки з'явилась велика кількість праць з питань радіаційної стимуляції. Нині доведено, що в умовах звичайної радіобіологічної лабораторії при наявності якого-небудь джерела іонізуючого випромінювання можна підібрати для насіння, проростків, вегетуючих рослин, мікроорганізмів, комах, лабораторних тварин та інших організмів будь-якого виду дозу, при якій спостерігається ефект радіаційної стимуляції у тій чи іншій формі. Ці дози варіюють у досить широких межах, що залежить від чутливості організмів до випромінювань, їх фізіологічного стану, виду випромінювання та деяких інших факторів. Наприклад, для насіння стимулюючі дози в, багато разів вищі, ніж для проростків та вегетуючих рослин, для мікроорганізмів — у десятки і сотні разів вищі, ніж для ссавців та комах. У табл. 4 наведено значення цих доз для деяких видів живих організмів, що дає змогу порівняти ці величини.

Таблиця 4. Стимулюючі дози гамма-опромінення для деяких родів сільськогосподарських рослин та інших організмів, Гр

Рід рослини	Доза	Організми	Доза
Боби (насіння)	1—1,5	Клітини людини в культурі	0,05
Боби (проростки)	0,2	Яйця курячі	0,01—0,05
Горох (насіння)	3	Курчата	0,05—1
Горох (проростки)	0,35—0,5	Кури	0,05
Кукурудза (насіння)	5—10	Ікра риби	0,1—0,5
Кукурудза (проростки)	0,5—1,0	Сперма риби	0,25—0,5
Пшениця (насіння)	5—8	Поросята	0,1—0,25
Пшениця (проростки)	1,0—1,5	Лабораторні щури	0,1—0,3
Томати (насіння)	5—10	Лабораторні миші	0,2—0,4
Томати (розсада)	0,5—1,5	Комахи	10—45
Редис (насіння)	10	Найпростіші	5—50
Редис (проростки)	3,0	Мікроорганізми	10—100

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.

Всі ці фізіологічні явища, що спостерігаються візуально, супроводжуються активацією

багатьох процесів обміну речовин: прискоренням дихання, фотосинтезу, мінерального та водного обмінів, що зумовлюють посилене нагромадження в продукції цукрів, білків, вітамінів, жирів.

Про стимулюючу дію іонізуючого випромінювання на організм тварин можна зробити висновок за тими самими критеріями, що й при опроміненні рослин, а саме за прискоренням чи посиленням таких функцій, як ріст, розвиток, продуктивність.

Найбільш показовими і численними вважаються дослідження опромінення стимулюючими дозами курячих яєць, курчат і дорослих курей. Доведено, що при опроміненні яєць до інкубації, під час інкубації, одночасно або протягом всього періоду інкубації дозами 0,01 — 0,05 Гр помітно підвищується виводимість курчат, зменшується відхід курчат, прискорюється на 10—12 днів початок періоду яйцекладки, збільшується несучість птиці в цілому. Опромінення курчат дозою 0,25 Гр сприяє збільшенню їх живучості, прискоренню процесів росту й розвитку, початку яйцекладки. Опромінення дорослих курок у дозі 0,05 Гр збільшує несучість.

Цілком певних фактів радіаційної стимуляції сільськогосподарських тварин дуже мало. Але 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 сперми та ікри риби спостерігається прискорення розвитку ембріонів, а при опроміненні мальків — активізація росту й розвитку.

Радіаційна стимуляція спостерігається не тільки при одноразовому, а й при хронічному опроміненні, коли рослини і тварини опромінюються протягом усього періоду розвитку або значної його частини. Так, спостерігалась стимуляція росту рослин кукурудзи і гречки при опроміненні їх протягом вегетаційного періоду при потужності дози опромінення 0,019 Р/доб. Якщо вважати, що потужність радіаційного фону в середньому становить 10 мкР/год або до 0,00024 мкР/доб, то збільшення його десь у 100 разів може зумовити стимуляцію росту рослин. Схожа ситуація з радіаційним фоном тривалий час була в деяких регіонах України протягом весняно-літнього періоду 1986 р. після аварії на Чорнобильській АЕС. Не випадково деякі дослідники схильні пояснювати небувалий урожай зернових і деяких інших культур того драматичного року саме радіаційною стимуляцією.

Є дані про те, що хронічне опромінення щурів при потужності гамма-опромінення 0,002 Гр/рік (23 мкР/год), або всього у 2—4 рази вище фону, підвищує їх плодючість більш як у 2 рази. Описано також збільшення тривалості життя комах, лабораторних тварин в умовах хронічного опромінення. Однак ці дані заперечуються багатьма радіобіологами.

Морфологічні зміни

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

У вивченні радіобіологічних ефектів у рослин важливе значення має опис різноманітних морфологічних аномалій. Особливо характерні вони 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 які з цих ознак можуть виникати і в інших органах — стеблах, корінні, квітках, плодах, насінні, хоча у них через специфіку будови можуть з'являтися й зовсім нові зміни: наприклад, 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.

Поява більшості з цих ознак пояснюється неоднаковою ушкодженістю окремих клітин, тканин та утворенням клітин із сповільненою швидкістю поділу, ушкодженням хромосом, а також загибеллю окремих клітин і цілих ділянок тканин і навіть органів. Тому різні ділянки тканини або органа ростуть з неоднаковою швидкістю, що й призводить до зміни його форми, посічення, зморшкуватості, скручення та інших відхилень від норми. Такі рослини справедливо можна назвати радіаційними химерами.

Збільшення розмірів і кількості органів, включених до розряду морфологічних змін, треба відрізняти від описаної в попередньому розділі радіаційної стимуляції. Ці аномалії, як і всі перелічені порушення, виникають при набагато вищих дозах опромінення і є проявом збільшення життєвих функцій клітин і тканин» що залишилися неушкодженими або ушкодженими меншою мірою, ніж інші, і які прагнуть виконувати функції втрачених тканин та органів.

Найрізноманітніші морфологічні зміни рослин спостерігалися в зоні аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 р. У 1987 р. і в наступні роки кількість змін значно зменшилась, вони залишилися переважно у хвойних рослин, що змінюють хвою раз на кілька років» а також на багаторічних органах, передусім на гілках.

У тварин цей тип радіобіологічних ефектів можна виділити не завжди, хоч різні зміни в окремих органах і тканинах тваринного організму в різні строки після опромінення описано досить змістовно. Так, при опроміненні тварин у стадії ембріогенезу (розвитку зародка) можливі порушення росту кісток, пропорцій розвитку окремих органів, порушення росту і розвитку в цілому, до, врешті-решт, призводить до виникнення різних потворств.

При опроміненні дорослих особин ушкоджуються насамперед клітини тканин, що перебувають у стані поділу. Саме в цих місцях виникають морфологічні зміни: кольору шкіри й волосяного покриву, випадання волосся, припинення росту рогових утворень та їх відшаровування, катаракта (помутніння кришталика ока), що дістали назву променеви, різні зміни розмірів і форм окремих органів, різні ступені дистрофії. Опромінення тварин може зумовити найрізноманітніші виразки на поверхні тіла або у внутрішніх органах з наступним "утворенням на їхньому місці рубців. Як і в рослин, до цього типу ефектів опромінення відноситься й виникнення під дією радіації пухлин на різних органах. Описано також велику кількість інших порушень, що змінюють характерний вигляд тварин.

Променева хвороба

Променева хвороба — це захворювання, що виникає при дії іонізуючих випромінювань на живий організм і характеризується конкретним комплексом ознак свого прояву.

Найбільш повно вивчено променеву хворобу одомашнених ссавців, у тому числі й сільськогосподарських тварин і птиці. Розрізняють гостру й хронічну форми променевої хвороби.

Гостра променева хвороба тварин виникає звичайно при одноразовому загальному опроміненні. За тяжкістю захворювання розрізняють чотири її ступені: перша — легка, у свиней, наприклад, виникає при дозах опромінення 1—2 Гр; друга — середньої тяжкості, при дозах 2—4 Гр; третя — тяжка, розвивається при дозах 4—6 Гр, і четверта — дуже тяжка, спостерігається при дозах, вищих за 6 Гр. Для більш радіочутливих видів тварин, наприклад для великої рогатої худоби, ці форми променевої хвороби спостерігаються в діапазоні доз, що зміщений у бік менших величин — 0,5—5 Гр; для більш радіостійких, наприклад кролів, навпаки — у бік більших величин — 6—12 Гр.

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

Перший — період первинних реакцій — може спостерігатись вже через кілька годин після опромінення і триває протягом 3—4 діб. Характерними його ознаками є порушення стану нервової системи, що виявляється у формі збудження, яке змінюється пригніченням та слабкістю. Погіршується апетит тварин, порушується ритм роботи серця, виникають задихання, понос, блювання, може підвищитись температура тіла. У периферійній крові вже в першу добу після опромінення спостерігається нейтрофільний лейкоцитоз, абсолютна та відносна лімфопенія, збільшення кількості ретикулоцитів. На кінець періоду у стані тварини відмічаються суб'єктивні поліпшення.

Другий період — латентний (прихований), фаза удаваного клінічного благополуччя залежне від тяжкості хвороби триває від кількох діб до 2 тижнів і більше. Чим вища одержана доза або чим тяжча форма променевої хвороби, тим він коротший. При дуже тяжких формах променевої хвороби цього періоду може зовсім не бути. Стан тварин у цей період розвитку хвороби може здаватися задовільним. Однак уявність цього благополуччя легко підтверджується аналізом крові: виявляються чітка лімфопенія, тромбоцитопенія, зниження кількості нейтрофілів та ретикулоцитів. У кістковому мозку яскраво виражена аплазія. В кінці періоду можуть

спостерігатись крововиливи на слизових оболонках, порушення функцій травного каналу, бронхіт, пневмонія, випадання шерсті. Але в кістковому мозку в другій половині періоду при легкій та середній формах хвороби з'являються ознаки регенерації.

Третій період — розпал хвороби — період виявлених клінічних ознак гострої променевої хвороби залежно від її ступеня виявляється через 1—4 тижні. Знову загальний стан тварини різко погіршується: виникає задихання, погіршується функціонування серцево-судинної системи, органів травлення, спостерігається втрата апетиту, понос, дистрофічні процеси в слизовій оболонці рота, зменшення маси тіла, може виникнути короточасна лихоманка, що періодично повторюється, підвищується температура тіла. Характерною ознакою цього періоду є геморагічний синдром — крововиливи під шкіру, на слизових оболонках, у травному каналі, у мозку, серці, легенях та інших органах. Залежно від одержаної дози та індивідуальної чутливості тварин до опромінення третій період триває від 1 до 3—4 тижнів. Наприкінці його розвивається прогресуюча анемія. При опроміненні в напівлегальних дозах у половини тварин в кістковому мозку та лімфатичних вузлах спостерігається явище повної аплазії, що призводить до загибелі. У другій половині в цих органах відмічаються ознаки регенерації та перехід хвороби через 1—1,5 місяця в четвертий період.

Четвертий період — період відновлення, при легкому ступені гострої променевої хвороби проходить досить швидко і повною мірою. Він характеризується поліпшенням загального стану тварин, відновленням апетиту, нормалізацією температури. Зникає кровоточивість, слабнуть диспептичні явища, як наслідок відміченої вище регенерації в кістковому мозку, поступово відновлюються показники крові.

При середній тяжкості хвороби період відновлення триває 2—2,5 місяця і в цілому видужання завершується за 3—6 місяців.

При тяжкій формі хвороби період відновлення може затягнутись на 7—9 місяців. Але, як правило, повністю тварина не видужує: відмічаються зниження імунітету, послаблення відтворної здатності, можливе скорочення тривалості життя. Нерідко гостра форма променевої хвороби переходить в хронічну.

Дуже тяжкий ступінь гострої променевої хвороби у великих сільськогосподарських тварин триває від кількох днів до кількох тижнів і звичайно завершується загибеллю їх у першому або третьому періоді. При опроміненні в дозах, що перевищують летальні, ранній смертельний кінець може настати вже через 2—4 доби. При дозах, вищих за летальні в 1,5—2 рази, загибель можлива 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.

При середньому і тяжкому ступенях гострої променевої хвороби тварини гинуть, як правило, у третьому періоді. Основною причиною цього звичайно є описані вище геморагічні явища, дистрофічні процеси. Детальніше характерні ознаки гострої променевої хвороби сільськогосподарських тварин наведено в табл. 5.

Хронічна променева хвороба тварин — форма променевого ураження, що розвивається внаслідок тривалого опромінення організму малими дозами загального опромінення або від радіоактивних речовин, що потрапили всередину.

Виділяють три форми хронічної променевої хвороби: легку, середню і тяжку та періодичність протікання, як і при гострій формі. *Легка форма* хронічної променевої хвороби зумовлена опроміненням у порівняно невеликих дозах і протягом короткого періоду, характеризується звичайно функціональними порушеннями переважно нервово-рефлекторного характеру. Після припинення опромінювання ці зміни можуть швидко зникнути.

Для *середньої форми* хвороби характерними є порушення регуляторних систем, функціональна недостатність органів травлення, нервової, серцево-судинної систем і особливо крові. Але після припинення опромінення також настає відновлення, що характеризується репаративними процесами у найбільш радіовразливих тканинах, а також нормалізацією функціональних порушень, іноді з тим чи іншим ступенем їх недостатності. *Тяжка форма* хронічної променевої хвороби, що спостерігається при тривалому опроміненні,

характеризується глибокими морфологічними порушеннями деструктивного порядку в органах кровотворення, травному каналі, нервовій та інших системах. Вона супроводжується поступовим ослабленням діяльності серця, порушенням функцій залоз внутрішньої секреції, виснаженням, зниженням стійкості проти інфекційних хвороб.

Таблиця 5. Характерні ознаки гострої променевої хвороби сільськогосподарських тварин (В. О. Кіршин, О. Д. Белов, В. О. Бударков, 1986)

Показник	Ступінь тяжкості гострої променевої хвороби			
	I	II	III	IV
Тривалість первинних реакцій (перший період), діб	Немає або кілька годин	До 1	До 2—3	Понад 3
Тривалість латентного періоду (другий період), діб	2—7	10—15	8—12	5—10
Тривалість періоду розпаду хвороби (третій період), діб	5—10	10—20	10—30	5—20
Загальний стан тварин	Незначне пригнічення	Помітне пригнічення	Пригнічення, слабкість, хиткість ходи	Сильне пригнічення, слабкість, хиткість ходи
Температура тіла	Без змін або підвищена на 0,3—0,5 °С	Без змін або підвищена на 0,5—0,7 °С	Підвищена на 0,3—1 °С	Підвищена на 0,5—1,5 °С
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 %	Припинення на 100 %
Шерстний покрив	Без помітних змін	В овець випадання шерсті	В овець облісіння голови та нижньої частини кінцівок	Ознаки вираженої бронхопневмонії
Органи дихання	Легка задишка	Задишка, витікання з носа	Задишка, хрипи, витікання 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	Сприятливий	Загибель до 20 % тварин	Загибель 20—60 % тварин	Загибель до 95—100 % тварин

При потраплянні радіоактивних речовин всередину організму хронічна променева хвороба часто зумовлюється тривалим локальним опроміненням окремих органів і систем, що спричинюється вибірковою розподілом їх у тілі та нагромадженням в окремих органах. Наприклад, ^{131}I концентрується переважно в щитовидній залозі, зумовлюючи опромінення цього важливого органа ендокринної системи ссавців; ^{90}Sr — у скелеті, опромінюючи кістковий мозок — основний кровотворний орган.

При лікуванні променевої хвороби тварин треба орієнтуватись на її можливий кінець або одержану твариною дозу опромінення, ступінь променевої хвороби. Якщо прогнозується дуже тяжкий, а нерідко й тяжкий ступінь гострої променевої хвороби, то лікувати таку тварину з точки зору економіки недоцільно, а коли легкий або середній ступінь, то є сенс у лікуванні.

На початку розвитку хвороби рекомендується провести переливання крові чи введення кровозамінників, внутрішньовенне введення 25—40 % розчину глюкози з аскорбіновою кислотою (вітаміном С) та ціанкобаламідом (вітаміном B_{12}), надалі активно застосовувати для лікування антибіотики, транквілізатори, глобуліни сироватки крові, нуклеїново-кислий натрій, різні антигеморагічні засоби та ін.

При надходженні великої кількості радіоактивних речовин через травний канал слід застосовувати адсорбенти — водну суміш кісткового борошна, цеолітів, при надходженні через легені — відхаркувальні засоби.

Головна мета лікування — запобігти патологіям та усунути їх в органах, кровотворення, травному каналі, легенях, відтворювальній та нервово-ендокринній системах.

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

У радіочутливих рослин родини бобових (кінських бобів, гороху, квасолі) такі зміни можна виявити вже через кілька годин після опромінення дозами 1—3 Гр. Зміни швидкості поділу клітин виявляються, як правило, не раніш ніж через 12—24 год, а помітне гальмування росту — ще пізніше.

При дозах, близьких до напівлетальних (для названих культур 4—12 Гр), ці процеси рееструються значно швидше і в частини рослин вже через добу можна спостерігати практично повне припинення поділу клітин та ростових процесів. Однак протягом ще тривалого періоду можуть підтримуватись процеси фотосинтезу, дихання, мінерального та водного обміну.

Як і в тварин, при променевої хворобі підвищується сприйнятливість рослин до інфекційних хвороб, знижується їх стійкість проти несприятливих факторів, зменшується потреба в поживних речовинах, послаблюються відтворювальна здатність і продуктивність.

Існує думка, що уражені променевою хворобою рослини не можна використовувати в їжу та для годівлі тварин, оскільки вони нібито можуть спричинити променевою хворобу у людини і тварин. Ця думка неправильна і ні на чому не ґрунтується. Нині відомі десятки технологій дезинфекції, стерилізації, пастеризації продукції рослинництва і тваринництва, основою яких є опромінення її іонізуючою радіацією у великих дозах. Найдбайливіше медико-гігієнічне дослідження опромінених продуктів показало їх повну нешкідливість. Деякі з цих технологій описано в останньому розділі.

Інша справа, коли радіоактивні речовини потрапляють всередину рослин. У цьому разі вони дійсно при годівлі тварин можуть бути небезпечними для здоров'я тварин та людини, навіть коли самі не несуть ніяких ознак променевої хвороби.

Прискорення старіння і скорочення тривалості життя

Існує пряма кількісна залежність між скороченням тривалості життя і дозою іонізуючого випромінювання. Проте, як вважають геронтологи — вчені, що вивчають закономірності старіння організмів, прискорення старіння і скорочення тривалості життя не обов'язково повинні бути неминучими або наслідком один одного. Справді, як зазначалося в попередньому розділі, скорочення тривалості життя може бути наслідком променевої хвороби, як і індукції лейкозів, пухлин та інших причин, але воно ніяк не пов'язане із справжнім старінням.

Старіння — це закономірний руйнівний процес вікових змін організму, що веде до пониження його адаптаційних можливостей і збільшення імовірності смерті.

Старіння властиве всім живим організмам і відбувається на всіх рівнях організації живого — від молекулярного рівня до рівня організму.

Старіння сільськогосподарських тварин на рівні організму виявляється у послабленні функцій основних фізіологічних систем (нервової, ендокринної, серцево-судинної, травної та ін.), зниженні контролю за їх діяльністю, зміні реактивності щодо дії гормонів, порушення на етапі надходження інформації в нервові центри.

Старіння рослин хоч і має певну специфіку прояву ознак, особливо помітних саме на рівні організму, в цілому також характеризується послабленням функції основних фізіологічних систем (фотосинтезу, дихання, транспортування елементів живлення і метаболітів, водного обміну та ін.), розладом систем регуляції, послабленням реактивності щодо дії специфічних гормонів рослин-фіто-гормонів.

Усі перелічені процеси є об'єктами пильної уваги радіобіологів, оскільки вони змінюються під впливом опромінення іонізуючої радіації і при високих її дозах пригнічуються нею. Саме це і прискорює процес природного старіння організму і скорочення тривалості життя.

Загибель

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

Смерть теплокровних тварин, якими є сільськогосподарські тварини, зумовлена передусім

припиненням дихання і кровообігу. В зв'язку з цим виділяють два основних види смерті — клінічну й біологічну, або справжню. По закінченні періоду клінічної смерті, коли ще можливе повноцінне відновлення життєвих функцій, настає біологічна смерть — необоротне припинення фізіологічних процесів практично в усіх клітинах і тканинах організму.

Окремі органи рослин мають автономність, що є однією з принципівих властивостей, за якими розрізняють рослинні і тваринні організми. Інакше кажучи, рослини можуть зберігати деякі функції навіть при загибелі систем і органів, що мають високу чутливість до радіації. У них не настає при цьому загибелі усього організму, як при ураженні деяких органів тварин. Тому навіть при високих дозах опромінення, що пригнічують поділ клітин в усіх утворювальних тканинах рослини — меристемах, а відповідно, тих, що повністю інгібують процеси росту та розвитку, опромінені рослини протягом досить тривалого часу (кілька тижнів) можуть зберігати життєдіяльність, виконуючи, як уже зазначалося, функції дихання, фотосинтезу, мінерального і водного обміну та ін. Кінець кінцем вони в'януть і засихають. Отже, як бачимо, на відміну від загибелі тварин, зареєструвати загибель рослини не завжди вдається досить швидко і достовірно (явні ознаки загибелі сумно відомого «рудого лісу», що дістав смертельну дозу під час аварії на Чорнобильській АЕС протягом квітня — травня 1986 р., стали очевидними лише наприкінці року).

Проте, оскільки причиною загибелі рослин є загибель їх меристем, її можна зареєструвати вже через 2—3 дні після опромінення в смертельних дозах після припинення поділу клітин. Можна констатувати загибель меристем і неозброєним оком по специфічному побурінню кінчиків коренів через 6—10 днів після опромінення. Побуріння меристем пагонів можна виявити, розкривши вкриваючі їх листочки.

Генетичні зміни

Соматичні ефекти, розглянуті вище, виявляють тільки у безпосередньо опроміненому організмі. Генетичні, або спадкові, ефекти передаються нащадкам. Вони виникають внаслідок мутацій, тому їх називають ще *мутагенними ефектами*. Мутація — це порушення, що виникають у спадковому матеріалі і призводять до зміни окремих ознак організму або навіть до виникнення нових ознак.

Іонізуюче випромінювання на відміну від багатьох інших шкідливих факторів, про які йшлося на початку книги, має здатність зумовлювати порушення у спадковому матеріалі і сприяти виникненню мутацій. Тому генетичні ефекти дуже небезпечні при опроміненні живих організмів. Вони можуть призводити до появи у наступних поколіннях (за даними дослідів з мікроорганізмами, рослинами, комахами, дрібними лабораторними тваринами — організмами, що мають швидку і високу відтворюваність — до 15—20-го покоління) нових форм організмів із зміненими властивостями — виродків.

Залежність кількості виниклих мутацій від дози іонізуючої радіації має лінійний або близький до лінійного характер. З одного боку, це свідчить про те, що ступінь генетичного ушкодження збільшується прямо пропорційно дозі, а з другого — на безпороговість цієї радіобіологічної реакції. Тобто, якою б малою не була доза опромінення, вона індукціюватиме мутації. В цьому головна підступність іонізуючих випромінювань — при малих дозах організм не зазнаватиме ніяких соматичних ушкоджень, але вони можуть виявитись у його нащадків.

Мірою генетичної дії іонізуючих випромінювань є доза, яка подвоює кількість мутацій. Оцінити її нелегко. Для сільськогосподарських тварин-ссавців, деяких радіо-чутливих видів рослин діапазон цієї дози досить широкий — від 0,1 до 1 Гр. При підвищенні радіаційного фону, ступеня забруднення продуктів харчування і кормів радіоактивними речовинами ймовірність виникнення мутацій зростає.

Мутації, що виникають при опроміненні в статевих клітинах ссавців, можуть бути настільки серйозними, що плід, який формується з них, може стати нежиттєздатним і загинути. Такі мутації називають *летальними*, тобто *смертельними*. В інших випадках мутаційні зміни можуть бути сумісними з життям, але виявляються у вигляді виродків різного ступеня, спадкових хвороб. З підвищенням дози збільшується небезпека виникнення обох типів мутацій. Особливо велика вона для нащадків тварин, що пережили променеву хворобу середнього та важкого ступенів.

Близькі і віддалені наслідки радіаційного ураження

Залежно від часу прояву після опромінення радіобіологічні ефекти поділяють на близькі

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

Віддаленими наслідками радіаційного ураження ссавців вважають такі морфологічні зміни, як злоякісні новоутворення — лейкози, ракові пухлини. Типовим віддаленим наслідком морфологічної природи є променева катаракта. До них відносять також нефросклероз — хворобу, що виникає внаслідок морфологічного переродження тканин і судин нирок при ураженні їх радіоактивними речовинами при їх виведенні з організму. Всі ці ефекти морфологічної природи виявляються, як правило, через багато місяців або кілька років після опромінення.

Віддаленим наслідком радіаційного ураження вважається один із найбільш спільних для усіх організмів ефект опромінення — скорочення тривалості життя і прискорення старіння, що реалізується, як правило, в останні періоди життя.

До найвіддаленіших наслідків опромінення як у тварин, так і в рослин відносять *генетичні ефекти*.

Віддалені наслідки променевого ураження мають вірогідний, або випадковий, характер. Це означає, що їх неможливо визначити наперед, на відміну від близьких наслідків. З усією впевненістю можна, наприклад, стверджувати, що коли 1000 рослин гороху опромінити дозою 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 більш як 15 Гр всі рослини загинуть. Коли овець опромінити дозою 2 Гр, у них виникне променева хвороба першого або другого ступеня (залежно від індивідуальної чутливості до радіації). Але завбачити віддалені наслідки опромінення у якомусь конкретному організмі неможливо. Їх можна передбачити на основі статистичного аналізу в опроміненій популяції (групі) організмів і виразити чисельність уражених осіб у процентах або визначити кількість уражених осіб на тисячу, мільйон. Ймовірність прояву віддалених наслідків радіаційного ураження зростає із збільшенням дози опромінення.

При різних дозах виявляються неоднакові радіобіологічні ефекти. Радіаційна стимуляція — перший соматичний ефект, що спостерігається за мінімальних доз опромінення. Морфологічні зміни і променеву хворобу виявляють при дозах, у десятки разів більших. При ще більших дозах настає загибель.

Але не тільки від дози випромінювань залежить прояв радіобіологічних ефектів. Наприклад, дози, що стимулюють ріст і розвиток рослин родини хрестоцвітих (редису, капусти, ріпака, редьки), згубні для рослин родини бобових (бобів, гороху, квасолі). Дози, які не завдають шкоди комахам, смертельні для всіх тварин класу ссавців. Всі ефекти визначаються чутливістю організмів до іонізуючої радіації, або їх радіочутливістю.