

УДК 632.118.3(582.4+582.5)

## ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ПОГЛИНЕНИХ ДОЗ ТА ВІДДАЛЕНІ РАДІОБІОЛОГІЧНІ ЕФЕКТИ У СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ РОСЛИН НА ЗАБРУДНЕНИХ РАДІОНУКЛІДАМИ ТЕРИТОРІЯХ

І.М. Гудков,  
Д.М. Гродзинський

Україна, Національний аграрний університет; Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН

*Коротко розглянуто основні віддалені радіобіологічні ефекти у рослин на забруднених радіонуклідами територіях: зниження імунітету, генетичні наслідки, популяційні зміни. Обговорюється можливість адаптації рослин до умов підвищеного радіаційного впливу.*

За нашого часу і в наступні роки надзвичайно великого значення набуває вивчення впливу рівнів доз, що формуються на забруднених радіонуклідами територіях, на окремі радіобіологічні ефекти, зокрема віддалені, такі як деякі морфологічні зміни, стан імунітету, стійкість до несприятливих умов середовища, генетичні наслідки, зміни в популяціях. Це стосується сфери радіобіології, яка займається ефектами малих доз. Дослідники різних шкіл не можуть дійти однієї спільної думки щодо кількісного виразу поняття малих доз у загальноприйнятих одиницях. Але, виходячи з пануючої концепції безпорогової дії іонізуючої радіації на живі організми, якої дотримується більшість радіобіологів, практично всі визнають, що ігнорувати їх не можна. Однак достатньо досконалої методології вивчення біологічної дії таких доз немає, пряма екстраполяція результатів з області більш високих доз часто-густо вважається неприпустимою. Це надзвичайно утруднює вивчення наслідків хронічної дії опромінення за малих потужностей доз на живі організми у зоні радіаційного впливу аварії, особливо у віддалені періоди.

Що стосується рослин, то навіть серед певної частини радіобіологів утворилася упереджена думка про нібито дуже високу їх радіостійкість, і цьому елементу біоценозу відводиться важлива роль лише як первинної ланки на транспортному шляху радіонуклідів трофічними ланцюжками до людини. Можливе безпосереднє ураження рослин нерідко не береться до уваги або навіть ігнорується. З одного боку вважається, що рослини можуть пристосуватись (адаптуватись) до підвищених рівнів опромінення, а з іншого, якщо і визнається певне їх ураження, то чомусь допускається, що це не нанесе навколишньому середовищу такої шкоди, як у випадку ураження інших організмів, зокрема тварин.

Дійсно, переважна більшість видів рослин має значно вищу радіостійкість, ніж тварини, зокрема ссавці. Але й серед них є родини, наприклад, соснові, лілейні, бобові та інші, для деяких представників котрих півлетальні дози гострого опромінення рідкоіонізуючою радіацією складають лише 3-7 Гр, тобто не перевищують таку для переважної частини видів ссавців. Їх радіаційне ураження може призводити до суттєвих змін у фітоценозах і в біоценозах в цілому.

Абсолютно всі типи радіобіологічних ефектів, як соматичні – радіаційна стимуляція, морфологічні зміни, різні форми променевої хвороби, прискорення старіння, загибель, – так і генетичні, найбільш чітко виявлялись протягом першого п'ятиліття після аварії. Особливо помітна різноманітність морфологічних порушень у різних видів рослин, які проявлялись у зміні розмірів окремих органів, їх форми, порядку розташування на рослині, кольору, появи пухлин тощо, чому рослини, на відміну від тварин, “завдячують” наявності великої кількості твірних тканин – меристем. І дотепер дослідники описують ці реакції рослин на підвищений радіаційний тиск. При цьому на забруднених радіонуклідами територіях спостерігається, здавалося б, парадоксальне явище, коли радіобіологічні ефекти, що реєструються, відповідають дозам загального зовнішнього опромінення на порядок вищим ніж ті, що

вдається розрахувати чи оцінити за допомогою дозиметрів-накопичувачів дози за цих умов. Нами, зокрема, у польових дослідках з кінськими бобами, проведеними у 30-кілометровій зоні відчуження ЧАЕС (30-км зона), за доз 0,15-2,5 Гр протягом вегетаційного періоду, що були зареєстровані за допомогою термомюнесцентних дозиметрів, відмічався такий ступінь порушень цитогенетичного та морфологічного характеру, який відповідає дозам 2-20 Гр гамма-опромінення.

Безперечно, оцінювати поглинену дозу через 10-15 років після викиду радіоактивності загалом стосовно всієї рослини немає рації. Сьогодні ця доза в усіх організмах – рослинах, тваринах, людині - на 60-95 % формується за рахунок внутрішнього опромінення інкорпорованих радіонуклідів. Головною ж особливістю їх дії на живі організми є здатність, як і більшості хімічних елементів, нерівномірно, навіть вибірково, залежно від здатності включатися у метаболізм, розподілятися по тканинах і органах, утворюючи в певних місцях дуже високі дози локального опромінення. І ми на основі аналізу радіоавтографів розподілу по рослині радіоактивних речовин різної природи, в тому числі радіостронцію і радіоцезію, а також їх хімічних аналогів – радіоактивних ізотопів кальцію, калію, рубідію, неодноразово підкреслювали, що невідповідність показної дози тому ефектові, що спостерігається, є результатом концентрації певних радіонуклідів саме у меристемах, загалом у зонах росту, у генеративних органах, що формуються, де відбувається найактивніша діяльність клітин, яка вимагає для свого забезпечення великої кількості різноманітних речовин.

Це безпосередньо довів О.М.Михеев, який, вирощуючи кукурудзу та горох на забрудненому радіонуклідами чорнобильського походження ґрунті, показав, що радіостронцій в основному накопичується в зоні розтягнення кореня, а радіоцезій переважно концентрується у меристемі – 3-міліметровому його кінчику. В останньому випадку концентрація радіонукліду у цій частині кореня більш як на порядок перевищувала його кількість у решті, на підставі чого можна зробити логічний висновок про те, що поглинена меристемою за рахунок радіоцезію доза як мінімум у 10 разів вища, ніж іншими тканинами.

Ці незаперечні факти змушують дуже уважно і обережно ставитись до даних з дозиметрії, що наводяться окремими дослідниками в роботах, виконаних на забруднених радіонуклідами територіях, і взагалі до оцінки дозових навантажень на живі об'єкти, дозові залежності різних радіобіологічних ефектів, які можуть набувати несподіваного характеру і досить своєрідно трактуватись.

Є.Я.Зяблицька та ін., вивчаючи кількісний вихід клітин з абераціями хромосом у проростків озимого жита з насіння рослин, що росли у 30-км зоні на ділянках з різними рівнями сумарної щільності радіонуклідного забруднення верхнього шару ґрунту, одержали складну нелінійну дозову залежність ефекту, яка свідчить нібито про існування двох діапазонів доз, в межах яких кількість клітин з порушеннями не змінюється (при гострому опроміненні така залежність має, як правило, лінійний характер). Допускаючи можливість суттєвої похибки при оцінці поглинених рослинами доз, автори проте роблять сміливий висновок про особливості хронічної дії радіації та реалізації реакції клітин на малі дози, протягом формування котрих нібито відбувається зміна моделі генної експресії та активація індуцибельних систем репарації.

Взагалі, збільшення кількості клітин з абераціями хромосом в меристемних тканинах – це найчастіше використовуваний критерій оцінки радіаційного ураження рослин на забруднених радіонуклідами територіях, який успішно застосовується з перших післяаварійних до останніх років. При цьому цитогенетичному аналізу піддаються, як правило, 2-4-добові проростки, одержані в лабораторних умовах з насіння від рослин, сформованих за підвищеного радіаційного фону та радіонуклідного забруднення ґрунтів. Здавня облюбований радіобіологами тест у цих умовах виявився надзвичайно зручним та інформативним. За його допомогою В.А.Шевченко та ін., починаючи з 1986 р., вивчають у рослин один з основних віддалених ефектів іонізуючої радіації – перебіг мутаційного процесу. Одержані ними результати однозначно свідчать про те, що із збільшенням радіонуклідного забруднення території генетичний вантаж у найрізноманітніших видів рослин протягом перших 2-3 років зростає. У подальшому в наступних поколіннях частота мутацій зменшувалась, однак швидкість зниження ступеня прояву генетичних ефектів у потомстві значно відставала і продовжує відставати від темпів зниження потужності дози радіації, яка за 10 років знизилась на три порядки.

Ми з О.Д.Коломієць та Л.А.Бурденюк протягом всіх 15 генерацій досліджуємо кінетику мутаційної мінливості чотирьох генотипів озимої пшениці, що зазнали дії опромінення в межах 10-км зони. У першу вегетацію кількість рослин з морфологічними аномаліями склала 60-80 %, у другу – при самосіві досягла 60 %. Чітко відокремились сім'ї з різкими відхиленнями ознак від вихідних форм, основною з яких була стерильність колосу. У рослин, що вирощувались з цього покоління на чистому ґрунті, стерильність була у 2-3 рази меншою, але виникнення морфологічних аномалій тривало з високою частотою. Спостерігались зміни лінійних розмірів та форми рослин, окремих їх органів, кількості органів, забарвлення, ступеня куцистості тощо. Вельми важливим було встановлення тенденції до збереження рівня мутагенезу, індукованого перебуванням двох поколінь рослин в умовах хронічного опромінення. Інтенсивність його хвилеподібно змінювалась в часі, але протягом наступних років і дотепер суттєвого спаду цього процесу не спостерігалось. На 1999 рік було виділено 1345 мутантних ліній пшениці різних рівнів стабільності щодо інтенсивності розщеплення у наступних поколіннях.

Отже, генетичний вплив на рослини забрудненого радіонуклідами середовища виявився як такий, що має тривалу реалізацію у багатьох наступних поколіннях.

Досвід робіт на забруднених територіях свідчить про зниження фітоімунного потенціалу сільськогосподарських рослин, що вирощуються за цих умов, а також про зростання агресивності деяких збудників хвороб. Про це свідчать дослідження структури популяції збудника стеблової іржі злаків *Rhizinia graminis*, проведені О.П.Дмитрієвим та ін. на 11 видах культурних та дикоростучих видах рослин. Ступінь розвитку цієї хвороби у 30-км зоні дуже високий. Було виділено 22 моноізольати збудника, з котрих всі виявилися вірулентними. Причому тільки одна раса належить до широко розповсюджених, решта – рідкі, з них одна є дуже вірулентною. Ними ж було встановлено, що ураженість озимої пшениці в цих умовах борошнистою россою в 2-2,5 рази вища, ніж у контрольних рослин поза зоною. Із зростанням радіонуклідного забруднення ґрунту збільшувалась також ураженість рослин бурою іржею. Характерно, що зниження стійкості рослин до фітопатогенних грибів зберігалось при вирощуванні з насіння, сформованого в умовах забруднених ґрунтів. У озимої пшениці стійкість до борошнистої роси була в 2 рази нижчою, ніж у рослин, що росли на чистому ґрунті. Зберігалася підвищена чутливість і до бурої іржі.

Таким чином, є цілком очевидні дані про ураження систем імунітету рослин на забруднених радіонуклідами ґрунтах. Є також підстави припускати можливість прискорення появи в цих умовах нових форм фітопатогенів, рас з підвищеною вірулентністю, що мають високу швидкість міграції по популяції.

На цьому фоні дуже сумнівними стають ствердження деяких авторів про можливість підвищення життєздатності рослин, що сформувалися в умовах радіонуклідного забруднення, зокрема збільшення стійкості до додаткового опромінення іонізуючою радіацією у штучних умовах. Як правило, мова у цих роботах іде про адаптацію або її окремий випадок – радіоадаптацію. Відразу слід відзначити, що кількість таких робіт, порівняно з тими, що навпаки, демонструють підвищення радіочутливості рослин чи чутливості до інших уражуючих чинників, не дуже вже й велика, але вони привертають увагу і активно обговорюються, оскільки порушують досить актуальну проблему, біля якої знаходять підґрунтя всілякі спекуляції з соціально-економічним відтінком.

В.М. Позолотіна на підставі власних експериментів та ретельного аналізу таких робіт пояснює протилежність висновків різних авторів підвищенням генетичної та морфологічної нестабільності рослин внаслідок тривалої дії невеликих доз радіації. Результатом такої нестабільності, як стверджують О.М. Попова та ін., є зміна генетичного статусу певної радіочутливої частини ценопопуляції внаслідок її радіаційного ураження та елімінації. С.А. Дмитрієва та ін. показали, що в умовах підвищеного радіаційного тиску може відбуватись розчленування популяції рослин на радіостійку та радіочутливу фракції. Остання при додатковому опроміненні може еліминувати, але може і зберігатися, оскільки є джерелом підвищеної частоти мутацій.

Отже, збільшення радіостійкості рослин не є результатом їх адаптації до підвищених рівнів опромінення, а є наслідком добору. І говорити про можливість формування у рослин, та й взагалі у живих організмів, протягом онтогенезу в умовах підвищеного радіаційного впливу особливих механізмів радіоадаптації немає підстав. Проте теоретично не можна виключити

можливість накопичення рослинами в умовах опромінення деяких продуктів обміну, які можуть формувати певний, за відомою гіпотезою О.М.Гончаренко, "ендогенний фон радіорезистентності".

Зрештою, надзвичайно важливою є проблема збереження на забруднених радіонуклідами територіях природної автохтонної рослинності. За 15 років, що пройшли після аварії, у 30-км зоні та на інших забруднених радіонуклідами територіях видовий склад як фітоценозів, так і агроценозів суттєво змінився. Однак ці зміни в основному зумовлені змінами у характері господарювання – обмеженням сільськогосподарської діяльності аж до повного її припинення і зниженням у багато разів антропогенного впливу, перепрофілюванням господарств, скороченням площ або виключенням із сівозмін рослин, котрі накопичують велику кількість радіонуклідів (наприклад, люпину). В цих умовах навіть на дуже сильно забруднених ділянках важко встановити вплив на суцесійні процеси саме радіаційного фактора.

Але є всі підстави вважати, що у цій ситуації для фітоценозів хронічне опромінення є більш небезпечним, ніж гостре. Після гострого опромінення у наступні роки фітоценози можуть відновлюватись за рахунок репопуляційних, регенераційних, компенсаторних явищ. Хронічне ж опромінення, діючи на рослини протягом поколінь, може призводити до підсумовування певних поступових порушень у розвитку того чи іншого виду і зрештою їх випадання. Саме такі ситуації в зоні впливу аварії спостерігали О.М.Попова та ін. щодо подорожника ланцетистого, В.І.Шершунова і В.Г.Зайнуллін щодо грястиці звичайної, П.Г.Сидоренко та ін. щодо конюшини повзучої, іван-чаю, куколиці білої.

В.А.Шевченко та ін. найважливіше значення у зміні ценозів у зонах підвищеного радіаційного впливу надають генетичним ефектам. Вони вважають, що в міру зростання потужності дози зміни у ценозах, в тому числі і у фітоценозах, поступово розширюючись, захоплюють такі ефекти, як біохімічні зміни, аберації хромосом, видимі мутації, збіднення угруповання і, зрештою, як найсильніший ефект – деградація ценозу. Випадіння радіочутливих видів рослин і тварин спостерігається з потужності дози  $10^{-2}$  Гр/добу.

Переваги такого підходу до оцінки змін у ценозах очевидні, бо реєстрація генетичних змін дозволяє оперувати тестами, наприклад, визначенням частоти клітин з абераціями хромосом, котрі набагато чутливіші за критерії соматичних ефектів.

Підсумовуючи викладене, можна дійти висновку, що зараз, час через 15 років після аварії на Чорнобильській АЕС, навіть на територіях з високими рівнями радіонуклідного забруднення не виявлено істотної загрози існуванню рослинності. Проте відзначено явні прояви віддалених радіобіологічних ефектів, які свідчать про певні радіаційні ураження рослин. Серед цих ефектів особливого значення набувають генетичні, які є причиною індукції нестабільності геному будь-якого виду з усіма впливаючими з цього наслідками: розшаруваннями популяцій, всілякими мутаціями, випадіннями окремих видів та іншими, які передбачити важко. Безсумнівно, що кумулятивні радіобіологічні явища на забруднених радіонуклідами територіях тривають і віддалені наслідки опромінення до кінця ще не реалізувались.