

ГЕНОТОКСИЧНИЙ ВПЛИВ РАДІОНУКЛІДНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ НА МЕРИСТЕМИ РОСЛИН

Д. М. Гродзінський, О. М. Міхєєв, О. А. Кравець, М. І. Гуща, Ю. В. Шиліна,
В. В. Бережна, Н. В. Тордія, Г. Д. Слиявчук, Л. Б. Зелена

Інститут клітинної біології і генетичної інженерії НАН України, Київ

Встановлено вертикальну гетерогенність розподілу ^{137}Cs та ^{90}Sr в головному корені проростків з переважним концентруванням радіоцезію в меристематичній зоні, а радіостронцію в зоні розтягування. Отримані дані дали змогу розрахувати дозові навантаження на критичні тканини рослин в умовах радіонуклідного забруднення. Встановлено негативний вплив рівня забруднення ґрунту $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг за радіоцезієм на схожість насіння та швидкість росту проростків цибулі. При рівнях забруднення ґрунту $3,7 \cdot 10^2 - 3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг показано підвищення рівня мітотичного індексу меристематичних клітин головного кореня проростків цибулі. Рівень хромосомних аберацій у цих клітинах на дев'яту добу спостереження становив у середньому 241, 216 та 151 % від контрольного рівня для ґрунтів з питомою активністю $3,7 \cdot 10^4$, $18,7 \cdot 10^4$ та $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг відповідно. Швидкість росту кореня та мітотичний індекс у дослідних варіантах перевищували контрольні значення, що вказувало на наявність відновлювальних та радіоадаптаційних процесів. Не встановлено суттєвої різниці між кількісними характеристиками цитогенетичної дії радіоцезію та радіостронцію.

Ґрунт, як важливий елемент природних та штучних екосистем, є у багатьох випадках тою первинною ланкою чи резервуаром різноманітних хімічних та радіонуклідних забруднень, що безпосередньо або опосередковано потрапляють до організму людини, спричиняють мутагенні ефекти та здатні підвищувати частоти неопластичних трансформацій клітин різних органів і тканин. З іншого боку, підвищення техногенного рівня хімічного та радіонуклідного забруднення ґрунтів модифікує рівень спонтанних генетичних процесів у популяціях рослин і тварин, змінюючи їх ценотичний статус [1]. Для того, щоб це передбачити, потрібен постійний моніторинг генетичного та цитогенетичного стану природних популяцій рослин і тварин і, у першу чергу тих з них, що безпосередньо контактують із забрудненими ґрунтами. Слід також враховувати можливість процесу суттєвого концентрування рослинами забруднювачів, наслідком чого є надання біологічним структурам з підвищеним рівнем тропності, зокрема до радіонуклідів, своєрідних властивостей "гарячих" частинок з дуже високим рівнем питомої активності, який може зумовлювати відносно великі дозові навантаження на критичні структури рослин, зокрема на їх твірні тканини [2 - 5].

У зв'язку з вищенаведеним передбачалось проаналізувати частоти хромосомних аберацій у клітинах апікальної меристеми коренів рослин (цибулі, гороху), паралельно дослідивши розподіл радіонуклідів по структурах кореня, що дасть змогу оцінити дозові навантаження на критичні елементи апікальних меристем при вирощуванні рослин на штучно забруднених радіонуклідами ґрунтах при внесенні солей ^{137}Cs і ^{90}Sr у різних концентраціях.

Матеріали та методи

У дослідях використовували проростки гороху сорту Зеленозерний, що вирощували: 1) на водних розчинах хлористого ^{137}Cs з питомою активністю 296 і 1700 кБк/л та азотнокислого ^{90}Sr з питомою активністю 1700 кБк/л; 2) на забрудненому радіонуклідами дерново-підзолистому ґрунті, привезеному з 30-кілометрової зони ЧАЕС, питома активність якого за ^{137}Cs становила 15 кБк/кг. Скляний посуд попередньо протягом трьох діб обробляли розчином хлориду стабільного ізотопу цезію (0,1 М) з метою запобігання сорбції радіоактивного цезію під час вирощування рослин.

Для аналізу вертикального розподілу радіоцезію та радіостронцію в коренях водної та ґрунтової культури проростків гороху головний корінь 5-добових проростків гороху по всій довжині розрізали на відрізки довжиною 5 мм. Активність радіонуклідів в апексах корінців визначали за допомогою рідинного сцинтиляційного лічильника "RACKBETA 1211". Для визначення активності апекси корінців масою 0,12 – 0,17 мг поміщали у флакони з 5 мл ЖС-103 і вимірювали активність у кожному варіанті (по три зразки на варіант), припускаючи, що самопоглинанням бета-випромінювання у зразках можна знехтувати [6].

Потужність поглинутої дози від внутрішнього опромінення визначали за формулою

$$P = 1,6 \cdot 10^{-13} C f E,$$

де P - потужність поглинутої дози, Гр/с; C - питома активність зразка, Бк/кг; f - вихід даного виду випромінювання на розпад; E - енергія частинок (для бета-частинок середня), МеВ.

У досліджах використовували також проростки цибулі ріпчатої *Allium cepa L* ($2n = 16$) сорту Oporto. Насіння висаджували в ґрунт з різною питомою активністю за ^{137}Cs - $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг (10^{-5} Кі/кг), $18,7 \cdot 10^4$ Бк/кг ($5 \cdot 10^{-6}$ Кі/кг), $3,7 \cdot 10^4$ Бк/кг (10^{-6} Кі/кг), $3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг (10^{-7} Кі/кг) та $3,7 \cdot 10^2$ Бк/кг (10^{-8} Кі/кг) і вирощували в термостаті при 27°C . Визначали схожість насіння, довжину корінців, потужність поглинутої дози та сумарну поглинуту дозу, питому активність зразків та цитогенетичні показники стану кореневої меристеми проростків. Для цитологічного аналізу меристематичних клітин апексів було використано такі параметри: 1) мітотичний індекс (МІ); 2) кількість клітин з хромосомними абераціями (ХА) у мета-, ана- та телофазах мітозу; 3) кількість мікроядер (МЯ); 4) кількість дегенеруючих клітин та аглютинованих ядер (або некротичних ділянок); 5) навантаженість клітин цитогенетичними порушеннями. Для досліджень відбирали корінці 4-, 6-, 8-, 9- та 10-добових проростків. Об'єм вибірок мав 10 - 15 апексів у досліді та п'ять - вісім апексів у контролі. Аналізували тимчасові давлені препарати кореневих апексів. Фіксацію проводили з використанням суміші Карнуа на холоді. Апекси корінців фарбували ацетоорсеїном (2 %-ним розчином); мацерацію тканин проводили 5 М розчином HCl протягом 35 хв при температурі 25°C .

Результати та їх обговорення

Гетерогенність розподілу радіонуклідів у коренях рослин

Дослідження розподілу радіоцезію в головному корені водної та ґрунтової культури проростків гороху показало суттєву нерівномірність його розподілу вздовж кореня проростків. Найбільшу питому активність мав перший (апикальний) відрізок, в якому розташована меристематична зона кореня, що складається з найбільш радіочутливих клітин. З віддаленням від апексу кореня активність відрізків суттєво падає, причому це падіння мало коливальний характер (рис. 1).

Знаючи сумарну активність радіоцезію в головному корені, масу його окремих відрізків та сумарну активність ізотопу в кожному з них, можна розрахувати, яку частку загальної активності містить у собі апікальна частина кореня, тобто його меристематична зона, а також розрахувати коефіцієнт нагромадження радіонукліда окремими відрізками. Виявилось, що апекс загальною довжиною 5 мм і масою приблизно 3 % від загальної маси кореня на п'яту – шосту добу вирощування проростків містить до 30 % сумарної активності сорбованого радіоцезію. При середньому коефіцієнті нагромадження для всього кореня порядку 800 – 1000 коефіцієнт нагромадження в апексі досягає десятків тисяч (до 27000), тобто концентрація радіоцезію в апікальній частині і, особливо, у меристематичній зоні (коефіцієнт нагромадження близько 39000) є на порядок вищим від середньої концентрації радіонукліда в корені. Останнє означає, що приблизно так співвідносяться й дозові навантаження від інкорпорованих радіонуклідів на відповідні зони кореня, тобто приблизно 1 : 30 : 40.

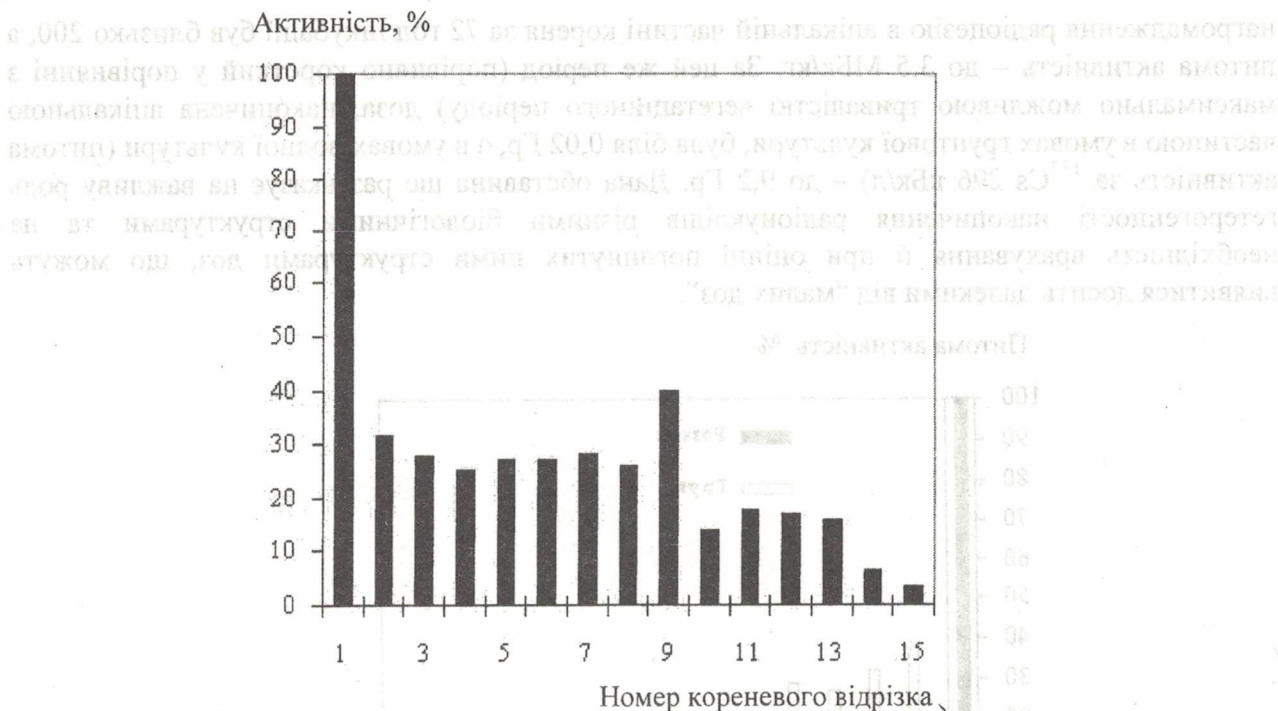


Рис. 1. Активність ¹³⁷Cs у 5-міліметрових сегментах головних коренів проростків гороху відносно активності апікального відрізка.

В аналогічних дослідах з використанням ⁹⁰Sr було показано, що радіостронцій переважно концентрується в зоні розтягування та зоні початку диференціації клітин (рис. 2). Ця обставина (беручи до уваги досить малий пробіг бета-частинок у біологічних тканинах) у кінцевому рахунку зумовлює суттєво менші дозові навантаження на меристематичну зону апікальної частини кореня, тобто від радіостронцію треба чекати меншої цитогенетичної пошкоджуючої дії, ніж від відповідних (рівних) питомих активностей водного середовища за ¹³⁷Cs.

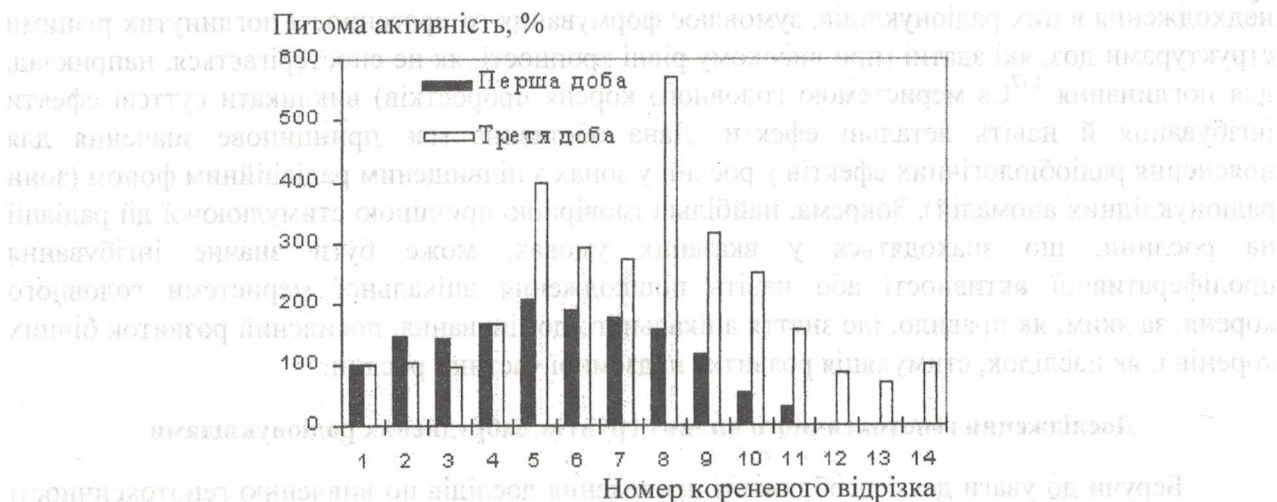


Рис. 2. Питома активність ⁹⁰Sr у відрізках головного кореня проростків гороху відносно питомої активності апікального відрізка.

Результати дослідів з вирощуванням проростків гороху в ґрунті, забрудненому радіонуклідами, питома активність якого за ¹³⁷Cs становила 15 кБк/кг, вказують на якісно подібний характер розподілу цього ізотопу вздовж головного кореня як в умовах водної культури, так і в умовах ґрунтової культури (рис. 3), тобто як у першому, так і у другому випадках максимальна активність зосереджена в апікальному сегменті. Коефіцієнт

нагромадження радіоцезію в апікальній частині кореня за 72 год інкубації був близько 200, а питома активність – до 3,5 МБк/кг. За цей же період (порівняно короткий у порівнянні з максимально можливою тривалістю вегетаційного періоду) доза, накопичена апікальною частиною в умовах ґрунтової культури, була біля 0,02 Гр, а в умовах водної культури (питома активність за ^{137}Cs 296 кБк/л) – до 9,2 Гр. Дана обставина ще раз вказує на важливу роль гетерогенності накопичення радіонуклідів різними біологічними структурами та на необхідність врахування її при оцінці поглинутих цими структурами доз, що можуть виявитися досить далекими від “малих доз”.

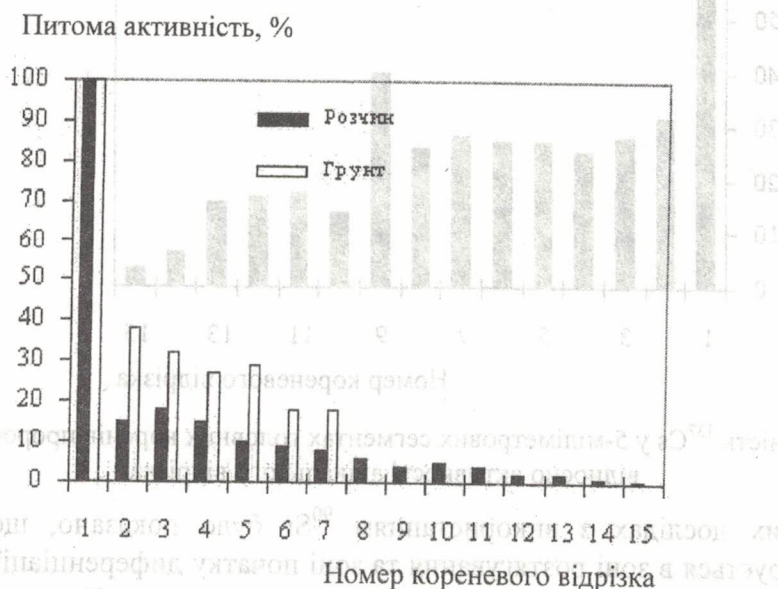


Рис. 3. Питома активність ^{137}Cs в корневих відрізках проростків гороху, що вирощені на водному розчині хлористого ^{137}Cs (296 кБк/л) та в ґрунті, забрудненому сумішшю радіонуклідів чорнобильського походження, на шосту добу вирощування відносно питомої активності апікального відрізка.

Таким чином, гетеротропність біологічних структур, що виявляється при вивченні надходження в них радіонуклідів, зумовлює формування гетерогенності поглинутих різними структурами доз, які здатні (при високому рівні тропності, як це спостерігається, наприклад, для поглинання ^{137}Cs меристемою головного кореня проростків) викликати суттєві ефекти інгібування й навіть летальні ефекти. Дана обставина має принципове значення для пояснення радіобіологічних ефектів у рослин у зонах з підвищеним радіаційним фоном (зони радіонуклідних аномалій). Зокрема, найбільш імовірною причиною стимулюючої дії радіації на рослини, що знаходяться у вказаних умовах, може бути значне інгібування проліферативної активності або навіть пошкодження апікальної меристеми головного кореня, за яким, як правило, іде зняття апікального домінування, посилений розвиток бічних коренів і, як наслідок, стимуляція розвитку надземної частини рослин.

Дослідження генотоксичного впливу ґрунтів, забруднених радіонуклідами

Беручи до уваги деякі особливості проведення дослідів по вивченню генотоксичності забруднюючих ґрунт радіонуклідів, зокрема вимоги радіаційної безпеки, вивчення проводили в декілька етапів, на кожному з яких послідовно зменшували питому активність штучно забруднених ґрунтів.

У першій серії дослідів з проростками цибулі, вирощеними на штучно забрудненому ^{137}Cs ґрунті, було визначено активність зразків апексів коренів, що становила в середньому для варіанта з активністю ґрунту $3,7 \cdot 10^4$ Бк/кг 222 Бк, для варіанта з активністю $18,7 \cdot 10^4$ Бк/кг - 264 Бк і для варіанта з найвищою активністю ґрунту $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг - 459 Бк при середній масі зразків апікальної частини корінців 0,13 мг. Коефіцієнт накопичення ^{137}Cs

апикальною частиною первинного кореня обернено пропорційно залежав від вихідного рівня забруднення ґрунту, тобто був найбільшим у випадку найменшого рівня забруднення ґрунту (22,7) і найменшим при максимальному рівні (3,5) (рис. 4).

Коефіцієнт нагромадження

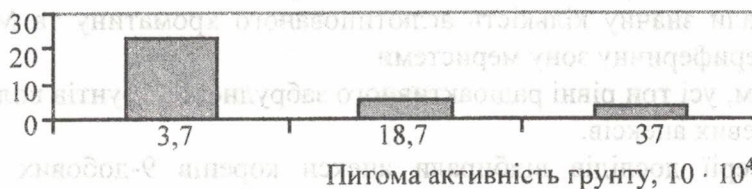


Рис. 4. Залежність коефіцієнта нагромадження ^{137}Cs в меристемі головного кореня проростків цибулі від питомої активності ґрунту, забрудненому ^{137}Cs .

При цьому відзначали різницю між варіантами з різною активністю за схожістю насіння та довжиною корінців проростків. Зокрема, у варіанті з найбільшою активністю $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг схожість насіння була низькою і становила на шосту добу приблизно 10 % від схожості контролю. У варіантах з меншою активністю схожість була набагато вищою (80 - 90 %). Подібну різницю між варіантами спостерігали й у відношенні довжини корінців.

Середня питома активність апікальної частини корінця при активності ґрунту $3,7 \cdot 10^4$ Бк/кг (10^6 Кі/кг) становила на шосту добу $4,94 \cdot 10^5$ Бк/кг, а поглинута доза - приблизно 0,7 Гр на шосту добу та приблизно 1,0 Гр на десяту добу вирощування. Враховуючи нерівномірність розподілу ^{137}Cs по довжині коренів з переважним його концентруванням у меристематичній зоні, яка є найбільш радіочутливою, можна відзначити суттєве дозове навантаження на критичні тканини коренів проростків й очікувати значну цитогенетичну дію внутрішнього опромінення.

Аналіз апексів шестидобових проростків показав (рис. 5), що в контролі кількість клітин з ХА становила біля 1 %, кількість МЯ - до 1 %. Дегенеруючих клітин та некротичних ділянок практично не спостерігали. Навантаженість клітин порушеннями складала не більш, ніж одне на клітину. У варіанті з найменшою активністю ґрунту ($3,7 \cdot 10^4$ Бк/кг) виявлене порушення мітозів досягало близько 7 %, кількість МЯ складала в середньому 4 % (від загальної кількості мітозів). У другому варіанті (активність ґрунту $18,7 \cdot 10^4$ Бк/кг) виявлені порушення мітозів не перевищували 8 %, а кількість МЯ - 3 %. У варіанті з найвищою активністю ґрунту ($3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг) спостерігали значні порушення мітозів - біля 24 %, МЯ - до 3%, поліплоїдних клітин - до 8 %. Крім того, відзначався деякий цитостатичний ефект (загримка мітозів).

Частота ХА, % від загальної кількості клітин у мітозі

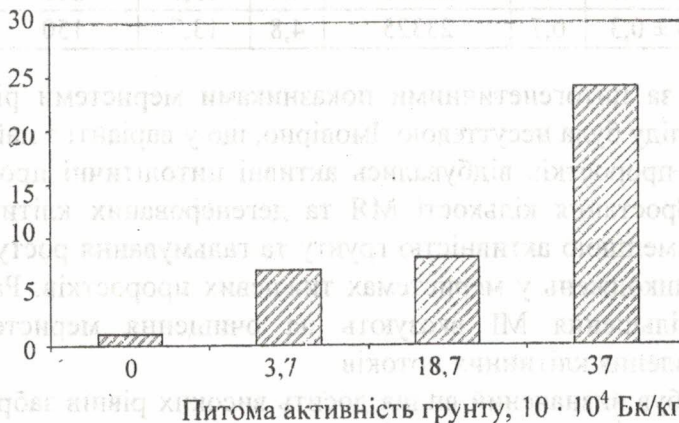


Рис. 5. Залежність рівня ХА у меристематичних клітинах головного кореня цибулі від рівня питомої активності ^{137}Cs у ґрунті, на якому вирощували проростки.

Аналіз апексів 10-добових проростків показав, що в контролі не відзначали порушень, при цьому кількість мітозів була незначною. При рівні забруднення $3,7 \cdot 10^4$ Бк/кг при МІ близько 2 % кількість дегенерованих клітин, аглютинованих ядер та МЯ становила в середньому 3 %. У варіанті з активністю ґрунту $18,7 \cdot 10^4$ Бк/кг було виявлено близько 24 % клітин з ХА, а у варіанті з найбільшою активністю ґрунту $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг - 15 %. В останньому випадку спостерігали значну кількість аглютинованого хроматину та МЯ, частина з яких була витіснена в периферичну зону меристеми.

Таким чином, усі три рівні радіоактивного забруднення ґрунтів впливали на цитогенетичний стан кореневих апексів.

У другій серії дослідів відбирали апекси коренів 9-добових проростків цибулі (табл. 1). Використовували той же ґрунт, що і в першому досліді, оскільки зміна вмісту нуклідів у ґрунті, обумовлена виносом з рослинною масою, була несуттєвою. Питома активність ґрунту становила $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг, $18,7 \cdot 10^4$ Бк/кг та $3,7 \cdot 10^4$ Бк/кг. У варіанті з найменшою активністю ґрунту ($3,7 \cdot 10^4$ Бк/кг) (див. табл. 1) МІ коливався від 3,6 до 6,1 %, складаючи в середньому 4,4 %, кількість клітин з ХА була від 12 до 30 %. У варіанті з активністю ґрунту $18,7 \cdot 10^4$ Бк/кг значення мітотичного індексу не відрізнялось від попереднього варіанта, але варіювання його було значнішим (1,6 – 10 %). Кількість порушень у мітозах дещо знизилась (до 19,7 %, коливаючись від 15 до 28 %) і дещо збільшилась кількість дегенерованих клітин (до 1 %). Отже, у варіантах дослідів з активністю ґрунту $3,7 \cdot 10^4$ та $18,7 \cdot 10^4$ Бк/кг кількість ХА та МЯ у меристемах 9-добових проростків значно зростала порівняно з контролем. Разом з тим ростова активність кореня та МІ меристеми перевищували контроль, що вказує на радіостимуляційні (радіогормезисні) процеси. У варіанті з найвищою активністю ($3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг) спостерігалось помітне зменшення числа ХА – до 13,7 % (від 6 до 20 %), МІ збільшився до 4,8 %, кількість МЯ та дегенерованих клітин зросла до 1,6 та 1,8 % відповідно.

Таблиця 1. Залежність стану кореневої меристеми проростків цибулі від рівня радіонуклідного забруднення ґрунту

Рівень забруднення, Бк/кг	Схожість насіння, %	Довжина кореня, см (% до контролю)		Кількість досліджених клітин	МІ, %	Клітини з ХА, %		Клітини з МЯ, %	Дегенеруючі клітини, %
		М	σ^2			У пулі	До контролю %		
Контроль	100	2,2 ± 0,2	1,5	15005	4,1	9,1	100	0,7	0,2
$3,7 \cdot 10^4$	82,9	2,3 ± 0,2	1,6	33275	4,4	21,9	240	1,2	0,5
$18,7 \cdot 10^4$	91,4	2,4 ± 0,7	1,7	29290	4,4	19,7	216	0,9	1,0
$3,7 \cdot 10^5$	81,4	1,5 ± 0,3	0,7	23325	4,8	13,7	150	1,6	1,8

Таким чином, за цитогенетичними показниками меристеми різниця між першими двома варіантами дослідів була несуттєвою. Імовірно, що у варіанті з найбільшою активністю ґрунту в меристемах проростків відбувались активні цитолітичні процеси в результаті дії клітинного добору. Зростання кількості МЯ та дегенерованих клітин порівняно з попередніми варіантами з меншою активністю ґрунту та гальмування росту кореня свідчать про наявність значних пошкоджень у меристемах тижневих проростків. Разом з тим зниження кількості ХА та збільшення МІ вказують на очищення меристеми від генетичних пошкоджень та відновлення клітинних потоків.

Після того, як був визначений вплив досить високих рівнів забруднення ґрунту ^{137}Cs ($3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг, $18,7 \cdot 10^4$ Бк/кг, $3,7 \cdot 10^4$ Бк/кг), що відповідали рівню поверхневого

забруднення в діапазоні приблизно 200 – 2000 Кі/км², тобто моделювали умови радіонуклідного забруднення ґрунтів у зоні відчуження ЧАЕС (площі з такою величиною забруднення знаходяться лише в межах 30-кілометрової зони ЧАЕС), було вирішено вибрати суттєво менші рівні забруднення ґрунту, що відповідають, зокрема, забрудненню деяких районів Київської області, а саме: були використані питомі активності ґрунту за ¹³⁷Cs - $3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг (10^{-7} Кі/кг) та $3,7 \cdot 10^2$ Бк/кг (10^{-8} Кі/кг). Для гороху було використано ґрунт з питомою активністю за ¹³⁷Cs 10^{-5} Кі/кг ($3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг), що пояснюється необхідністю перевірки накопичувальної здатності кореневих апексів проростків гороху в умовах конкретного досліду.

Результати дослідів показали, що горох виявляв більшу накопичувальну здатність порівняно з цибулею (табл. 2). Дозові навантаження виявилися вагомими лише для кореневої меристеми гороху, що відобразилось на рівні ХА її клітин. Цитологічні дослідження показали, що активність ґрунту $3,7 \cdot 10^2$ Бк/кг в досліді з цибулею й $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг у досліді з горохом виявили стимулюючу дію щодо проліферативної активності меристематичних клітин (у досліді з горохом МІ становив близько 131,7 % по відношенню до контролю та приблизно 138 % у досліді з цибулею).

Таблиця 2. Залежність радіометричних показників кореневої меристеми проростків цибулі від рівня радіонуклідного забруднення ґрунту

Рівень забруднення, Бк/кг	Активність апексу, Бк	Питома активність апексу, Бк/кг	Коефіцієнт нагромадження радіоцезію	Потужність дози в апексі, Гр/год	Поглинута доза за п'ять днів, Гр
Горох, $3,7 \cdot 10^5$	0,34	$2,8 \cdot 10^6$	7,5	$3,02 \cdot 10^{-2}$	3,6
Цибуля, $3,7 \cdot 10^2$	0,0004	$3,3 \cdot 10^3$	8,9	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
Цибуля, $3,7 \cdot 10^3$	0,006	$5,0 \cdot 10^4$	13,5	$5,0 \cdot 10^{-4}$	0,06

З метою оцінки генотоксичного впливу ґрунту на меристему, клітинний склад якої змінюється в процесі росту, відбір зразків проводили в динаміці, а саме: на четверту, шосту і восьму добу після посіву насіння в ґрунт. У варіантах з радіостронцієм відбирали зразки меристематичної зони та зони розтягування кореня. Це було зроблено з метою врахування більш вираженої накопичувальної здатності цієї зони по відношенню до ⁹⁰Sr, що було показано в наших попередніх дослідженнях.

Було проаналізовано дані щодо ростової активності головного кореня проростків цибулі залежно від рівня активності ґрунту. Питома активність ґрунту за ¹³⁷Cs становила $3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг (10^{-7} Кі/кг) та $3,7 \cdot 10^2$ Бк/кг (10^{-8} Кі/кг); за ⁹⁰Sr - $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг (10^{-5} Кі/кг) та $3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг (10^{-7} Кі/кг). Було показано, зокрема, що радіоцезій стимулює ріст кореня на четверту - шосту добу при активності ґрунту $3,7 \cdot 10^2$ Бк/кг і на сьому - восьму добу при активності ґрунту $3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг. При забрудненні ґрунту ⁹⁰Sr стимуляція росту кореня спостерігалася на першу та сьому - восьму добу проростання.

У варіанті із забрудненням ґрунту за ¹³⁷Cs $3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг кількість клітин із ХА в апексах послідовно знижувалась від 16,5 % на четверту добу пророщування до 8,4 % на восьму добу (табл. 3). У той же час у контролі динаміка була майже зворотною, а саме: відбувалось накопичення клітин з ХА з 6,8 до 11%, що вказує на стимулюючий ефект активності $3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг за радіоцезієм. Індекс МЯ послідовно зменшувався як у контролі, так і в досліді. Велика кількість дегенерованих клітин у дослідному варіанті на шосту - восьму добу періоду пророщування свідчила про наявність активних цитолітичних механізмів відновлення цитогенетичного стану кореневої меристеми. У варіанті із забрудненням ґрунту за радіоцезієм $3,7 \cdot 10^2$ Бк/кг (табл. 4) кількість ХА була значно

меншою і знижувалась протягом досліду в 10 разів. Морфологічна картина цитологічних пошкоджень в обох варіантах відрізнялась в основному за кількісними показниками ХА та інтенсивністю дії клітинного добору, що були більшими у першому варіанті досліду.

Таким чином, у дослідах з радіоцезієм рівень цитогенетичних пошкоджень у меристемах 4 - 8-добових проростків послідовно знижувався. Ростава активність кореня та МІ меристеми в досліді перевищували контроль, що вказувало на наявність відновлювальних та радіоадаптаційних процесів. Питома активність ґрунту за ^{137}Cs $3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг мала деякий стимулюючий ефект у відношенні відновлювальних процесів в апексах проростків.

Таблиця 3. Динаміка цитогенетичного стану кореневої меристеми проростків цибулі при рівні забруднення ґрунту за ^{137}Cs $3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг

Доба після посадки	Довжина кореня, см		Кількість досліджених клітин		МІ, %		Клітини з ХА, %		Клітини з МЯ, %	
	Контроль	Дослід	Контроль	Дослід	Контроль	Дослід	Контроль	Дослід	Контроль	Дослід
четверта	1,1	1,1	4541	11275	6,7	6,0	6,8	16,5	1,8	2,3
шоста	2,0	1,9	3954	10088	5,0	5,8	13,1	11,2	1,2	1,2
восьма	2,6	3,4	5740	11614	3,7	3,4	11,0	8,4	0,4	0,7

Таблиця 4. Динаміка цитогенетичного стану кореневої меристеми проростків цибулі при рівні забруднення ґрунту за ^{137}Cs $3,7 \cdot 10^2$ Бк/кг

Доба після посадки	Довжина кореня, см		Кількість досліджених клітин		МІ, %		Клітини з ХА, %		Клітини з МЯ, %	
	Контроль	Дослід	Контроль	Дослід	Контроль	Дослід	Контроль	Дослід	Контроль	Дослід
четверта	1,1	1,1	5496	6359	5,2	6,5	0,7	8,7	0,5	1,9
шоста	2,0	2,5	2674	4903	5,4	7,2	-	3,9	1,1	0,5
восьма	2,6	2,4	2873	5312	2,6	4,3	-	0,8	-	0,1

Що стосується цитогенетичної дії застосованих активностей ^{90}Sr (табл. 5 і 6), то, по-перше, на ростовій активності коренів ці активності суттєво не позначились; по-друге, відносно до цитогенетичної дії виявлено досить суперечливий факт, а саме: відсутність дозової залежності цього показника; по-третє, чітку залежність у розподілі активності ^{90}Sr від кореневої зони виявлено лише для великої питомої активності ґрунту. Значної різниці в рівні ХА між відповідними варіантами досліду з ^{90}Sr і ^{137}Cs ($3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг) не виявлено, що можна пояснити або дуже близьким до фонового рівня внутрішнім забрудненням меристематичних зон коренів (табл. 7), або тим, що поглинуті від випромінювання інкорпорованими радіонуклідами дози від радіоцезію та радіостронцію (варіанти з питомою активністю ґрунту $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг) виявилися дуже близькими (близько 1,5 – 1,8 Гр за чотири - п'ять діб). Як свідчать дані, представлені в табл. 7, хоча питома активність зони розтягування по радіостронцію на порядок перевищує питому активність меристематичної зони, на реакції меристематичних клітин це не відбилося.

Таблиця 5. Динаміка цитогенетичного стану кореневої меристеми проростків цибулі при рівні забруднення ґрунту за ^{90}Sr $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг

Доба після посадки	Довжина кореня, см		Кількість досліджених клітин		Клітини з ХА, %	
	Контроль	Дослід	Контроль	Дослід	Контроль	Дослід
четверта	1,1	1,3	4178	12860	16,5	48,7
шоста	2,0	2,1	2370	13130	25,4	34,2
восьма	2,6	3,3	2906	14950	21,1	20,6

Таблиця 6. Динаміка цитогенетичного стану кореневої меристеми проростків цибулі при рівні забруднення ґрунту за ^{90}Sr $3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг

Доба після посадки	Довжина кореня, см		Кількість досліджених клітин		Клітини з ХА, %	
	Контроль	Дослід	Контроль	Дослід	Контроль	Дослід
четверта	1,1	1,4	4178	12588	16,5	33,9
шоста	2,0	1,5	2370	18750	25,4	37,2
восьма	2,6	4,0	2906	14950	21,1	21,0

Таблиця 7. Динаміка абсолютної активності (додаткової до фону) зразків корневих відрізків у різних варіантах досліді, Бк/кг

Доба після посадки	^{137}Cs , $3,7 \cdot 10^2$ Бк/кг	^{137}Cs , $3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг	^{90}Sr			
			$3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг		$3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг	
			Меристема	Зона розтягування	Меристема	Зона розтягування
вихідна	116,7	964,8	717,8	717,8	44967,6	4967,6
четверта	0,6	1,7	1,1	4,1	0	4,1
шоста	0	0	0	0	0,1	30,3
восьма	1,7	1,0	3,2	1,4	4,8	9,9

Висновки

1. Встановлено вертикальну гетерогенність розподілу ^{137}Cs та ^{90}Sr в головному корені проростків гороху у водній та ґрунтовій культурі з переважним концентруванням ^{37}Cs в меристематичній зоні, а ^{90}Sr - у зоні розтягування. Встановлені закономірності розподілу вказаних радіонуклідів дали змогу суттєво уточнити дозові навантаження на критичні тканини рослин в умовах радіонуклідного забруднення середовища.

2. Встановлено негативний вплив радіонуклідного забруднення ^{137}Cs ґрунту (питома активність $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг) на схожість насіння та швидкість росту проростків цибулі.

3. При всіх рівнях (від $3,7 \cdot 10^2$ до $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг) забруднення ґрунту ^{137}Cs показано підвищення рівня МІ меристеми головного кореня проростків цибулі. Зокрема, за умов питомої активності ґрунту $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг МІ дослідного варіанта становив близько 4,8 % по відношенню до контрольного рівня.

4. Виявлено обернену залежність коефіцієнта нагромадження ^{137}Cs меристематичною зоною головного кореня проростків цибулі від рівня забруднення ґрунту.

5. Рівень ХА в меристематичних клітинах кореневого апексу проростків цибулі на дев'яту добу спостереження складав біля 241, 216 та 151 % від контрольного рівня для ґрунтів з питомою активністю за ^{137}Cs $3,7 \cdot 10^5$ (10^{-5} Кі/кг), $18,7 \cdot 10^4$ ($5 \cdot 10^{-6}$ Кі/кг), $3,7 \cdot 10^4$ Бк/кг (10^{-6} Кі/кг) відповідно.

6. Аналіз цитогенетичного стану меристеми проростків вказує на кореляцію між рівнем радіонуклідного забруднення ґрунту та інтенсивністю клітинного добору як механізму відновлення клітинної популяції.

7. Дози, поглинуті меристемою головного кореня проростків за п'ять діб, є істотними (3,6 Гр) щодо можливості підвищення рівня ХА у меристематичних клітинах.

8. У дослідях з ^{137}Cs при питомій активності ґрунту $3,7 \cdot 10^2 - 3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг ($10^{-8} - 10^{-7}$ Кі/кг) рівень цитогенетичних пошкоджень у меристемах 4 - 8-добових проростків послідовно знижувався. У досліді з питомою активністю ґрунту за ^{137}Cs $3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг ростова активність кореня на восьму добу спостереження перевищувала контроль, що вказувало на наявність відновлювальних та, можливо, радіоадаптаційних процесів.

9. Встановлено різницю між кількісними характеристиками цитогенетичної дії ^{137}Cs та ^{90}Sr , які інкорпоровані у клітини меристематичної зони головного кореня проростків, що вирощували на ґрунті, штучно забрудненому радіонуклідами.

10. Якщо вважати, що найменші питомі активності ґрунту за ^{137}Cs ($3,7 \cdot 10^2 - 3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг) імітують рівні забруднення прилеглих до ЧАЕС територій, то можна констатувати, що генотоксична дія цих ґрунтів може суттєво залежати від часу спостереження в межах вегетаційного періоду, маючи тенденцію до нівелювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гродзинський Д.М. Радиобіологічні ефекти у рослин на забрудненій радіонуклідами території // Фізіологія рослин в Україні на межі тисячоліть. Т. 2. - Київ, 2001. - С. 5 - 22.
2. Гродзинський Д.М., Коломиец К.Д., Кутлахмедов Ю.А. и др. Антропогенная радионуклидная аномалия и растения. - Киев: Лыбидь, 1991. - 160 с.
3. Гродзинський Д.М. Методика применения радиоактивных изотопов в биологии. - Киев: Изд-во УАСХН, 1962. - 172 с.
4. Колосов И. И. Поглощительная деятельность корневых систем. - М.: Изд-во АН СССР, 1962. - 388 с.
5. Mikheev A.N., Zezina N.V., Kutlahmedov Y.A. et al. New phenomena and approaches in investigation of soil - to plant radionuclide transfer // Radioecology and Counter-measure (Kiev, 27 April - 2 May 1991). - IUR, 1992. - P. 209 - 224.
6. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 352 с.
7. Гудков И.Н. Динамика меристемы и ее радиоустойчивость // Формы пострадиационного восстановления растений. - Киев: Наук. думка, 1980. - С. 82 - 115.

ГЕНОТОКСИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ НА МЕРИСТЕМЫ РАСТЕНИЙ

Д. М. Гродзинский, А. Н. Михеев, Е. А. Кравец, Н. И. Гуша,
Ю. В. Шилина, В. В. Бережная, Н. В. Тордия, Г. Д. Сливячук, Л. Б. Зеленая

Установлена вертикальная гетерогенность распределения ^{137}Cs и ^{90}Sr в главном корне проростков с преобладающим концентрированием радиоцезия в меристематической зоне, а радиостронция в зоне растяжения. Полученные данные позволили рассчитать дозовые нагрузки на критические ткани растений в условиях радионуклидного загрязнения. Показано отрицательное влияние уровня загрязнения почвы $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг по радиоцезию на всхожесть семян и скорость роста проростков лука. При уровнях загрязнения почвы $3,7 \cdot 10^2 - 3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг показано повышение уровня митотического индекса меристематических клеток главного корня проростков лука. Уровень хромосомных aberrаций в этих клетках на девятые сутки наблюдения составлял в среднем 241, 216 и 151 % контрольного уровня для ґрунтов с удельной активностью $3,7 \cdot 10^4$, $18,7 \cdot 10^4$ и $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг соответственно. Скорость роста корня и митотический индекс в опытных вариантах превышали контрольные значения, что указывало на наличие восстановительных и радиоадаптационных процессов. Не выявлено существенной разницы между количественными характеристиками цитогенетического действия радиоцезия и радиостронция.

GENOTOXIC INFLUENCE OF RADIONUCLIDE SOIL POLLUTION
ON PLANT MERISTEM

D. M. Grodzinsky, A. N. Mikhyeyev, E. A. Kravetz, N. I. Guscha,
J. V. Shilina, V. V. Berezhna, N. V. Tordia, G. D. Slinyavchuk, L. B. Zelena

The vertical heterogeneity of ^{137}Cs and ^{90}Sr distribution in the main root of seedling with prevailing concentration of radiocesium in meristem zone and radiostrontium in elongation zone is established. The obtained data have allowed to calculate the dose loads on plant critical tissue in conditions of radionuclide pollution. The negative influence of $3,7 \cdot 10^5 \text{ Bq/kg}$ ^{137}Cs soil pollution on seed germination and growth rate of onion seedlings is shown. At levels of soil pollution about $3,7 \cdot 10^2 - 3,7 \cdot 10^5 \text{ Bq/kg}$ the increasing of mitotic index of meristem tissue of the onion seedling main root is shown. The level chromosome aberration in meristem cell at ninth day was about 241, 216 and 151 % for soil with activity $3,7 \cdot 10^4$, $18,7 \cdot 10^4$ and $3,7 \cdot 10^5 \text{ Bq/kg}$ correspondingly. The root growth rate and mitotic index in irradiated variants exceeded with control level, that denoted on restoration and radioadaptation processes. The essential difference between the quantitative characteristics of radiocesium and radiostrontium cytogenetic action is not revealed.

Надійшла до редакції 04.04.03,
після доопрацювання – 15.07.03.