

АКУМУЛЯЦІЯ ^{137}Cs ТА ^{90}Sr У РОСЛИНАХ УНАСЛІДОК ТЕХНОГЕННОЇ КАТАСТРОФИ НА ЧАЕС

О.Г. Мусич¹, В.П. Ландін², Л.А. Райчук²

¹ ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»

² Інститут агроекології і природокористування НААН

Висвітлено результати наукових досліджень інкорпорації ^{137}Cs та ^{90}Sr рослинною клітиною та їх післядія за міграції в сільськогосподарську продукцію майже через 33 роки після катастрофи на ЧАЕС. Проаналізовано регуляторні механізми накопичення радіонуклідів у рослинній клітині та механізми захисту рослин. Встановлено, що стійкість рослин до радіонуклідів залежить від їхніх антиоксидантних систем, значення іонообмінного коефіцієнта, кількості гістидильних білків та карбоксильних груп, розміщених на поверхні пектинів, і обумовлюється специфічними молекулярними і фізіологічними механізмами як для одного виду рослини, так і для всієї таксономічної групи. За умов посиленого техногенезу та його наслідків головним завданням агропромислового комплексу є стабілізація і захист від контамінації трофічних ланцюгів та виробництво продукції з мінімальним рівнем забруднення радіонуклідами.

Ключові слова: радіонукліди, рослинна клітина, ланцюг «грунт — рослина», генетичні зміни, геохімічне середовище.

Довготривале забруднення ґрунтів України радіонуклідами призвело до різних змін обміну і транслокації речовини і енергії у природних ландшафтах, порушило біологічну рівновагу між компонентами біосфери, сприяло появі нових ландшафтів. У ХХ–ХХІ ст. активізувався процес антропогенізації довкілля. З'явилися антропогенні ландшафти — модифіковані версії природних систем, які зумовлюють певне господарське навантаження. Через техногенні зміни навколишнього природного середовища зменшується біорізноманіття, що є не лише втраченою для біосфери загалом, але й головною екологічною проблемою сьогодення [1].

Нині незмінених господарською діяльністю людини ландшафтів в Україні майже не залишилось. Актуальною також є проблема забруднення ґрунтів Полісся радіонуклідами та накопичення їх у рослинах після аварії на ЧАЕС майже через 33 роки потому, особливо за умов поглибленого техногенезу та його наслідків.

Основним чинником порушення екологічної стійкості екосистеми є надмірне використання природної біоти, адже неможливо зберегти види організмів, не забезпечивши характерних для них умов місцезростань. Наслідки Чорнобильської катастрофи продовжують ліквідовувати вже понад 30 років, проте й досі багато аспектів цієї проблеми потребують поглибленого аналізу та осмислення. Нові покоління рослинних видів формуються з клітин, у генетичному апараті яких вже накопичились дефекти, що провокують мутаційні процеси. Мутований ген швидко переходить з організмів рівня на популяційний, сприяє утворенню нових видів, сортів рослин.

Мета роботи — проаналізувати та узагальнити результати наукових досліджень акумуляції та міграції радіонуклідів біологічним ланцюгом «грунт — рослина» для зменшення негативних наслідків за умов посиленого техногенезу.

Узагальнену інформацію стосовно міграції та акумуляції радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr ланцюгом «грунт — мікробоценоз» висвітлено раніше [2].

Рослина — складна багатофункціональна система, більшість процесів у якій відбувається впродовж усього її життя. У ланцюзі «грунт — рослина» під час обміну речовини з навколишнім природним середовищем витік хімічних елементів переважає над їх поверненням. У агроценозах цей процес відбувається щорічно, а в природних біоценозах значна кількість хімічних елементів відчується без повернення впродовж десятиків і сотень років [3]. Відповідно, акумуляція радіонуклідів у рослині відповідає відчуженню їх з ґрунту, і тривалість цього процесу характеризує геохімічну роботу рослини. Період забруднення ^{137}Cs та ^{90}Sr рослин може тривати доволі довго, і саме природні ландшафти визначають інтенсивність міграції радіонуклідів у системі «грунт — рослина», їх перерозподіл між компонентами навколишнього природного середовища та винесення за межі ценозу.

Аналіз результатів досліджень [4–7] свідчить, що в основі механізму закріплення радіонуклідів у ґрунті впродовж десятиліть лежить сорбція, яка визначає їх міграційні властивості, інтенсивність поглинання ґрунтом, мікробіоценозом, можливість проникнення в коріння рослини і їх фізіолого-біохімічні властивості. Крім того, ізотопи ^{137}Cs та ^{90}Sr є близькими за хімічними властивостями до деяких хімічних елементів. Так, закріплення та розподіл ^{90}Sr у ґрунті визначаються закономірностями поведінки ізотопного носія — стабільного стронцію, хімічного аналога неізотопного носія — стабільного кальцію (Ca^{2+}), а також мінеральною частиною ґрунту. Зокрема, ^{90}Sr міцно закріплюється у ґрунтах з високим умістом частинок мулу, утворює складні комплекси з гумусовими кислотами, органічними речовинами, до складу яких входять Ca , Fe та Al , і адсорбується рослиною шляхом транспортних систем або внаслідок дифузії.

Калій за хімічними властивостями є близьким до ^{137}Cs , але як його неізотопний аналог — це макроелемент із ультрамікроконцентраційним умістом у ґрунті. Унаслідок цього в ґрунтованому розчині відбува-

ється значне розчинення мікрокількостей ^{137}Cs (який не є елементом мінерального живлення) іонами калію, і за поглинання їх корінням рослини існує своєрідний антагонізм іонів цезію та калію, тобто конкуренція за місце сорбції на поверхні кореня.

Перехід радіонуклідів із ґрунту в рослину — це результат дії як ґрунтово-хімічного, так і біологічного (фізіологічного) процесу, обумовленого поглинанням ^{137}Cs і ^{90}Sr кореневою системою рослини (рис. 1).

Ґрунти Полісся України, переважно кислі, легкого гранулометричного складу та бідні на кальцій, сприяють інтенсивнішому переходу ^{137}Cs і ^{90}Sr з ґрунту в рослину порівняно з родючими ґрунтами, багатими на кальцій. Загалом, механізм накопичення радіонуклідів рослиною є подібним до засвоєння нею необхідних елементів живлення. Відмінність полягає у тому, що радіонукліди у ґрунті перебувають в гранично низьких концентраціях, а елементи живлення — у більш високих.

Результати численних досліджень [8–9] свідчать, що стійкість рослин до дії стресових чинників, у т.ч. радіонуклідів, залежить від антиоксидантних систем рослин і обумовлюється специфічними молекулярними та фізіологічними механізмами як для одного виду рослини, так і для таксономічної групи загалом. Акумуляція радіонуклідів у рослинній клітині залежить від величини іонообмінного коефіцієнта, кількості гістидильних білків та карбоксильних груп, розміщених на поверхні пектинів. Саме пектини відіграють важливу роль у регуляції доступу до плазмолемі необхідних речовин, зокрема калію, кальцію та радіонуклідів. Головна функція плазматичної мембрани, що є селективним бар'єром на шляху проникнення радіонуклідів у клітину, полягає у формуванні стійкості рослин до цих забруднювачів, оскільки може повністю заблокувати їх надходження у клітину. Транспортування іонів ^{137}Cs і ^{90}Sr через мембрану відбувається завдяки пасивній дифузії та спеціальній системі ферментів-трансфераз. У рослин існують спеціальні механізми регуляції, і акумуляція радіонуклідів відбувається до певної



Рис. 1. Вплив радіонуклідів на рослинну клітину

межі залежно від виду та сорту рослини. У клітині існують ще репаративні механізми, завдяки яким швидко відновлюються метаболічні процеси за участю органічних кислот та специфічних білків, як-от фітохелатів та феритинів. На жаль, навіть ці механізми не дають змоги уникнути критичної акумуляції радіонуклідів у клітині. Вона накопичує їх лише до певного рівня, перевищення якого спричиняє неминучу її загибель. Всі рослини родини бобових є кальцефілами і можуть поряд із кальцієм нагромаджувати у значних кількостях його хімічний аналог — ^{90}Sr , створюючи умови для значного внутрішнього опромінення цих рослин. Радіостронцій

концентрується нерівномірно, зазвичай в органах і тканинах, які мають високу метаболічну та мітотичну активність, у провідних тканинах-судинах, меристемах і генеративних органах. До того ж ^{137}Cs у рослинах концентрується переважно в тих клітинах, які активно діляться і ростуть, тобто у меристемах коренів (зона поділу). Можна констатувати, що існує парадоксальне явище, коли на забруднених радіонуклідами землях упродовж десятиліть спостерігаються радіобіологічні ефекти, що часто відповідають дозам зовнішнього опромінення на порядок вищим від тих, які вдається оцінити за допомогою дозиметрів [10].

Поглинання радіонуклідів рослинною клітиною відбувається за алгоритмом:

I стадія — іонно-обмінна адсорбція або дифузія залежно від концентрації іонів радіонуклідів клітинною мембраною та утворення комплексу речовин-переносників. Обмін відбувається завдяки іонам H^+ та CO_3^{2-} під час дисоціації дихальної вуглекислоти;

II стадія — проникнення іонів (комплексантів) у провідні тканини рослин (трахеїди та судини ксилеми);

III стадія — висхідний рух іонів радіонуклідів разом із ксилемним потоком судинами ксилеми в клітини наземних органів рослини. Сік ксилеми містить воду, органічні та неорганічні речовини; під час транспірації вода випаровується, а радіонукліди, органічні та неорганічні речовини залишаються.

Упродовж десятиліть після аварії на ЧАЕС у рослинній клітині відбувались характерні зміни перебудови обміну речовин, енергії та ультраструктур, що обумовлено наявністю в цитоплазмі значної кількості крохмальних зерен і мітохондрій з високою фізіологічною активністю; зміна якісного складу білків і фосфоліпідів — основних компонентів клітинних мембран.

Фізіологічні зміни за 32 післяаварійні роки обумовлено генеративною функцією рослини, що своєю чергою призводить до експресії генів, репрограмування геному, появи нових видів, зміни біорізноманіття. Видова функція рослини — це формування репродуктивного органу, закладеного на генетичному рівні. Нині за зовнішнім благополуччям приховуються генетичні дефекти, збільшується частота хромосомних аберацій у клітинах меристеми. Крім того, накопичуються незворотні молекулярні пошкодження генетичного апарату клітини з характерним запам'ятовуванням дози, спостерігається кумулятивний ефект унаслідок трансмутації. Індукована геном на нестабільність спричиняє втрати еволюційно стабілізованого генофонду, що забезпечує сталу позицію виду в екосистемі. Довготривале перебування радіонуклідів у ґрунтах Полісся України зумовило адапта-

цію хвойних, деревних рослин, спрямовану на захист структурованих новоутворень у процесі формування зародка та сіянців, цвітіння та утворення насіння, росту та розгалуження вегетативних органів. Обмежена резистентність меристем клітин доповнюється глибокою морфогенетичною перебудовою як окремих органів, так і рослини загалом. Так, закриті та засмолені дихальця хвойних порід негативно впливають на газообмін клітин і тканин, обмежують надходження кисню та вуглецю, уповільнюють процеси фотосинтезу та дихання [10].

Період напіврозпаду для ^{90}Sr становить 28,7 року, а для ^{137}Cs — 30 років, тому станом на 2020 р. залишиться лише післядія їх на біоту. За цей час з'явиться нове покоління рослин з філогенетичними та онтогенетичними особливостями (рис. 2).

Під час вегетації рослини виробляють стійкість до збереження свого середнього хімічного складу, особливо за тривалого впливу геохімічного середовища, до якого вони пристосувались в перші роки після аварії на ЧАЕС.

Вплив радіонуклідів на рослини проявляється по-різному. Навіть через 32 роки після аварії на ЧАЕС мутаційна мінливість достовірно перевищує стандартний рівень. Неоднакова біологічна ефективність радіоізотопів спричиняє підвищення ураженості рослин різними хворобами, що свідчить про зниження їх імунного статусу. Інкорпоровані радіонукліди зумовлюють найрізноманітніші радіобіологічні ефекти: раннє цвітіння і досягання деяких культур (радіаційна стимуляція); зміну форми листя та його гігантизм/карликовість (морфологічні зміни); пригнічення росту та розвитку (променева хвороба); зростання кількості специфічних мутацій у пилку, набуття дочірніми рослинами нових ознак, індукцію геномної нестабільності, втрату сорту (генетична дія) [11].

У післяаварійний період з'являються рослини з сортовими особливостями, еволюційно адаптовані до нинішніх екологічних умов. Часто формується фітопатогенний фон у агроценозах екологічно

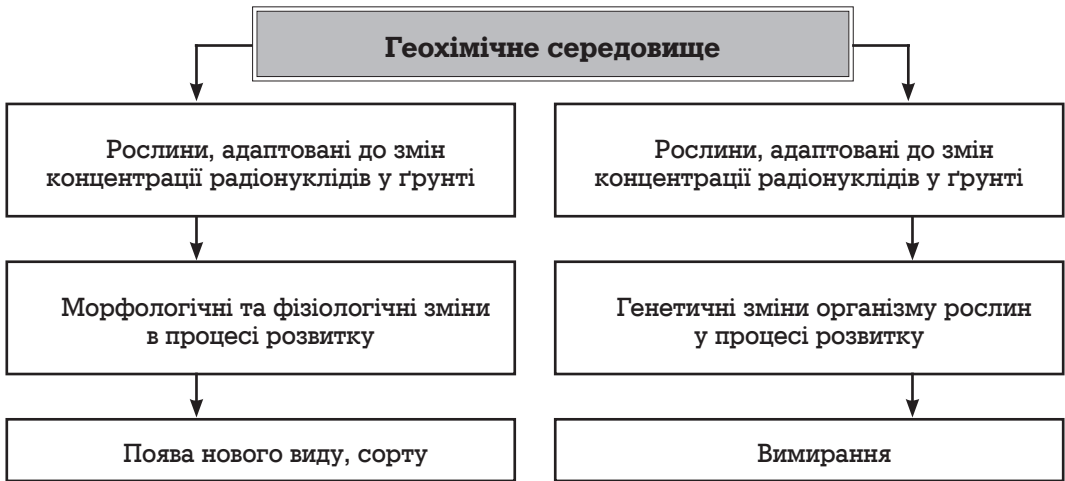


Рис. 2. Вплив геохімічного середовища на нове покоління рослин в умовах довготривалого забруднення ґрунтів радіонуклідами

безпечних сортів пшениці, що характеризує екологічну стабільність агроєкосистеми внаслідок зменшення кількості нових видів фітопатогенних грибів та їх агресивності. Це особливо важливо за складної екологічної ситуації в сільськогосподарському виробництві, коли селекційний процес спрямовується лише на збільшення врожайності та стійкості сортів до хвороб, без урахування еволюційно-екологічних змін рослин на ґрунтах, забруднених радіонуклідами впродовж десятиліть. Видові та сортові характеристики рослин є теоретичною основою для розробки цілеспрямованого добору сільськогосподарських рослин, особливо кормових, на тлі фітомеліорації ґрунтів, забруднених радіоізотопами.

Головним завданням агропромислового комплексу в умовах посиленого техногенезу та його наслідків (міграція радіонуклідів трофічним ланцюгом «ґрунт – рослина – тварина (продукти живлення) – людина») є виробництво продукції з мінімальним рівнем забруднення радіонуклідами. Упродовж десятиліть в Інституті агроєкології і природоохористування НААН проводяться дослідження з довготермінового прогнозування рівня забруднення ^{137}Cs і ^{90}Sr компонентів ланцюга «ґрунт – рослина – тварина – сільськогосподарська продук-

ція» та їх перерозподілу у різних типах ґрунтів і ландшафтів [12]. Використовуючи різні мікроелементи у вигляді мікродобрив, стимуляторів росту рослин, людина змінює геохімічне середовище, відповідно, змінюються і властивості рослин, спрацьовують захисні механізми, виробляються посухостійкість, морозостійкість, що є перспективним напрямом під час інтродукції та акліматизації рослин. Важливим у цьому аспекті є захист трофічних ланцюгів, до яких входять забруднені радіонуклідами рослини, зокрема:

- організація екологічно чистого виробництва;
- впровадження агротехнічних прийомів, що сприяють зниженню надходження радіонуклідів у рослину;
- використання адаптивного потенціалу рослин, стійкого до абіотичних чинників навколишнього природного середовища, та специфічного механізму нейтралізації радіонуклідів, що сприяє формуванню відносно екологічно безпечної сільськогосподарської продукції (шлях, який не потребує значних енергозатрат).

ВИСНОВКИ

Наведені дані надають змогу прогнозувати на багато поколінь у майбутньому

пригнічуваний та мутагенний ефекти на деревні рослини та сільськогосподарські культури для оцінки ризику переходу техногенних радіонуклідів у сільськогосподарську продукцію, а також використовувати хвойні рослини як найбільш чутливий біоіндикатор у разі забруднення радіонуклідами ґрунту, рослин, ландшафту. Низький

рівень забрудненості радіонуклідами рослин — це ознака їх еволюційного пристосування до умов навколишнього природного середовища. Зростання стабільності хімічного складу рослин та їх незалежність від змін геохімічного середовища є важливою закономірністю еволюції прогресивного характеру.

ЛІТЕРАТУРА

1. Іванов Є.А. Антропогенізація ландшафтів: підходи, діагностування, моделювання / Є.А. Іванов, І.П. Ковальчук // Науковий вісник Чернівецького університету. — 2016. — Вип. 612–613. — С. 54–59. — (Серія: Географія).
2. Порушення екологічної рівноваги мікробіоценозу на радіаційно забруднених ґрунтах Полісся України / О.Г. Мусич, В.П. Ландін, А.І. Парфенюк, О.С. Дем'янюк // Агроекологічний журнал. — 2018. — № 3. — С. 70–77.
3. Власюк П.А. Биологические элементы в жизнедеятельности растений / П.А. Власюк. — К.: Наукова думка, 1969. — 516 с.
4. Пристер Б.С. Кинетическая модель поведения ^{137}Cs в системе почва-растение, учитывающая агрохимические свойства почвы / Б.С. Пристер, В.Д. Виноградская // Проблемы безопасности атомных электростанций в Чернобыле. — 2001. — Вип. 16. — С. 151–160.
5. Пристер Б.С. Проблемы прогнозирования поведения радионуклидов в системе почва-растение / Б.С. Пристер // Адаптация агроэкоосферы к условиям техногенеза / Под ред. чл.-кор. АН РТ Р.Г. Ильязова. — Казань: ФЭН, 2006. — С. 78–125.
6. Степанова Л.П. Оценка влияния радионуклида цезий-137 на экологическое состояние почв и растений / Л.П. Степанова, Е.А. Коренькова, А.И. Мышкин // Вестник Орел ГАУ. — 2009. — С. 48–53.
7. Проблемы безопасности атомной энергетики. Уроки Чернобыля: монография / Б.С. Пристер, А.А. Ключников, В.Г. Баряхтар и др.; под ред. акад. НААН Б.С. Пристера. — 2-е изд., доп. — Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС, 2016. — 356 с.
8. Гончарова Н.В. Растения и антропогенные стрессоры / Н.В. Гончарова. — Минск: Триолета, 2005. — 112 с.
9. Goncharova N.V. The transport of ^{137}Cs and ^{90}Sr across root cell membranes / N.V. Goncharova // Revue de Cytologie et de Biologie Vegetables Le Botaniste. — 2001. — No. 1–2. — P. 15–20.
10. Гудков І.М. Радіобіологія: підручник / І.М. Гудков. — Херсон: Олди-Плюс, 2016. — 504 с.
11. Якимчук Р.А. Мутагенная активность радионуклидных загрязнений в зоне аварии на ЧАЭС / Р.А. Якимчук, В.В. Моргун // Физиология и биохимия культурных растений. — 2011. — Т. 43, № 4. — С. 279–285.
12. Методичні рекомендації щодо заходів з реабілітації критичних екосистем радіоактивно забруднених регіонів Українського Полісся / [В.П. Ландін, В.А. Проневич, М.Д. Кучма та ін.]. — К., 2015. — 30 с.

REFERENCES

1. Ivanov, Ye.A. (2016). Antropohenizatsiia landshaftiv: pidkholdy, diahnostuvannia, modeliuvannia [Anthropogenization of landscapes: approaches, diagnostics, modeling]. *Naukovyi visnyk Chernivets'koho universytetu — Scientific Bulletin of Chernivtsi University, Geography*, 612–613, 54–59 [in Ukrainian].
2. Musych, O.H., Landin, V.P., Parfeniuk, A.I., & Demianiuk, O.S. (2018). Porushennia ekolohichnoi rivnovahy mikrobiotsenozu na radiatsiino zabrudnennykh gruntakh Polissia Ukrainy [Violation of the ecological balance of the microbiocenosis on the radioactively contaminated soils of the Polissya of Ukraine]. *Ahroekolohichnyi zhurnal — Agroecological journal*, 3, 70–77 [in Ukrainian].
3. Vlasjuk, P.A. (1969). *Biologicheskie elementy v zhiznedeiatelnosti rastenii* [Biological elements in plant life]. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
4. Prister, B.S., & Vinogradskaja, V.D. (2001). Kinetic model of ^{137}Cs behavior in the soil-plant system, taking into account the agrochemical soil properties. *Problemi bezpeki atomnikh elektrostancii i Chornobila — Problems of safety of nuclear power plants and Chernobyl*, 16, 151–160 [in Russian].
5. Prister, B.S. (2006). Problemy prognozirovaniya povedeniya radionuklidov v sisteme pochva-rasteniye [Problems of predicting the behavior of radionuclides in the soil-plant system]. *Adaptatsiya agroekosfery k usloviyam tekhnogeneza* [Adaptation of agroecosphere to the conditions of technogenesis]. R.G. Ilyazov (Ed.). Kazan: FEN [in Russian].
6. Stepanova, L.P., Korenkova, E.A., & Myshkin, A.I. (2009). Otchenka vliianiia radionuklida tsezii-137

- na ekologicheskoe sostoianie pochv i rastenii [Assessing the impact of radionuclide cesium-137 on the ecological condition of soils and plants]. *Vestnik Orel GAU – Bulletin Orel NAU*, 48–53 [in Russian].
7. Prister, B.S., Kliuchnikov, A.A., Bariakhtar, V.G., Shestopalov, V.M., & Kukhar, V.P. (2016). *Problemy bezopasnosti atomnoy energetiki. Uroki Chernobyla: monografiya [Safety problems of nuclear energy. Chernobyl lessons: monograph]*. B.S. Prister (Ed.). (2d ed.). Chernobyl: In-t problem bezopasnosti AES [in Russian].
 8. Goncharova, N.V. (2005). *Rasteniia i antropogennye stressory [Plants and anthropogenic stressors]*. Minsk: Trioleta [in Russian].
 9. Goncharova, N.V. (2001). The transport of ^{137}Cs and ^{90}Sr across root cell membranes. *Revue de Cytologie et de Biologie Vegetables Le Botaniste*, 1–2, 15–20 [in English].
 10. Hudkov, I.M. (2016). *Radiobiologhiia: pidruchnyk [Radiobiology: Tutorial]*. Kherson: Oldy-Plius [in Ukrainian].
 11. Iakimchuk, R.A., & Morgun, V.V. (2011). Mutagennaia aktivnost radionuklidnykh zagriaznenii v zone avarii na ChAES [Mutagenic activity of radionuclide contamination in the Chernobyl accident zone]. *Fiziologiia i biokhimiia kulturnykh rastenii – Physiology and biochemistry of cultivated plants*, 43, 4, 279–285 [in Russian].
 12. Landin, V.P., Pronevych, V.A., Kuchma, M.D., Chobotko, H.M., Iliencko, T.V., Raichuk, L.A. et al. (2015). *Metodychni rekomendatsii shchodo zakhodiv z reabilitatsii krytychmykh ekosystem radioaktyvno zabrudnennykh rehioniv Ukrainskoho Polissia [Guidelines for the rehabilitation measures of critical ecosystems of radioactively contaminated regions of Ukrainian Polissya]*. Kyiv [in Ukrainian].

Отримано 24.01.2019