

# ВІД КРИЗИ ДО ВІДНОВЛЕННЯ: НАУКОВІ ЗДОБУТКИ ІНСТИТУТУ АГРОЕКОЛОГІЇ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ НААН У МІНІМІЗАЦІЇ НАСЛІДКІВ АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС

Г.М. Чоботко, Л.А. Райчук, І.К. Швиденко, М.С. Уманський

*Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)*

*e-mail: chobotko@ukr.net; ORCID: 0000-0001-8228-4331*

*e-mail: edelvice@ukr.net; ORCID: 0000-0002-2552-4578*

*e-mail: favor09@ukr.net; ORCID: 0000-0002-6135-8968*

*e-mail: nikum1@ukr.net*

*Висвітлено участь науковців Інституту агроекології і природокористування НААН у подоланні та мінімізації наслідків Чорнобильської катастрофи впродовж 1986–2024 рр. Показано, що історія розвитку радіоекологічних досліджень в Інституті бере свій початок із перших днів після аварії на Чорнобильській АЕС. Фактично з цього часу розпочався відлік роботи з радіаційного моніторингу сільськогосподарських угідь, які зазнали аварійного впливу. Одним із найважливіших напрямів роботи у цей період було проведення повітряної та наземної радіаційної розвідки. Активно здійснювалися роботи з радіоекологічного моніторингу та дозиметричного контролю населення. Радіоактивне забруднення території було проаналізовано за ландшафтним, басейновим та ландшафтно-геохімічними принципами, на основі чого складено карти радіаційного забруднення території  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{94}\text{Pu}$ . У віддалений період ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи колектив підрозділу працював над розробленням конктрзаходів для різних видів господарювання в умовах радіоактивного забруднення з урахуванням сучасних тенденцій розвитку природно-господарського комплексу та нових економічних умов на засадах ландшафтно-екологічного підходу. Аналіз результатів наукової діяльності співробітників установи свідчить, що за післяаварійний період колектив радіоекологів зібрав та систематизував значні обсяги інформації, яка трансформувалася в різноманітні бази даних, картографічні матеріали, математичні моделі, методичні рекомендації, регламенти, проекти нормативних документів тощо. Представлено інформацію про внесок працівників Інституту у розвиток радіоекології, відновлення сільськогосподарського виробництва на радіоактивно забруднених землях та реабілітацію постраждалих від аварії на Чорнобильській АЕС території. Також окреслено сучасні радіоекологічні проблеми і загрози, створені повномасштабною військовою агресією Росії проти України, порушення нею всіх семи принципів радіаційної безпеки, а також потенційні небезпеки радіаційного характеру в майбутньому.*

**Ключові слова:** радіоекологія, міграція радіонуклідів, реабілітація радіоактивно забруднених ландшафтів, радіаційні загрози.

## ВСТУП

Чорнобильська катастрофа — перша і до 2011 р. єдина радіаційна аварія сьомого, найвищого рівня за міжнародною шкалою ядерних подій [1], після якої, власне, і цю шкалу і було розроблено, — призвела до масштабних довготермінових наслідків, що стали як викликом для науковців не лише України, але і світу, водночас піднявши радіоекологічні і радіобіологічні дослідження на наступний рівень. Екологічна

ситуація, що склалася внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС, поставила колективи науково-дослідних інститутів перед об'єктивною необхідністю розширення напрямів наукових досліджень. Тому в 1986 р. з метою поглиблення науково-дослідних робіт зі зниження забруднення продукції сільського господарства радіонуклідами, а також посилення науково-методичного керівництва проектно-пошукових станцій хімізації сільського господарства з охорони угідь від забруднення окремим підрозділом відділу дослідів із добривами і агро-

хімічного обстеження ґрунтів Українського філіалу ЦІНАО було створено лабораторію контролю за забрудненням навколишнього природного середовища у складі десяти осіб під керівництвом канд. біол. наук М.І. Майстренко. Саме від цього підрозділу і бере свій початок радіоекологічний напрям Інституту агроєкології і природокористування НААН. І понині, 38 років після аварії на ЧАЕС, проблеми радіоекології доповнюються дедалі новими аспектами, зокрема з 2022 р. військова агресія Росії породила низку серйозних радіаційних загроз, які вимагають адекватних рішень, зокрема від наукової спільноти. Зважаючи на тривалу історію радіоекологічної наукової школи в науково-дослідній установі, метою роботи було проаналізувати еволюцію радіоекологічних досліджень та розвиток радіоекологічних технологій в Інституті агроєкології і природокористування НААН із моменту аварії на Чорнобильській АЕС, а також окреслити майбутні напрями роботи з урахуванням сучасних радіоекологічних викликів і загроз, породжених військовою агресією Росії.

## **АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ**

Головним завданням у гострий період після аварії було насамперед визначення радіаційної ситуації. Це зумовило розвиток таких напрямів досліджень:

- розподіл і міграція радіонуклідів у навколишньому природному середовищі, зокрема шляхи та інтенсивність їх надходження у врожай сільськогосподарських культур і продукцію тваринництва;
- дезактивація ґрунтів та зниження надходження радіонуклідів у продукцію рослинництва;
- очищення продукції, отриманої на забрудненій території;
- генетичні наслідки радіаційного забруднення.

Для розв'язання цих проблем, насамперед, потрібно було організувати опера-

тивний збір інформації для попередньої оцінки поточної радіоекологічної ситуації на сільськогосподарських угіддях. Фактично з цього часу розпочався відлік роботи з радіаційного моніторингу сільськогосподарських угідь, які зазнали аварійного впливу. Фахівці лабораторії брали активну участь в оцінці масштабу радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи, виявленні та уточненні контурів зон радіоактивного забруднення. Одним із найважливіших напрямів роботи у цей період було проведення повітряної та наземної радіаційної розвідки. Було встановлено рівні накопичення радіонуклідів у ґрунті і продукції рослинництва. Здійснено суцільне радіологічне обстеження ґрунтів сільськогосподарських угідь на предмет щільності їх радіоактивного забруднення. Працівники підрозділу провели дослідження застосування вапняків, цеолітів та інших адсорбентів для зменшення міграції радіонуклідів у ґрунті та інтенсивності їх надходження у рослини. Результатом цієї роботи, зокрема, стало розроблення рекомендацій із ведення сільськогосподарського виробництва та використання продукції рослинництва в зоні забруднення радіонуклідами й методичних положень із прогнозування динаміки забруднення ґрунту радіонуклідами і оцінки екологічних збитків.

Після створення на базі ЦІНАО Інституту агроєкології і біотехнології в 1992 р. підрозділ було перейменовано в лабораторію моніторингу та забруднення навколишнього середовища у складі відділу агроєкології. У 1993 р. його очолив д-р біол. наук, проф., акад. Б.С. Прістер [2–4]. На той час відділ складався з чотирьох лабораторій (оцінки якості сільськогосподарської продукції, експериментальної екології, агроєкологічного моніторингу та науково-методичного забезпечення агроєкологічних досліджень), очолюваних вченими А.Д. Саженоком, В.О. Руденком, Є.Г. Солянеком і М.І. Майстренком. Існуючий обсяг даних із відповідної проблематики вимагав ґрунтового аналізу, тому в межах відділу було створено групу агро-

екологічної інформатики у складі семи осіб, з яких троє — кандидати фізико-математичних наук. Того самого року до колективу радіоекологів приєднався канд. фіз.-мат. наук В.К. Шинкаренко.

У цей період активно здійснювалися роботи з радіоекологічного моніторингу та дозиметричного контролю населення. Радіоактивне забруднення території було проаналізовано за ландшафтним, басейновим та ландшафтно-геохімічними принципами, на основі чого складено карти радіаційного забруднення території  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{94}\text{Pu}$ . Також проводили дослідження щодо ефективності засобів хімізації для обмеження надходження радіонуклідів у рослини, зокрема у травостій та картоплю. Було розроблено комплекс агрохімічних заходів для зниження рівня радіоактивного забруднення продукції сільського господарства та удосконалено систему удобрення для мінімізації накопичення радіонуклідів продукцією в зоні Полісся України.

Результати наукової роботи першого десятиріччя після аварії на Чорнобильській АЕС та об'єктивна зміна радіоактивної ситуації поставила низку нових завдань у галузі міграції радіонуклідів у системі «грунт – рослина». Ці завдання зводились переважно до вивчення залежності динаміки рухомості радіонуклідів залежно від рівнів зволоження і ґрунтових умов, особливостей міграції радіонуклідів трофічними ланцюгами залежно від природно-кліматичних умов та розробки нових удосконалених моделей міграції радіонуклідів у агросфері з метою планування можливостей реабілітації постраждалих територій. Тому з 1996 р. колектив радіоекологів Інституту займався встановленням закономірностей міграції радіонуклідів в агробіоценозах (переважно на присадибних ділянках), а також — кореляційних взаємозв'язків та формуванням математичних моделей міграції радіонуклідів як складової сталих агроєкосистем. Також продовжувались роботи з комплексного картування радіоактивно забруднених земель, перспективних для відновлення сільськогосподарської діяльності, з метою

оцінки можливості їх реабілітації і вивчення впливу мікробіологічних препаратів, мікроелементів та регуляторів росту рослин на зменшення інтенсивності надходження радіонуклідів у рослини.

У 1998 р. в Інституті агроєкології і біотехнології УААН було створено відділення радіоекології, яке очолив д-р фіз.-мат. наук Є.К. Гаргер. До його складу увійшли лабораторія інформаційних систем із сектором «Київський обласний радіоекологічний центр», лабораторія моделювання радіоекологічних процесів в екосистемах, лабораторія експериментальних досліджень процесів переносу в екосистемах, лабораторія радіохімічних та інструментальних методів аналізу й група агроєкологічного моніторингу. До колективу відділення приєдналося нове покоління творчих особистостей, серед яких д-р фіз.-мат. наук І.І. Ясковець, д-р біол. наук Ю.О. Кутлахмедов, канд. геогр. наук Т.Д. Лев, В.О. Кашпур та ін.

Пріоритетними напрямками досліджень цього періоду було довгострокове прогнозування вмісту радіонуклідів у ланцюзі «грунт – рослина – тварина – сільськогосподарська продукція» та перерозподілу радіонуклідів у різних типах ґрунтів і ландшафтів для довгострокових оперативних прогнозних оцінок процесів та підтримки керівних рішень, а також розробка технологій реабілітації радіоактивно забруднених сільськогосподарських угідь та рекомендації з виробництва сільськогосподарської продукції, вміст радіонуклідів, який відповідав би чинним нормативам. Екосистеми, параметри яких можуть під впливом зовнішніх чинників змінитися і зміна яких може помітно вплинути на радіологічні й радіоекологічні показники (аж до перевищення допустимих рівнів), із наступним збільшенням дозових показників для певного населеного пункту, було визначено критичними в радіоекологічному сенсі. Рівень критичності цих екосистем було запропоновано визначати за такими критеріями:

- рівень радіонуклідного забруднення (визначає можливість формування за-

бруднених радіонуклідами кормів та харчових продуктів);

- значення коефіцієнтів переходу у системі «ґрунт – кормові рослини» або «ґрунт – лісові продукти»;
- рівень забруднення сіна, м'яса та молока, яке отримують від худоби, що споживає корми із відповідних кормових угідь (для оцінювання рівня критичності пасовищ та сіножатей);
- перевищення допустимих значень рівнів забруднення лісових продуктів (для оцінювання рівня критичності лісових екосистем);
- дозові навантаження для населення як інтегральний показник критичності екосистем.

Аналітична система визначення критичних екосистем передбачала кілька основних етапів аналізу чинників дозових навантажень на стан здоров'я населення регіону: встановлення фактичних раціонів харчування населення; визначення ролі та частки лісів і лісових продуктів, пасовищ та сіножатей (через забруднення молока й м'яса) і городньої продукції у формуванні дозових навантажень у населення; встановлення ролі контрзаходів у зниженні значень дози внутрішнього опромінення мешканців регіону. За результатами картування критичних екосистем Полісся було встановлено прогностичні оцінки щодо оптимальної системи контрзаходів радіоекологічного напрямку як у рослинництві, так і тваринництві, що впливають на дозові навантаження населення.

За результатами багаторічних досліджень впродовж 1998–2000 рр. було розроблено та удосконалено комплексну модель міграції радіонуклідів харчовими ланцюгами від ґрунту до людини та прогнозу дозового навантаження на населення – «Екомодель» [5]. Остання була призначена для оцінки радіоекологічних умов проживання населення на забрудненій території північно-західної частини Українського Полісся та вироблення контрзаходів зі зменшення шкідливого впливу радіонуклідів на організм людини. Вона давала можливість простежити міграцію радіонуклі-

дів від конкретної ділянки з певним видом рослинного покриву до людини, тоді як у вже відомих на той час моделях аналогічного призначення оперували усередненими значеннями радіоактивного забруднення для всієї території досліджуваного регіону. Отже, у цій моделі бралися до уваги конкретні умови, що визначають інтенсивність переходу радіонуклідів від ґрунту до рослин. Для врахування найважливіших потоків радіонуклідів до організму людини в «Екомоделі» було передбачено можливість моделювання міграції радіонуклідів як у стандартній агроєкосистемі, так і лісовій та водній екосистемах. На той час це була єдина модель, що давала змогу враховувати реальні ландшафтні умови проживання людини саме в Українському Поліссі та сільськогосподарську практику в цьому регіоні [6; 7]. Також у межах тематики відділення було розроблено математичну модель «Приватне господарство» та інтегровано її в «Екомодель». Радіоекологічна математична модель «Приватне господарство» описувала довгострокову міграцію радіонуклідів у агроєкосистемі приватного селянського господарства, включаючи свійських тварин і діяльність людини.

Колективом відділу проводилися дослідження з оцінки радіоактивного забруднення приземного шару атмосфери та вивчення закономірностей міграції радіонуклідів на зрошуваних водами р. Дніпра землях.

Отже, основними результатами цього трирічного дослідження стали: інформаційні збірники «Сучасний радіоекологічний стан території Чернігівської (Житомирської, Київської) області за період 1997–1999 рр.»; банк даних математичної, картографічної та метаінформації; радіоекологічна інформаційна система на базі ГІС-технологій для прогнозу забруднення сільськогосподарської продукції і підтримки керівних рішень та автоматизована довідково-інформаційна база параметрів ґрунтів зони радіоактивного забруднення [8]; методика класифікації господарств агропромислового комплексу за рівнем їх радіоактивного забруднення; моделі земле-

користування, технології, карти реабілітації радіоактивно забруднених угідь та відповідні рекомендації виробництву; математичні моделі «Екомодель» та «Приватне господарство»; проєкт «Регламенту моніторингу сільськогосподарської продукції колективного і приватного секторів землекористування у системі агропромислового комплексу України» тощо.

З 2001 р. діяльність наукового колективу радіоекологів почала концентруватись, переважно, на питаннях радіоекологічного моніторингу та реабілітації радіоактивно забруднених сільськогосподарських угідь. Про це свідчить також перейменування одного з підрозділів Інституту в лабораторію радіоекологічного моніторингу та створення у 2004 р. сектору реабілітації забруднених земель під керівництвом канд. с.-г. наук В.В. Москальця. У наступні п'ять років проводились дослідження альтернативних підходів до реабілітації сільськогосподарських угідь у колективних і приватних господарствах [9; 10] і вдосконалення методології ведення радіоекологічного моніторингу і прогнозу довгострокового застосування контрзаходів. Було розроблено математичні моделі, що описують хід у часі об'ємних концентрацій повітряних аерозолів і сухих випадін  $^{137}\text{Cs}$  для різних населених пунктів, а також прогнози з терміном передбачення п'ять років. Серед головних результатів цього періоду були такі:

- визначення величини ймовірності вмісту радіоактивного забруднення в продукції рослинництва на території зі статистичними неоднорідностями забруднення (Методичні рекомендації, 2004 р.) [11];
- оцінка контрзаходів, спрямованих на зниження вмісту «чорнобильського»  $^{90}\text{Sr}$  у сільськогосподарській продукції, за накопиченням стабільного стронцію природного походження (Методичні рекомендації, 2004 р.) [12];
- методика визначення критичних екосистем та їх внеску в радіаційне навантаження на населення (Методичні рекомендації, 2006 р.) [13];

- принципи та методи виявлення екологічних і генетичних наслідків під час оцінки критичних екосистем (Методичні рекомендації, 2006 р.) [14];
- концепція радіоекологічного моніторингу забруднених територій сільськогосподарського виробництва Українського Полісся;
- картосхеми критичних територій п'яти забруднених областей Українського Полісся за 2000–2001 рр.;
- картосхеми забруднення продукції у районах і господарствах території Українського Полісся за 2001 р.;
- база даних радіоактивного забруднення агропродукції за 1998–2002 рр.;
- регламент моніторингу сільськогосподарської продукції та харчових продуктів Волинської, Житомирської, Київської, Рівненської, Чернігівської обл. на 2002–2005 рр.;
- оптимізація системи радіоекологічного моніторингу Чернігівської обл. (2002 р.).

У 2006 р. науковий колектив лабораторії радіоекологічного моніторингу поповнилася новими спеціалістами. Кожен із них проявляв неабияку ініціативу в розбудові лабораторії, а згодом і відділу. У наступні роки колектив зріс завдяки молодим науковцям, які продовжили справу попередніх поколінь. У 2008 р. лабораторію очолив д-р біол. наук, проф. Г.М. Чоботько. Того самого року штат радіоекологів поповнив д-р біол. наук, проф. В.А. Гайченко. Загалом, у лабораторії тоді працювали чотири доктори і два кандидати наук. У цей період посаду директора з наукової роботи обіймав спеціаліст із лісової радіоекології канд. с.-г. наук М.Д. Кучма, що сприяло посиленню розвитку дослідження радіоекології лісу. В 2008 р. було розроблено рекомендації з ведення лісового господарства в умовах радіоактивного забруднення територій [15]. У розробці були чітко окреслені закономірності міграції  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у лісових екосистемах Українського Полісся, головних типів умов місцезростання, інтенсивності акумуляції  $^{137}\text{Cs}$  продукцією лісового господарства, особливостей проведення лісівницьких заходів залежно від



рівня радіоактивного забруднення. Крім того, було досліджено радіоактивне забруднення компонентів лісових екосистем, а також проаналізовано нормативні документи з ведення лісового господарства у радіоактивно забруднених лісах. Упродовж 2006–2010 рр. було удосконалено наукові засади технологій виробництва екологічно безпечної сільськогосподарської продукції на радіоактивно забруднених землях [16] і підготовлено методичні рекомендації з поліпшення радіаційної ситуації та технології виробництва екологічно безпечної продукції.

У віддалений період ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи соціально-економічні чинники за впливом на реабілітаційні процеси почали відігравати майже однакову роль поряд із радіаційним чинником. Радіоекологічна ситуація у населених пунктах забруднених територій ускладнилася внаслідок погіршення економічного стану. Великі сільськогосподарські підприємства, де раніше проводився повний комплекс агротехнічних контрзаходів, було ліквідовано, і основний обсяг виробництва сільськогосподарської продукції перемістився у присадибні господарства. У процесі розпаювання земель населенню були виділені бідні дерново-підзолисті і торфові ґрунти. Крім того, повне припинення проведення контрзаходів спричинило зниження рівня родючості землі і, як наслідок, до підвищення коефіцієнтів переходу  $^{137}\text{Cs}$  у рослини. Всі ці чинники викликали необхідність оптимізації структури угідь на радіоактивно забруднених територіях з урахуванням міжнародних зобов'язань України щодо впровадження принципів збалансованого розвитку, що і визначило мету подальших наукових досліджень лабораторії. Впродовж 2011–2013 рр. колектив підрозділу працював над розробленням контрзаходів для різних видів господарювання в умовах радіоактивного забруднення з урахуванням сучасних тенденцій розвитку природно-господарського комплексу та нових економічних умов на засадах ландшафтно-екологічного підходу [17–19]. За результатами

роботи було підготовлено низку методичних рекомендацій із ведення лісового господарства та сільськогосподарського виробництва на радіоактивно забруднених землях [20], проєкт Концепції загальнодержавної науково-виробничої програми ведення сільськогосподарського виробництва на радіоактивно-забрудненій території, її комплексного відродження та розвитку. За співпраці з Чорнобильською комісією ПРООН було розроблено інформаційні матеріали для населення щодо можливості використання продуктів лісу в умовах радіоактивного забруднення.

Відділ радіоекології в агросфері як окремий структурний підрозділ Інституту агроєкології і природокористування НААН було створено в 2013 р. під керівництвом канд. с.-г. наук Дутова О.І. Така назва відділу зумовлена не лише удосконаленням системи реабілітаційних заходів та визначенням пріоритетних напрямів господарської діяльності на радіоактивно забруднених територіях у контексті особливостей критичних екосистем у віддалений період після аварії на Чорнобильській АЕС, але й стратегію розвитку екосистемних послуг із урахуванням їх економічних та соціальних аспектів. Основний напрям досліджень — комплексна оцінка радіологічного стану агроландшафтів для розроблення наукових основ використання сільськогосподарських угідь, що зазнали радіоактивного забруднення [21; 22]. Відділ спеціалізувався на проведенні радіоекологічного моніторингу об'єктів навколишнього природного середовища, дозиметричних досліджень населення радіоактивно забруднених регіонів та на розробленні науково-методичних, організаційних засад використання і охорони екосистем радіоактивно забруднених територій, їх гармонізації з міжнародними стандартами. У період з 2013 по 2022 рр. здійснено зонування території Українського Полісся відповідно до класифікації агроландшафтів за виносом радіонуклідів з продукцією, визначено стратегію розвитку екосистемних послуг і запропоновано попередній перелік показників, які враховують економічні та соціальні аспекти,

властиві досліджуваному регіону. Також розроблено низку методичних рекомендацій стосовно реабілітації територій, що зазнали радіоактивного забруднення, та оптимізації структури землекористування на основі ландшафтних підходів [23] і відновлення агроекологічних функцій радіоактивно забруднених ґрунтів [24]. Для цього опрацьовано методичні засади, нормативну базу і сучасні методи радіоекологічного моніторингу [25].

Згодом відділ розширив сферу наукових інтересів, оскільки до його складу увійшла лабораторія аерокосмічного зондування агросфери. Результатом такої співпраці стало розроблення методу комплексного радіоекологічного картування [26]. Водночас за використання сучасних методів математичного моделювання (нейронні мережі) було розроблено модель формування дози внутрішнього опромінення населення з відповідним програмним забезпеченням [27]. Виконання Україною міжнародних кліматичних зобов'язань і угод зі збалансованого розвитку спонукало розглядати радіоекологічні питання в комплексі з іншими — соціальними, економічними, медичними та іншими складовими [28–31].

У 2022 р. повномасштабна військова агресія Росії проти України відкрила нову сторінку як для української, так і для світової радіоекологічної науки, піднявши розуміння ядерного тероризму на новий рівень та увівши в обіг поняття екоциду. Саме цим загрозам і їх наслідками нині присвячена робота вчених-радіоекологів Інституту радіоекології і природокористування НААН [32].

## ВИСНОВКИ

Аварія на Чорнобильській АЕС розпочала якісно нову віху в українській радіоекологічній науці, і спеціалісти ІАП НААН внесли вагомий внесок у розвиток останньої. За період свого існування колектив радіоекологів Інституту систематизував значні обсяги інформації. Було створено фундаментальні бази даних радіоактивного забруднення складових довкілля (ґрунтів, повітря, поверхневих вод, сіль-

ськогосподарської продукції) та дозового навантаження на населення. На основі цих даних фахівці відділу склали детальні карти радіоактивного забруднення території Українського Полісся, радіологічно критичних екосистем, винесення радіонуклідів із продукцією тощо.

Було удосконалено науково-методичні засади радіаційного моніторингу і радіаційного контролю сільськогосподарської та лісової продукції у віддалений період після аварії на Чорнобильській АЕС, розроблено засади екологічно збалансованого відродження і розвитку господарської діяльності радіоактивно забруднених територій, зокрема з урахуванням міжнародних зобов'язань нашої держави, як-от Європейський зелений курс.

Під час багаторічних досліджень науковці застосовували і продовжують застосовувати новітні методи досліджень, як-от математичне моделювання та дистанційне зондування землі, що дало змогу отримати результати міждисциплінарного характеру — прогнози математичні моделі міграції радіонуклідів і формування дози внутрішнього опромінення населення, комплексні радіоекологічні карти території тощо.

Одержані результати досліджень були використані під час розробки низки документів щодо організації ведення сільськогосподарського виробництва й лісового господарства на радіоактивно забруднених територіях та комплексного відродження регіону Українського Полісся.

Участь вчених Інституту агроекології і природокористування НААН у ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС дала змогу виконати досить складне і відповідальне завдання — визначити масштаби та виявити особливості радіаційного забруднення території, оцінити і спрогнозувати їх наслідки, а також допомогти організувати ведення сільськогосподарського виробництва в умовах радіоактивного забруднення та реабілітацію постраждалих територій.

Російська військова агресія дала новий поштовх і нові напрями радіоекологічним дослідженням в Україні і світі. Ядерний

тероризм на різних рівнях і різного походження стимулює радіоекологічну науку до якісного розвитку — від фіксації, оцінки й ліквідації збитків до комплексного бага-

товекторного розв'язання проблеми, прогнозу і управління радіаційними ризиками та коригування юридично-світоглядних аспектів цієї проблематики.

## ЛІТЕРАТУРА

- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INES: The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual, Non-serial Publications. IAEA, Vienna. (2013). 218 p. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/INES2013web.pdf>.
- Булигін С.Ю., Фурдичко О.І., Бондар О.І., Дутов О.І. Визначення критичності агропродукції в землеробстві радіоактивно забруднених регіонів. *Вісник аграрної науки*. 2013. № 1. С. 55–58.
- Славова Т.В. Внесок академіка Прістера Б.С. в становлення та розвиток сільськогосподарської радіоекології. *Історія науки на межі тисячоліть*: зб. наук. пр. 2003. Вип. 13. С. 157–165.
- Славова Т.В. Внесок вчених України в розвиток сільськогосподарської радіоекології після аварії на Чорнобильській АЕС (1986–2003 рр.). *Актуальні проблеми аграрної науки та освіти України: регіональний аспект*: матеріали II наук.-практ. семінару УААН. Київ, 2003. С. 52–54.
- Гірій В.А., Заїтов В.Р., Онишук В.А., Яковець І.І. «ЕКОМОДЕЛЬ»: динамічна модель для радіоекологічної ситуації. *Агроекологія і біотехнологія*. 1999. Вип. 3. С. 25–34.
- Славова Т.В. Історичні передумови виникнення і розвитку сільськогосподарської радіоекології в Україні, як складової радіобіології: *матеріали Другої конференції молодих вчених та спеціалістів* (м. Київ, 27–28 трав. 2004 р.). Київ, 2004. С. 196–199.
- Яковець І.І., Гірій В.А., Онишук В.А., Шпінар Л.І. Результати динамічного моделювання радіоекологічної обстановки в Українському Поліссі і порівняння їх з даними вимірювань. *Агроекологічний журнал*. 2001. Вип. 2. С. 62–67.
- Яковець І.І., Гірій В.А., Заїтов В.Р., Онишук В.А. Екомодель — динамічна модель для оцінки радіоекологічної ситуації. *Агроекологія і біотехнологія*. 1999. Вип. 3. С. 25–34.
- Лев Т.Д. и др. Создание карт ожидаемого загрязнения сельхозпродукции с использованием ГИС ArcInfo. *Геоинформационные системы и технологии — 1996*: II Укр. конф. (г. Киев, 14–17 октяб. 1996 г.). Киев, 1998. С. 3–11.
- Протас Н.М., Шпінар Л.І., Яковець І.І. Механізми, контролюючі міграцію радіонуклідів в системі ґрунт — рослина. *Агроекологічний журнал*. 2004. № 2. С. 67–72.
- Яковець І.І., Тарасенко Р.О., Протас Н.М. Модель міграції радіонуклідів в системі ґрунт — рослина. *Науковий вісник НАУ*. 2004. Вип. 77. С. 80–93.
- Яковець І.І., Прокопенко Л.А., Протас Н.М., Перетятко Є.Є. Визначення величини ймовірності вмісту радіоактивного забруднення в рослинницькій продукції на території зі статистичними неоднорідностями забруднення: метод. реком. Київ: РПВ ПДАА, 2004. 22 с.
- Шинкаренко В.К. та ін. Оцінка контрзаходів, спрямованих на зниження вмісту чорнобильського  $^{90}\text{Sr}$  у сільськогосподарській продукції, за накопиченням стабільного стронцію природного походження: метод. реком. Київ: ІАБ, 2004. 29 с.
- Яковець І.І. та ін. Методика визначення критичних екосистем і їх вкладу в радіаційне навантаження на населення: метод. реком. Київ, 2006. 39 с.
- Яковець І.І. та ін. Принципи та методи виявлення екологічних наслідків при оцінці критичних екосистем: метод. реком. Київ, 2006. 39 с.
- Фурдичко О.І. та ін. Рекомендації з ведення лісового господарства в умовах радіоактивного забруднення територій / за заг. ред. О.І. Фурдичка. Київ, 2008. 104 с.
- Дутов О.І. Екологічні аспекти використання сільськогосподарських угідь, забруднених внаслідок Чорнобильської катастрофи для виробництва сільськогосподарської продукції. *Аерохімія і ґрунтознавство: міжвідомчий тематичний науковий збірник ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського»*. 2007. Вип. 67. С. 136–141.
- Дутов О.І., Замула Х.П. Радіаційно-екологічні аспекти виробництва сільськогосподарської сировини в регіонах, забруднених внаслідок Чорнобильської катастрофи. *Агроекологічний журнал*. 2012. № 1. С. 35–41.
- Краснов В.П., Ландін В.П. Методологічні основи реабілітації лісових екосистем забруднених радіонуклідами. *Збалансоване природокористування*. 2013. № 2–3. С. 33–39.
- Ландін В.П. Емпіричні засади методології реабілітації радіоактивно забруднених земель. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. 2013. № 23. (10). С. 80–87.
- Фурдичко О.І. та ін. Методичні рекомендації з ведення сільськогосподарського виробництва на радіоактивно забруднених територіях Київського Полісся. Київ, 2012. 36 с.
- Булигін С.Ю., Прістер Б.С., Фурдичко О.І., Дутов О.І. Щодо програми безпечного ведення сільськогосподарського виробництва на територіях, забруднених радіонуклідами внаслідок Чорнобильської катастрофи. *Вісник аграрної науки*. 2012. № 5. С. 53–57.
- Фурдичко О.І. та ін. Методичні рекомендації з реабілітації територій, що зазнали радіоактив-



- ного забруднення, та оптимізації структури землекористування на основі ландшафтних підходів. Київ, 2013. 37 с.
24. Ландін В.П. та ін. Методичні рекомендації щодо заходів з реабілітації критичних екосистем радіоактивно забруднених регіонів Українського Полісся. Київ, 2015. 30 с.
  25. Гудков І.М. та ін. Методичні засади, нормативна база та сучасні методи радіоекологічного моніторингу забруднених радіоактивними речовинами територій. Київ, 2013. 37 с.
  26. Raichuk L.A. and Kuchma T.L. Complex radioecological-landscape mapping as an element of post-war recovery of Polissia of Ukraine. *Перспективи розвитку геоінформаційних технологій в умовах змін клімату*: зб. матеріалів Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Одеса, 20 квіт. 2023 р.). Одеса: Олді+, 2023. С. 164–168.
  27. Райчук Л.А. Моделювання дози внутрішнього опромінення як інтегрального показника радіоекологічної критичності території. *Збалансоване природокористування*: традиції, перспективи та інновації. Част. 2: мат. Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 17–18 трав. 2023 р.). Київ, 2023. С. 105–107.
  28. Чоботько Г.М., Райчук Л.А., Кучма Т.Л., Швиденко І.К. Деякі аспекти повернення в сільгосп-використання виведених з обігу забруднених радіонуклідами земель Полісся України. *Агро-екологічний журнал*. 2023. № 2. С. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2023.283696>.
  29. Райчук Л.А., Дем'янюк О.С., Коніщук В.В., Гордиська І.М. Соціально-економічні передумови сталого розвитку радіоактивно забруднених територій Українського Полісся. *Збалансоване природокористування*. 2023. № 1. С. 66–73. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2023.278541>.
  30. Дребот О.І., Дем'янюк О.С., Райчук Л.А. Науково-методичні засади реабілітації радіоактивно забруднених агроландшафтів у контексті Зеленої економіки. *Вісник аграрної науки*. 2022. Т. 100. № 2 (827). С. 74–81. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovissnyk202202-10>.
  31. Чоботько Г.М., Райчук Л.А., Швиденко І.К., Уманський М.С. Концепція управління радіоактивно забрудненими агроландшафтами Українського Полісся в контексті «зеленої» економіки (проект). Київ: ДІА, 2023. 24 с.
  32. Чоботько Г.М., Райчук Л.А., Швиденко І.К., Кучма М.Д., Височанська М.Я. Російсько-українська війна як чинник світової продовольчої кризи. *Збалансоване природокористування*. 2022. № 1. С. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2022.255224>.

## REFERENCES

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INES: The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual, Non-serial Publications, IAEA, Vienna (2013). 218 p. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/INES2013web.pdf> [in English].
2. Bulygin, S.Y., Furdychko, O.I., Bondar, A.I. & Dutoy, O.I. (2013). Vyznachennja krytychnosti agroprodukcii' v zemlerobstvi radioaktyvno zabrudnennyh regioniv [Identification of agricultural products criticality at farming on radioactively contaminated areas]. *Visnyk agrarnoi' nauky — News of agrarian science*, 1, 55–58 [in Ukrainian].
3. Slavova, T.V. (2003). Vnesok akademika Pristera B.S. v stanovlennja ta rozvytok sil's'kogospodars'koi' radioekologii' [Contribution of Academician Priester B.S. in agricultural radioecology formation and development]. *Istorija nauky na mezhi tysjacholit'*: Zb. nauk. pr. — *The history of science at the turn of the millennium: Scientific Papers*, 13, 157–165 [in Ukrainian].
4. Slavova, T.V. (2003). Vnesok vchenyh Ukrai'ny v rozvytok sil's'kogospodars'koi' radioekologii' pislja avarii' na Chornobyl's'kij AES (1986–2003 rr.) [The contribution of scientists in Ukraine in agricultural radioecology development after the Chernobyl accident (1986–2003 years)]. *Aktual'ni problemy ahrarnoyi nauky ta osvity Ukrayiny: rehional'nyy aspekt: materialy II naukovo-praktychnoho seminaru UAAN [Actual problems of agricultural science and education of Ukraine: regional aspect: materials of the 2<sup>nd</sup> scientific and practical seminar of the Ukrainian Academy of Sciences]*. (pp. 52–54). Kyiv [in Ukrainian].
5. Hiri, V.A., Zaytov, V.R., Onyshchuk, V.A. & Yaskovets, I.I. (1999). «EKOMODEL»: dynamiczna model dlya radioekologichnoyi situatsiyi [«EKOMODEL»: dynamic model for radioecological situation]. *Ahroekolohiya i biotekhnolohiya — Agroecology and biotechnology*, 3, 25–34 [in Ukrainian].
6. Slavova, T.V. (2004). Istorychni peredumovy vynyknennja i rozvytku sil's'kogospodars'koi' radioekologii' v Ukrai'ni, jak skladovoi' radiobiologii' [Historical background of agricultural radioecology development in Ukraine as a component of radiobiology]. *II konferenciya molodyh vchenyh ta specialistiv [2<sup>nd</sup> Conference of Young Scientists and Specialists]*. (pp. 196–199). Kyiv [in Ukrainian].
7. Yaskovets, I.I., Hyryy, V.A., Onischuk, V.A. & Shpyr, L.I. (2001). Rezul'taty dinamicheskogo modelirovaniya radiojekologicheskoy obstanovki v Ukrainskom Poles'e i sravnenie ih s dannymi izmerenij [Results of the radioecological situation dynamic modeling in Ukrainian Polesye and their comparison with measurement data]. *Ahroekolohichnyi zhurnal — Agroecological Journal*, 2, 62–67 [in Ukrainian].
8. Yaskovets, I.I., Hiri, V.A., Zaytov, V.R. & Onischuk, V.A. (1999). Ekomodol' — dynamiczna model' dlja ocinky radioekologichnoyi situatsiyi [Ekomodol' — the dynamic model for assessing the radiological situation]. *Ahroekolohiya i biotekhnolohiya — Agroecology and biotechnology*, 3, 25–34 [in Ukrainian].

9. Lev, T.D. et al. (1998). Sozhanie kart ozhidaemogo zagriznennija sel'hozprodukcii s ispol'zovanjem GIS ArcInfo [Creation of agricultural products expected contamination maps using GIS ArcInfo]. *Geoinformatsionnyye sistemy i tekhnologii — 1996: II ukrain-skaya konferentsiya [Geoinformation systems and technologies — 1996: II Ukrainian conference]*. (pp. 3–11). Kyiv [in Russian].
10. Protas, N.M., Shpynar, L.I. & Yaskovets, I.I. (2004). Mehanizmy, kontrolirujushhie migraciju radionuklidov v sisteme pochva-rastenie [Mechanisms controlling the radionuclides migration in the soil-plant system]. *Ahroekologichnyi zhurnal — Agroecological Journal*, 2, 67–72 [in Russian].
11. Yaskovets, I.I., Tarasenko, P.O. & Protas, N.M. (2004). Model' migracii' radionuklidiv v systemi g'runto-roslyna [Model of radionuclide migration in soil-plant system]. *Naukovyj Visnyk NAU — Scientific News of NAU*, 77, 80–93 [in Ukrainian].
12. Yaskovets, I.I., Prokopenko, L.A., Protas, N.M. & Peretyatko, E.E. (2004). *Vyznachennja velychyny jmovirnosti vmistu radioaktyvnoho zabrudnennja v roslynnyc'kij produkcii' na terytorii' zi statystychnymy neodnorodnostjamy zabrudnennja: metodychni rekomendacii' [Determination of the probability of the radioactive contamination amount in crop production on the territory of pollution statistical heterogeneities: guidelines]*. Kyiv: RPV PDAA [in Ukrainian].
13. Shinkarenko, V.K. et al. (2004). *Ocinka kontrzahodiv, sprjamovanyh na znyzhennja vmistu chornobyl's'kogo <sup>90</sup>Sr u sil's'kogospodars'kij produkcii', za nakopychennjam stabil'nogo stronciju pryrodnoho pohodzhennja: metodychni rekomendacii' [Assessment of countermeasures directed to reduce the Chernobyl <sup>90</sup>Sr content in agricultural products by the accumulation of stable strontium of natural origin: guidelines]*. Kyiv: PSA [in Ukrainian].
14. Yaskovets, I. et al. (2006). *Metodyka vyznachennja krytychnyh ekosystem i i'h vkladu v radiacijne navantazhennja na naselennja: metodychni rekomendacii' [Method of determining the critical ecosystems and their contribution to radiation exposure of the population: guidelines]*. Kyiv [in Ukrainian].
15. Yaskovets, I. et al. (2006). *Pryncypy ta metody vyjavlennja ekologichnyh naslidkiv pry ocinci krytychnyh ekosystem: metodychni rekomendacii' [Principles and methods for the environmental consequences detecting when assessing the critical ecosystems: guidelines]*. Kyiv [in Ukrainian].
16. Furdychko, O.I. et al. (2008). *Rekomendacii' z vedennja lisovogo gospodarstva v umovah radioaktyvnoho zabrudnennja terytorij [Recommendations on forest management in conditions of radioactive contamination of territories]*. Kyiv [in Ukrainian].
17. Dutov, A.I. (2007). *Ekologichni aspekty vykorystannja sil's'kogospodars'kyh ugid', zabrudnennyh vnaslidok Chornobyl's'koi' katastrofy dlja vyrobnytstva sil's'kogospodars'koi' produkcii' [Environmental aspects of use of contaminated by the Chernobyl disaster agricultural lands for agricultural production]. Agrohimiya i g'runtoznavstvo: mizhvidomchij tematychnyj naukovyj zbirnyk NNC «IGA im. O.N. Sokolov's'kogo» — Agricultural Chemistry and Soil Science: interdepartmental themed scientific collection of NSC «ISSAR them. Sokolovsky O.N.»*, 67, 136–141 [in Ukrainian].
18. Dutov, A.I. & Zamula, H.P. (2012). *Radiacijno-ekologichni aspekty vyrobnytstva sil's'kogospodars'koi' syrovovny v regionah, zabrudnennyh vnaslidok Chornobyl's'koi' katastrofy [Radiation and environmental aspects of agricultural raw materials production in areas contaminated by the Chernobyl disaster]. Ahroekologichnyi zhurnal — Agroecological Journal*, 1, 35–41 [in Ukrainian].
19. Krasnov, V.P. & Landin, V.P. (2013). *Metodologichni osnovy reabilitacii' lisovyh ekosystem zabrudnennyh radionuklidamy [Methodological bases of rehabilitation of forest ecosystems contaminated by radionuclides]. Zbalansovane pryrodokorystuvannja — Balanced nature using*, 2 (3), 33–39 [in Ukrainian].
20. Landin, V.P. (2013). *Empirychni zasady metodologii' reabilitacii' radioaktyvno zabrudnennyh zemel' [Empirical principles of radioactively contaminated lands rehabilitation methodology]. Naukovyj visnyk Nacional'nogo lisotehnicznego universytetu Ukrainy — Scientific Bulletin of National Forestry University of Ukraine*, 23.10, 80–87 [in Ukrainian].
21. Furdychko, O.I. et al. (2012). *Metodychni rekomendacii' z vedennja sil's'kogospodars'kogo vyrobnytstva na radioaktyvno zabrudnennyh terytorijah Kyi'vs'kogo Polissja [Guidelines for conducting agricultural business at the radioactively contaminated areas of Kyiv Polissya]*. Kyiv [in Ukrainian].
22. Bulygin, S.Y., Priester, B.S., Furdychko, O.I. & Dutov, O.I. (2012). *Shhodo programy bezpechnogo vedennja sil's'kogospodars'kogo vyrobnytstva na terytorijah, zabrudnennyh radionuklidamy vnaslidok Chornobyl's'koi' katastrofy [Regarding the program of safe agricultural production in areas contaminated with radionuclides by the Chernobyl disaster]. Visnyk agrarnoi' nauky — News of agrarian science*, 5, 53–57 [in Ukrainian].
23. Furdychko, O.I. et al. (2013). *Metodychni rekomendacii' z reabilitacii' terytorij, shho zaznaly radioaktyvnoho zabrudnennja, ta optymizacii' struktury zemlekorystuvannja na osnovi landshajfnyh pidhodiv [Guidelines for the rehabilitation of areas affected from radioactive contamination and optimize the structure of land tenure based on landscape approaches]*. Kyiv [in Ukrainian].
24. Landin, V.P. et al. (2015). *Metodychni rekomendacii' shhodo zahodiv z reabilitacii' krytychnyh ekosystem radioaktyvno zabrudnennyh regioniv Ukrain's'kogo Polissja [Guidelines for management of rehabilitation of critical ecosystems of Ukrainian Polissya radioactively contaminated regions]*. Kyiv [in Ukrainian].
25. Gudkov, I. et al. (2013). *Metodychni zasady, normatyvna baza ta suchasni metody radioekologichnogo monitoringu zabrudnennyh radioaktyvnymy rehovynamy terytorij [Method principles, regulatory framework and modern methods of radioecological monitoring of territories contaminated by radioactive substances]*. Kyiv [in Ukrainian].
26. Raichuk, L.A. & Kuchma, T.L. (2023). *Complex radioecological-landscape mapping as an element of*

- post-war recovery of Polissia of Ukraine. *Perspektyvy rozvytku heoinformatsiynykh tekhnolohiy v umovakh zmin klimatu: zbirnyk materialiv Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi*. (pp. 164–168). Odessa [in English].
27. Raichuk, L.A. (2023). Modeliuvannya dozy vnutrishnoho oprominennia yak intehralnoho pokaznyka radioekolohichnoyi krytychnosti terytorii [Modeling internal radiation dose as an integral indicator of radioecological territory criticality]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia: tradytsii, perspektyvy ta innovatsii. Materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi [Balanced use of nature: traditions, perspectives and innovations: materials International scientific and practical conference]*. (pp. 105–107). Kyiv [in Ukrainian].
28. Chobotko, H.M., Raichuk, L.A., Kuchma, T.L. & Shvydenko, I.K. (2023). Deiaki aspekty povtorennia v silhospvikorystannia vyvedenykh z obihu zabrudnenykh radionuklidamy zemel Polissia Ukrainy [Some aspects of returning land contaminated with radionuclides withdrawn from circulation to agricultural use in the Polissia region of Ukraine]. *Aghroekolohichnyy zhurnal — Agroecological journal*, 2, 47–55. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2023.283696> [in Ukrainian].
29. Raichuk, L.A., Demyanyuk, O.S., Konishchuk, V.V. & Horodyska, I.M. (2023). Sotsial'no-ekonomichni peredumovy staloho rozvytku radioaktivno zabrudnenykh terytorii Ukrayinskoho Polissya [Social and economic prerequisites for sustainable development of radioactively contaminated territories of Ukrainian Polissya]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia — Balanced Nature Management*, 1, 66–73. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2023.278541> [in Ukrainian].
30. Drebot, O.I., Demyanyuk, O.S. & Raichuk, L.A. (2022). Naukovo-metodychni zasady reabilitatsii radioaktyvno zabrudnenykh agrolandshaftiv u konteksti Zelenoyi ekonomiky [Scientific-methodological principles of rehabilitation of radioactively contaminated agrolandscapes in the context of Green Economy]. *Visnyk ahrarnoyi nauky — Bulletin of Agricultural Science*, 100, 2 (827), 74–81. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202202-10> [in Ukrainian].
31. Chobotko, H.M., Raichuk, L.A., Shvydenko, I.K. & Umanskyi, M.S. (2023). *Kontsepsiya upravlinnia radioaktyvno zabrudnenymy agrolandshaftamy Ukrayinskoho Polissya v konteksti «zelenoyi» ekonomiky (proyekt) [Concept of managing radioactively contaminated agrolandscapes of Ukrainian Polissya in the context of «green» economy (project)]*. Kyiv [in Ukrainian].
32. Chobotko, H.M., Raichuk, L.A., Shvydenko, I.K., Kuchma, M.D. & Vysochanska, M.Ya. (2022). Rosiysko-ukrainska viyna yak chynnyk svitovoyi prodovolchoyi kryzy [The Russo-Ukrainian War as a factor of the global food crisis]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia — Balanced Nature Management*, 1, 12–20. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2022.255224> [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції журналу 26.04.2024

---