

Р е ф е р а т

Оцінка екологічних наслідків радіаційних аварій з метою формування та реалізації стратегії ремедіації забруднених радіонуклідами територій (екологія)

Автори: І.М. Гудков, Л.Д. Романчук, Н.М. Жданова, Т.І. Тугай,
Ю.В. Хомутинін, М.М. Лазарєв, С.Є. Левчук, В.П. Процак,

За 33 роки, що пройшли з часу аварії на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС), радіаційна обстановка в Україні покращилася за рахунок природних процесів: фізичного розпаду радіонуклідів, їх біодеструкції, заглибленню і зв'язуванню у ґрунті, змиву з площ водозборів, виносу з сільськогосподарською продукцією. Важливу роль у процесах зменшення інтенсивності міграційних процесів радіонуклідів в об'єктах навколошнього середовища, і в першу чергу гальмуванню їх переходу з ґрунту в рослини, відіграють застосування радіозахисних прийомів – контрзаходів у сільському, водному господарствах та харчовій промисловості. Найактуальнішою проблемою сучасної вітчизняної радіоекології є ремедіація територій, виведених з господарського користування після аварії та їх повертання до використання та розробка стратегії виробництва продукції рослинництва і тваринництва з мінімальним вмістом радіоактивних речовин.

Напрям представленого циклу робіт є постійно актуальним, а розроблені авторами фундаментальні підходи і створені на їх основі системи радіозахисних прийомів у рослинництві і тваринництві мають незаперечну соціальну і, відповідно економічну цінність на радіоактивно забруднених територіях в Україні.

Поданий на конкурс зі здобуття державної премії України в галузі науки і техніки цикл наукових праць охоплює дослідницькі, а також аналітичні і теоретичні роботи авторів більш як за тридцять останніх років. Вони дозволяють оцінити екологічні наслідки аварії: у динаміці прослідкувати за змінами у біоценозах, визначити ефективність радіозахисних заходів, в цілому

радіаційну ситуацію на забруднених територіях, і, зрештою, прийти до висновків щодо розробки стратегії повертання цих територій до використання.

Роботи циклу виконані колективом авторів Національного університету біоресурсів і природокористування України (УкрНДІ сільськогосподарської радіології і кафедра радіобіології та радіоекології), Інституту мікробіології та вірусології ім. Д.К Заболотного НАН України, Житомирського національного агроекологічного університету.

В представленому проекті наведено обґрунтування основних напрямів досліджень, методичні розробки, їх верифікація та практичне застосування засобів і методів моніторингу. На основі отриманих результатів оцінено інтегральний запас радіонуклідів паливної компоненти чорнобильського викиду у довкіллі, як в 30-км зоні ЧАЕС так і за її межами. Проведена оцінка величини викиду ядерного палива за межі промислового майданчика ЧАЕС, яка склала $1,5 \pm 0,5\%$, що у два рази нижче попередніх оцінок.

Оцінка перерозподілу радіоактивності в забруднених радіонуклідами екосистемах свідчить, що фізико-хімічні форми випадінь аварійного викиду у значній мірі визначають багаторічну динаміку міграції радіонуклідів у ґрунтово-рослинному покриві екосистем, зокрема, закономірності поведінки ^{137}Cs мало відрізняються від вивчених у дочорнобильській період. Зниження з часом міграційної рухомості ^{137}Cs у ґрунтах на паливних слідах випадінь, визначається у першу чергу значним і швидким зниженням пулу мобільних форм радіонукліду (у перші роки після випадінь $T_{\text{іммоб}}$ складало 0,8–2,8 роки).

Система спеціальних вимірювань дозволила оцінити внесок радіоактивних частинок різного розміру у величину загальної об'ємної активності ^{137}Cs , концентрацію аерозольних паливних частинок на промплощадці ЧАЕС, ступінь небезпеки процесів вітрового підняття в умовах Українського Полісся (міста Чорнобиль, Прип'ять, Коростень, Київ, Чернігів), а також рекомендувати розміри буферних зон між населеними пунктами і забрудненими територіями, зокрема сільськогосподарськими угіддями.

Динаміка міграції ^{90}Sr у ґрунтах та його включення у біогеохімічні ланцюги міграції на паливних слідах випадінь викиду була принципово іншою порівняно з відомими радіаційними аваріями, зокрема з Киштимською.

На паливних слідах випадінь протягом перших 5–20 років відмічено зростання мобільності ^{90}Sr , що визначається як найменше двома факторами: деструкцією паливних частинок, у котрих радіонуклід був депонований під час випадінь, і повільним зниженням з часомпулу мобільних форм ^{90}Sr ($T_{\text{іммоб}} = 25$ – 55 років).

Проведена комплексна оцінка радіоактивного забруднення водозбору р. Прип'ять, яка показала, що основним джерелом її забруднення довгоживучими радіонуклідами є зона відчуження. Рівні забруднення ТУЕ північно-західної частини України є досить низькими, а самі радіонукліди характеризуються низькою мобільністю через їх фіксацією мінеральною частиною ґрунту.

Проведені дослідження міграції ТУЕ за межі тимчасових сховищ радіоактивних відходів, продемонстрували наявність досить рухливої фракції ізотопів плутонію, яка транспортувалася у верхньому водоносному шарі на десятки метрів від джерела протягом досить короткого періоду. Латеральна міграція ТУЕ відбувається переважно в шарі еолових відкладів, які характеризуються високою проникністю і низькою ємністю обмінних катіонів.

Впродовж активної фази аварії радіонукліди ^{144}Ce , ^{95}Nb , ^{95}Zr , ^{241}Am , ізотопи плутонію, європію, переважна кількість ^{90}Sr і ^{106}Ru надходили у навколошнє середовище виключно у вигляді дрібнодисперсних частинок ядерного палива і сформували паливні сліди радіоактивного забруднення. Присутність у випадіннях паливних часток є специфічною особливістю аварії на ЧАЕС.

Колективом авторів розроблена стратегія дослідження паливної компоненти у навколошньому середовищі, що є вкрай актуальними і дозволяє оцінити екологічні ризики, особливо в близькій зоні ЧАЕС, прогнозувати радіаційну ситуацію та оптимізувати контрзаходи. Вперше у польових умовах проведені довгострокові дослідження надходження $^{238,239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{137}Cs і ^{90}Sr .

з ґрунтів у сільськогосподарські культури. Отримана інформація є дуже важливою з точки зору потенційного опромінення населення в довгостроковій перспективі, зважаючи на їх дуже довгі періоди напіврозпаду.

Для широкого набору агротехнічних заходів (культивація, оранка, внесення добрив, посадка картоплі, збирання врожаю, рух автотранспорту по ґрунтових дорогах) експериментально отримані параметри пилопідйому та вторинного вітрового переносу радіоактивних речовин. Встановлено, що за нормальнích метеорологічних умов, навіть з урахуванням проведення звичайних сільськогосподарських робіт, вітровий перенос радіоактивних речовин на полях не перевищує 1% в рік від запасу на одиниці площи, а аеральне забруднення рослинності не перевищує 10% кореневого для типових дерново-підзолистих ґрунтів Полісся (за винятком початкової фази аварії). Встановлено, що коефіцієнти вторинного підйому радіонуклідів мають одинаковий порядок величини для лугових та лісових пожеж, якщо розраховувати їх по відношенню до забруднення паливного матеріалу, а основний радіологічний ефект пожеж у Чорнобильській зоні пов'язаний із забрудненням екосистем ТУЕ.

На основі проведених досліджень отримані параметри вторинного вітрового підйому радіоактивних аерозолів з осушених ділянок водойм 30-км зони ЧАЕС, які необхідні для математичного моделювання атмосферного переносу і оцінки ризику при осушенні водойми-охолоджувача ЧАЕС для виведення його з експлуатації. На осушених територіях не слід очікувати істотного підвищення мобільності радіонуклідів в найближчі 5–10 років.

Отримані результати дозволили визначити місце паливної компоненти у ряду інших радіаційних факторів, уточнити радіаційно-гігієнічні умови праці робітників та учасників пожежогасіння, довести відсутність істотного вторинного забруднення дезактивованих населених пунктів при веденні сільськогосподарських робіт, визначити радіаційну небезпеку вторинного підйому радіонуклідів, пов'язану з пожежами в зоні відчуження та з осушенням водойми-охолоджувача ЧАЕС.

Отримані результати для прогнозування радіологічної ситуації у разі інших радіаційних аварій з викидом радіонуклідів в складі матриці частинок ядерного палива.

Досліджений просторовий і вертикальний розподіл радіонуклідів у ґрунтах зони відчуження з високими рівнями радіонуклідного забруднення. Запропонована математична модель вертикальної міграції ^{90}Sr і ^{137}Cs у лучних та орних ґрунтах при їх випадіннях у різних фізико-хімічних формах. Використання такої моделі дозволяє оцінити параметри багаторічної динаміки вертикальної міграції цих ізотопів в ґрунтах певних ландшафтно-геохімічних зон. Окремої уваги заслуговує вивчення ролі мікробіоти у перерозподілі радіоактивності на забруднених територіях. Біомаса грибного міцелю навіть в перші роки після аварії становила 100–1000 кг/га. Результати 30-річного моніторингу мікроміцетів ґрунтів та лісової підстилки забруднених радіонуклідами територій і аварійного блоку ЧАЕС дозволило запропонувати новий екологічний показник – індекс техногенної меланізації ґрунтової грибної біоти. Останній свідчить про несприятливі умови довкілля.

Запропоновані міксоміцети, види-біоіндикатори високого, середнього та низького рівнів радіоактивного забруднення ґрунтів та лісової підстилки. Виявлено нові властивості мікроміцетів на рівні популяції, організму та молекулярному в умовах хронічного опромінення, які доповнюють уявлення щодо фундаментальних процесів їх адаптації, а також змін, що вони спричиняють у природі як важливий компонент біогеоценозу. Активності мікроміцетів – однієї з важливих первинних ланок трофічних ланцюгів, можуть бути основою для довгострокових прогнозів щодо формування нового біогеоценозу на забруднених радіонуклідами територіях.

Наукова новизна. Вперше в світі виявлено нове явище позитивний радіотропізм – направлений ріст грибного міцелю до джерела випромінювання («гарячі» частинки) з подальшою їх деструкцією. Висунута гіпотеза що одним з механізмів прояву радіотропізму у мікроміцетів є локальне утворення при дії опромінення пероксиду водню в наномолярних концентрації, який може

виступати у ролі можливого джерела живлення, градієнту електронів так і сигнальної молекули. Частота виявлення радіотропізму залежала від потужності експозиційної дози з максимумом у діапазоні 0,1–500 мР/год. Ряд ґрунтових грибів здатен обростати та руйнувати «гарячі» частинки та реакторний графіт.

Вперше в світі виявлено грибні спори в приміщенні 4 блоку ЧАЕС (56 видів), які залишились живими при надвисоких потужностях доз (блізько 20 Гр /добу) у продовж багатьох років.

Створено унікальну колекцію радіорезистентних грибних культур та таких з високою антиоксидантною активністю, яка може бути перспективною в біотехнологіях біоремедіації забруднених радіонуклідами територій, створенні біосорбентів радіонуклідів для застосування у різних галузях, включаючи медичну, фармацевтичну, косметичну.

Вперше в Україні були проведені у польових умовах довгострокові дослідження надходження $^{238,239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{137}Cs і ^{90}Sr з різних ґрунтів у сільськогосподарські культури. Отримана інформація щодо величин коефіцієнтів накопичення цих радіонуклідів є дуже важливою з точки зору потенційного опромінення населення в довгостроковій перспективі, зважаючи на їх дуже довгі періоди напіврозпаду.

Вперше в Україні проведена комплексна оцінка радіоактивного забруднення водозбору р. Прип'ять (українська частина), яка показала, що основним джерелом забруднення цієї ріки довгоживучими радіонуклідами є Зона відчуження. Рівні забруднення ТУЕ північно-західної частини України є досить низькими, а самі радіонукліди характеризуються низькою мобільністю через їх фіксацію мінеральною частиною ґрунту.

На особливу увагу заслуговує концепція модифікації рівнів радіонуклідного забруднення продукції рослинництва та тваринництва. Радіозахисні заходи – контрзаходи, дозволяють оцінити їх ефективність у різні поставарійні періоди.

Вперше запропонована і широко використана (на території 4 млн. га) система виробництва продукції рослинництва і тваринництва з мінімальним вмістом радіоактивних речовин. Вона являє собою комплекс радіозахисних заходів упродовж всього харчового ланцюжка на шляху до людини. Ця стратегія передбачає найактивніше втручання фахівців у всі ланки такого ланцюга: ґрунти–рослина, рослина (корми) – тварина, продукція рослинництва і тваринництва–людина з метою блокування переходу і накопичення радіонуклідів у кінцевому продукті. Чим на більш ранньому етапі цього переходу дане завдання буде вирішено, тим ефективнішим буде захист людини від дії іонізуючої радіації.

Ці положення покладено в основу теорії екобезпечного проживання населення на забруднених радіонуклідами територіях.

В перші години та наступні декілька тижнів після аварії найбільш небезпечним були радіоактивні ізотопи йоду, зокрема ^{131}I . Йодній небезпеці у гострий період розвитку аварії на ЧАЕС не було приділено першочергової уваги за об'єктивних і суб'єктивних причин. У першу чергу проводили захист населення шляхом евакуації населених пунктів для відвернення великих доз зовнішнього опромінення. Аліментарний шлях надходження радіоактивних ізотопів йоду, в основному з молоком корів, було проігноровано. Радіобіологічні медичні ефекти цього на сьогодні відомі усьому світу, випадки солідних раків щитоподібної залози серед дітей збільшилися у сто разів. Коректних первинних результатів щодо забруднення територій радіоактивними ізотопами йоду в Україні практично не залишилося і ретроспективна оцінка цих параметрів шляхом визначення відомого «довго живучого» трасера ізотопів йоду - ^{129}I є надзвичайно важлива для оцінок параметрів йодної небезпеки і, особливо оцінити шлях надходження радіоактивного йоду в організм людини з молоком корів. аварійних радіоактивних викидів була майже повністю

За визначенням вмісте ^{129}I у зразках ґрунту в 47 населених пунктах встановлено, що найвищий його вміст був в с. Володимирівці – 2060 мБк/м², с. Старому Шарно – 1281 мБк/м², м. Поліському – 748 мБк/м², Рудні Осошні –

748 мБк/м². У 12-ти населених пунктах вміст ¹²⁹I був в межах 12–578 мБк/м², в останніх 31 населеному пункті цей показник по ¹²⁹I становив від 44 до 120 мБк/м². Визначені параметри вмісту ¹²⁹I у ґрунті дозволили оцінити щільність забруднення пасовищі молока корів у таких поліських районах як Іванківський, Поліський, Народичський, Овручський, Коростенський, Лугинський. Даний напрямок досліджень продовжується.

У пізню фазу розвитку радіаційної аварії основна дозоутворючу роль належить радіоактивним ізотопам цезію і стронцію. Радіологічний контроль параметрів міграції ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr за трофічними ланцюгами від ґрунту до організму людей здійснювали з урахуванням характеру традиційного харчування мешканців Полісся шляхом індивідуального опитування та анкетування. Узагальнення одержаної інформації дозволило оцінити коректність віднесення населених пунктів північної частини Житомирщини до різних зон радіоактивного забруднення.

Існування ядерних технологій у країні неминуче призводить до формування певної кількості сховищ радіоактивних відходів і відпрацьованого ядерного палива. Контроль радіаційної ситуації навколо таких об'єктів спрямований на визначення небезпеки і параметрів трансформації у навколошньому середовищі над-довгоживучих радіонуклідів. Особливу роль серед них займають радіоактивні ізотопи селену, хлору і йоду як вкрай мобільних елементів у всіх середовищах, у тому числі біологічно значимих для людини. Отримано основні параметри для прогнозування радіоактивного забруднення сільськогосподарської продукції наддовгоживучими радіонуклідами при радіаційних аваріях. Визначені коефіцієнти транслокації для ізотопів йоду селену та хлору (основні дозоутворюючі наддовгоживучі) радіонукліди у віддалений період після радіаційних аварій) до основних сільськогосподарських культур. Останні можуть становити основний вклад в опромінення населення і мати певний соціально-економічний ефект.

Система запропонованих заходів дозволяє в багато разів зменшувати накопичення радіонуклідів сільськогосподарськими рослинами та продуктивними тваринами.

Навіть в ґрунтах зони безумовного відселення можна в більшості випадків одержувати продукцію, що відповідає вимогам радіаційної безпеки.

Завдяки цим заходам зменшення дози опромінення у декілька разів є цілком реальним завданням. При цьому найбільш ефективними вони є при систематичному застосуванні.

Розроблена концепція радіозахисного харчування - мінімізації надходження і накопичення радіонуклідів в організмі людини та зменшення дії радіації, яка базується на п'яти основних положеннях: обмеження надходження радіонуклідів з продуктами харчування, блокування процесів всмоктування радіонуклідів у шлунково-кишковому тракті та їх депонування в окремих органах, захист від опромінення радіонуклідів, прискорення виведення з організму інкорпорованих радіонуклідів і активація процесів післярадіаційного відновлення.

Узагальнені результати дослідження у сфері ремедіації забруднених радіонуклідами територій, можливості їх використання у різних сферах господарювання, є базою для оцінки соціально-економічної ефективності впровадження контрзаходів, що, по суті, являють собою систему послідовних радіаційно-біологічних технологій.

Цикл наукових праць, який виконувався авторами за понад 30-річний період, дозволяє підвищити вирогідність прогнозування розвитку ситуації щодо екологічних, а частково й інших (біологічних, медичних, демографічних, соціальних) віддалених наслідків аварії на ЧАЕС.

Результати, викладені у даному циклі наукових праць, дозволяють суттєво підвищити рівень готовності до реагування на великі радіаційні та ядерні аварії, забезпечити пріоритетність та підвищити оперативність контрзаходів як на початковий, так і на віддалених стадіях розвитку

радіаційних аварій, що має важливе не тільки господарське, але й загальнодержавне значення.

Цикл включає 240 публікацій, у т.ч. 7 монографій, 10 підручників та навчальних посібників, 220 статей (120 у зарубіжних виданнях). Згідно з базою даних Web of Science загальна кількість посилань на публікації авторів, що представлені в роботі, складає 817, згідно з базою даних Scopus – 1209, згідно з базою Google Scholar – 2324, h-індекс (за роботою) 21. За даною тематикою захищено 3 докторських та 8 кандидатських дисертацій. Деякі положення досліджень захищені 10-ю патентами і 3-ма авторськими свідоцтвами.

Практична реалізація робіт проявилася у розробці та впровадженні системи радіозахисних прийомів у рослинництві, тваринництві, первинній обробці та переробці продукції рослинництва і тваринництва. Зокрема, на забруднених радіонуклідами територіях було впроваджено понад сорок проектів адресного застосування радіозахисних заходів у критичних населених пунктах, до дозволило суттєво зменшити дози внутрішнього опромінення населення за рахунок споживання харчових продуктів місцевого походження.

Застосування розробленої експрес-методики оцінки щільності забруднення угідь радіоактивними ізотопами цезію дозволило за короткий час за значної економії сил і коштів (до 30% витрат на обстеження і ліквідацію наслідків Чорнобильської радіаційної катастрофи), здійснити суцільне радіоекологічне обстеження усіх господарств найбільш забруднених районів Київської, Житомирської, Чернігівської, Рівненської і Черкаської областей – разом понад 4 млн. га.

Автори:

І.М. Гудков

Л.Д. Романчук

Н.М. Жданова

Т.І. Тугай

Ю.В. Хомутінін

М.М. Лазарев

С.Є. Левчук

В.П. Процак