

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ОТРЕШКО ЛЮДМИЛА МИКОЛАЇВНА**

УДК 539.116 : 504.054 : 630\*8 : 63 – 027.3

**ЗАБРУДНЕННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТА ЛІСОВОЇ ПРОДУКЦІЇ  
<sup>90</sup>Sr В РЕГІОНАХ, ЯКІ ПОСТРАЖДАЛИ ВНАСЛІДОК ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ  
КАТАСТРОФИ**

03.00.01 – радіобіологія

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата біологічних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Українському науково-дослідному інституті сільськогосподарської радіології Національного університету біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник** доктор біологічних наук, професор,  
**Кашпаров Валерій Олександрович**,  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України,  
директор Українського науково-дослідного  
інституту сільськогосподарської радіології

**Офіційні опоненти:** доктор біологічних наук, старший науковий співробітник  
**Перепелятніков Георгій Петрович**,  
Український науково-дослідний інститут  
цивільного захисту Державної служби України  
з надзвичайних ситуацій,  
головний науковий співробітник Науково-дослідного  
центру заходів цивільного захисту

кандидат сільськогосподарських наук, доцент  
**Фещенко Володимир Петрович**,  
Житомирський національний агроекологічний університет,  
доцент кафедри загальної екології

Захист відбудеться « 09 » грудня 2015 року о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.19 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ–41, вул. Генерала Родімцева, 19, навчальний корпус № 1, кімната 97

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ–41, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41-а

Автореферат розісланий «     » листопада 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В. С. Морозова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Аварія на Чорнобильській атомній електростанції є найбільшою в історії людства радіаційною катастрофою, яка вплинула на сільськогосподарське та лісогосподарське виробництво в Україні. Більше 50 тис. км<sup>2</sup> території країни було віднесено до різних зон радіоактивного забруднення. Відповідно до рішення 62 сесії Генеральної Асамблеї ООН від 12 листопада 2007 р. третє десятиріччя після Чорнобильської катастрофи (2006–2016 рр.) проголошено «Десятиріччям реабілітації і стійкого розвитку постраждалих регіонів, здійснення якого повинно бути направлено на досягнення мети повернення постраждалих общин до нормального життя та по можливості в ці ж самі строки». На відміну від перших 10–15 років після аварії, коли відбувалося проведення контрзаходів і дозові навантаження на населення були зменшені вдвічі, починаючи з 2000 р. частота проведення контрзаходів істотно зменшилася й останні 7 років взагалі не проводяться, що, відповідно, не дає змогу покращити радіологічний стан територій зон радіоактивного забруднення. Основними дозоутворюючими радіонуклідами на теперішній час є <sup>90</sup>Sr і <sup>137</sup>Cs. Однак на відміну від <sup>137</sup>Cs, через довготривалість і високу вартість вимірювань спостереження за забрудненням території <sup>90</sup>Sr та продукції проводяться рідко.

Різноманітні фундаментальні дослідження присвячені поведінці штучних радіонуклідів у навколишньому середовищі як унаслідок глобальних випадів після випробовувань ядерної зброї, великих радіаційних аварій в Уіндскейлі та Киштимі, так і в модельних експериментах із використанням водорозчинних форм радіонуклідів (Прістер Б. С., 1972, 1991; Алексахін Р. М., 1964, 1977; Архіпов М. П. і Бондарь П. Ф., 1978; Гулякін І. В.; 1973, Павлоцька Ф. І., 1974, Гудков І. М., 1991; Іванов Ю. О., 1996; Перепелятніков Г. П., 2008 та ін.). Істотну увагу приділено поведінці радіонуклідів у ґрунті як вихідній ланці міграції в системі «ґрунт - рослини» та переходу в рослини. Проте вже перші результати, отримані на паливних слідах чорнобильських радіоактивних випадів, показали обмеженість області застосування раніше отриманих закономірностей поведінки <sup>90</sup>Sr, що відзначався істотно меншою мобільністю та біологічною доступністю в порівнянні з глобальною формою випадів.

Під час аварії на Чорнобильській атомній електростанції основна частка <sup>90</sup>Sr, що потрапив із реактора у навколишнє середовище (більше 90 % активності), була у складі частинок ядерного палива. Враховуючи високу щільність паливних частинок (близько 10 г/см<sup>3</sup>), вони випали у ближній 30-кілометровій зоні Чорнобильської атомної електростанції і на прилеглих до неї територіях (Кашпаров В. О., 2003, 2005). З часом йшло розчинення паливних частинок й радіонукліди переходили в ґрунтовий розчин, включались у міграційний процес, про що свідчить зміна дисперсного складу паливних частинок, а також збільшення частки обмінного Стронцію у ґрунті, його вертикальна міграція у ґрунті та трофічними ланцюгами

агроекосистем і, як наслідок цього, забруднення рослинності, а відповідно і сільськогосподарської продукції (Прістер Б. С., 1991).

Дослідження Українського науково-дослідного інституту сільськогосподарської радіології Національного університету біоресурсів і природокористування України в 1997–2009 рр. щодо забруднення  $^{90}\text{Sr}$  сільськогосподарської продукції в найбільш критичних районах Київської, Чернігівської та Житомирської областей України, які межують із зоною відчуження, показали, що для молока та овочів не спостерігається перевищення допустимих рівнів вмісту  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у продуктах харчування та питній воді (Кашпаров В. О., 2001). Найбільш критичним вміст  $^{90}\text{Sr}$  на даний час є в зернових культурах, що вирощуються на полях поблизу зони відчуження, а також в паливній деревині, на яку в Україні були встановлені дуже жорсткі гігієнічні нормативи у 2005 р. До того ж було виявлено досить складну динаміку забруднення зернових культур у регіонах, які межують із зоною відчуження. Моніторинг вмісту  $^{90}\text{Sr}$  в деревині останніми роками в Україні практично не проводився.

На пізній фазі Чорнобильської аварії в Іванківському районі Київської області на території 3-ї зони радіоактивного забруднення (зони гарантованого добровільного відселення) і до теперішнього часу вирощується зерно і паливна деревина, що не відповідає гігієнічним нормативам України. Через відсутність достовірної інформації щодо рівнів та динаміки забруднення  $^{90}\text{Sr}$  найбільш критичної сільськогосподарської та лісової продукції дуже важливим питанням є проведення радіологічного моніторингу щодо вмісту даного радіонукліда як у ґрунті, так і в зерновій та деревній продукції з метою радіаційного захисту населення.

На підставі вимірювань частки обмінного чорнобильського  $^{90}\text{Sr}$  і внесеного в ґрунт у водорозчинній формі  $^{85}\text{Sr}$  розроблено метод оцінки ступеня розчинення паливних частинок у ґрунті та динаміки переходу радіонуклідів у мобільні форми в природних умовах, а також розроблено емпіричну модель розчинення паливних частинок (вилуговування  $^{90}\text{Sr}$ ) (Кашпаров В. О., 2001, 2004), яка потребує експериментального підтвердження її дієздатності.

Усе це обумовлює актуальність вивчення поведінки  $^{90}\text{Sr}$  в системі ґрунт-рослина для радіаційного захисту населення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у рамках бюджетної теми Українського науково-дослідного інституту сільськогосподарської радіології Національного університету біоресурсів і природокористування України «Наукове забезпечення, супровід і систематизація даних радіологічного контролю сільськогосподарської продукції, що виробляється на території, забрудненій внаслідок Чорнобильської катастрофи» (номер державної реєстрації 0112U003004, 2012–2016 рр.); дослідницької угоди МАГАТЕ «Поведінка у довкіллі та біологічний вплив Чорнобильських радіоактивних частинок» (№ 17928, 2013–2015 рр.); проекту 7-ї рамкової програми

Європейської Комісії «Координація та впровадження пан-Європейського інструменту для радіоекології (COMET)» (Грантова Угода № 604974, 2013–2017 рр.) та проекту Українського науково-технологічного центру «Виконання робіт з картографування радіоактивних забруднень Іванківського р-ну» (№ 2013-04, 2013–2014 рр.).

**Мета та завдання дослідження.** Визначити на пізній фазі аварії на ЧАЕС радіологічне забруднення  $^{90}\text{Sr}$  сільськогосподарської та лісової продукції на територіях із найбільшою щільністю забруднення для прогнозування радіаційного стану та розробки методів радіаційного захисту населення.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

1) провести комплексний моніторинг забруднення  $^{90}\text{Sr}$  ґрунту, критичної сільськогосподарської (зерна) та лісової (паливної деревини) продукції в найбільш забруднених населених регіонах України, що межують із зоною відчуження Чорнобильської атомної електростанції на пізній фазі Чорнобильської аварії;

2) на підставі даних щодо вмісту у ґрунті обмінного  $^{90}\text{Sr}$  визначити кінетику розчинення паливних частинок у ґрунті та переходу радіонуклідів у мобільні форми з метою перевірки дієздатності моделі вилуговування  $^{90}\text{Sr}$  та прогнозних оцінок 1997–1999 рр. щодо швидкості розчинення паливних частинок на пізній фазі Чорнобильської аварії;

3) визначити масову питому активність  $^{90}\text{Sr}$  в орному шарі ґрунту, зерні та паливній деревині залежно від ґрунтово-кліматичних умов, а також відповідність величин існуючим гігієнічним допустимим рівням;

4) на підставі даних про щільність забруднення  $^{90}\text{Sr}$  території розробити критерії визначення регіонів, де існує ризик виробництва продукції із масовою питомою активністю  $^{90}\text{Sr}$  вище допустимих рівнів для оптимізації системи радіаційного контролю та радіаційного захисту населення;

5) оцінити очікувані ефективні дози опромінення населення за рахунок споживання вирощеного на досліджуваній місцевості зерна та їх значимість в формуванні дози внутрішнього опромінення в Іванківському районі.

*Об'єкт дослідження:* кінетика розчинення паливних частинок, перехід  $^{90}\text{Sr}$  в мобільні форми, динаміка поведінки радіонукліда в орному шарі ґрунту і кореневе надходження в рослини залежно від ґрунтових умов на пізній фазі Чорнобильської аварії.

*Предмет дослідження:* масова питома активність  $^{90}\text{Sr}$  в сільськогосподарських та лісових угіддях Київської та Чернігівської областей, що розташовані поруч із зоною відчуження; масова питома активність  $^{90}\text{Sr}$  у зерновій продукції (озимій пшениці, житі та вівсі) та паливній деревині, що зростає на даних угіддях; коефіцієнти накопичення та переходу даного радіонукліда з ґрунту у досліджувані рослини.

**Методи дослідження:** польові (радіометричні вимірювання та відбір зразків), лабораторні (радіохімічний аналіз, гамма- і бета-спектрометрія,

атомно-абсорбційна спектрофотометрія, потенціометрія, титриметрія), методи математичної статистики, картографічний.

**Наукова новизна одержаних результатів.** На основі отриманих експериментальних даних уперше підтверджено дієздатність емпіричної моделі вилуговування  $^{90}\text{Sr}$  та прогнозні оцінки 1997–1999 рр. щодо швидкості розчинення паливних частинок залежно від кислотності ґрунтового розчину і ступеня окислення матриці паливних частинок, вилуговування з них  $^{90}\text{Sr}$  та довготривалої динаміки його вмісту в обмінній формі, що визначає кореневе надходження в рослини (коефіцієнти переходу та накопичення) на пізній фазі Чорнобильської аварії. Установлено, що біогенна та вертикальна міграції  $^{90}\text{Sr}$  у лісових екосистемах призводить до значного зменшення його вмісту у 20-сантиметровому кореневмісному шарі ґрунтів із низьким вмістом обмінного Кальцію ( $[\text{Ca}] < 0,25$  мг-екв/100 г ґрунту) даного регіону, що необхідно враховувати при прогнозуванні забруднення лісової рослинності. Уперше встановлено, що забруднення  $^{90}\text{Sr}$  паливної деревини не залежить від вмісту в ґрунті обмінного Кальцію ( $< 1$  мг-екв/100 г) при однакових рівнях початкового забруднення ґрунту радіостронцієм на пізній фазі аварії. Це обумовлено перебігом обернено спрямованих процесів: збільшення біологічної доступності  $^{90}\text{Sr}$  зі зменшенням вмісту в ґрунті обмінного Кальцію й одночасного зменшення вмісту  $^{90}\text{Sr}$  в кореневмісному шарі за рахунок його вертикальної і біогенної міграцій. Показано, що очікувані ефективні дози опромінення дітей та дорослого працездатного населення за рахунок споживання борошна і хліба з місцевого зерна можуть зробити значний внесок у формування дози внутрішнього опромінення в Іванківському районі.

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані в роботі результати й закономірності мають значення для обґрунтування можливості використання зернової продукції та паливної деревини на території України, яка забруднена  $^{90}\text{Sr}$  після Чорнобильської катастрофи.

Для практичного використання отриманих результатів побудовано номограми залежності щільності забруднення  $^{90}\text{Sr}$  території від вмісту рухомого Кальцію в ґрунті, при якому вміст  $^{90}\text{Sr}$  в зерні може перевищувати Державні гігієнічні нормативи – Допустимі рівні вмісту радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у продуктах харчування та питній воді (20 Бк/кг) (наказ МОЗ України від 03.05.2006 р. № 256), в паливній деревині сосни різного віку – Гігієнічний норматив питомої активності радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у деревині та продукції з деревини (60 Бк/кг) (наказ МОЗ України від 31.10.2005 р. № 573). Ці дані можуть бути використані для оптимізації системи радіаційного контролю – виявлення критичних територій за щільністю забруднення і ґрунтово-кліматичними умовами, на яких потенційно можливе забруднення  $^{90}\text{Sr}$  продукції вище допустимих рівнів і повинен здійснюватися радіаційний контроль. Це дає змогу істотно зменшити витрати на тривалі та дороговартісні радіохімічні вимірювання активності  $^{90}\text{Sr}$  у продукції в Україні, а також приймати управлінські рішення щодо бракування та/або

обмеження використання (переробки, цільового призначення і т. д.) продовольчого зерна та паливної деревини.

Отримані в роботі дані стосовно щільностей забруднення  $^{90}\text{Sr}$  території, продукції та, зумовлені ним, додаткові дози опромінення населення є необхідними для підготовки експертних висновків, на підставі яких повинен здійснюватися перегляд зон радіоактивного забруднення відповідно до нещодавніх змін Закону України «Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи» (Закон України від 28 грудня 2014 року № 76-VIII «Про внесення змін та визнання такими, що втратили чинність, деяких законодавчих актів України»).

**Особистий внесок здобувача.** Усі дослідження проведено за безпосередньою участю здобувача. Особисто здобувачем проведено огляд та аналіз джерел наукової літератури за темою дисертації, складання програми досліджень, польові дослідження та вибір об'єктів досліджень, основну частину лабораторних вимірювань, узагальнення та математичну обробку результатів експериментів, апробацію результатів, формулювання наукових висновків та написання роботи. Аналіз та обговорення результатів досліджень, підготовку до друку наукових публікацій та написання дисертації та автореферату здійснено здобувачем за участю наукового керівника.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідалися та обговорювалися на: Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених «Актуальні проблеми наук про життя та природокористування», (Київ, 26–29 жовтня 2011 р.), XIX, XX та XXI Щорічних наукових конференціях, Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 24–27 січня 2012 р., 28 січня–01 лютого 2013 р. та 27–31 січня 2014 р.); X Всеукраїнській науковій конференції студентів, магістрів та аспірантів «Сучасні проблеми екології та геотехнологій» (Житомир, 10–12 квітня 2013 р.); I Международной научно-технической конференции «Современные проблемы физики, химии и биологии» ФизХимБио – 2012 г. (Севастополь, 28–30 ноября 2012 г.); Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і докторантів «Наукові пошуки молоді у третьому тисячолітті», (Біла Церква, 16–17 травня 2013 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні проблеми наук про життя та природокористування» (Київ, 16–18 жовтня 2013 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Наука. Молодь. Екологія» в рамках I Всеукраїнського з'їзду екологів із міжнародною участю (Житомир, 21–23 травня 2014 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Радіоекологія–2015» (Київ, 24–26 квітня 2015 р.).

Крім того, в рамках I Всеукраїнського молодіжного з'їзду екологів із міжнародною участю (Житомир, 21–23 травня 2014 р.) здобувач приймала участь у Всеукраїнському конкурсі найкращих робіт з агроєкології серед

аспірантів та молодих вчених, на якому була нагороджена дипломом I ступеня.

**Публікації:** Основні результати дисертаційних досліджень опубліковано в 19 працях, із них: 4 статті у наукових фахових виданнях України (три з яких входять до міжнародних наукометричних баз даних); стаття у науковому електронному фаховому виданні України; стаття у науковому виданні іншої держави, що входить до міжнародних наукометричних баз даних; дві статті в інших виданнях та 11 тез наукових доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, огляду наукової літератури, матеріалів і методів дослідження, результатів власних досліджень та їх обговорення, висновків і списку використаних джерел літератури, що налічує 144 найменування, із яких 38 – латиницею. Основний зміст роботи викладено на 140 сторінках друкованого тексту, робота проілюстрована 36 рисунками, 24 таблицями та 3 додатками.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Огляд наукової літератури.** Огляд літератури складається з семи підрозділів, у яких описується перебіг подій, що супроводжували аварію на Чорнобильській атомній електростанції (ЧАЕС) та наслідки аварії, характеристика паливних частинок (ПЧ) як специфічної особливості чорнобильських радіоактивних випадінь, міграція радіостронцію в ґрунті, параметри інтенсивності кореневого надходження  $^{90}\text{Sr}$  в рослини, включаючи деревину, контрзаходи зі зменшення забруднення продукції  $^{90}\text{Sr}$  та допустимі рівні вмісту в продуктах харчування та деревині, а також формування доз опромінення населення за рахунок  $^{90}\text{Sr}$ .

## МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проби сільськогосподарської та лісової продукції відбирали на території, постраждалої внаслідок Чорнобильської катастрофи, на якій в 1997–2009 рр. зафіксовані випадки перевищення допустимих рівнів вмісту радіостронцію в зерні та деревині (Кашпаров В. О., 2001, 2011). Беручи до уваги попередній досвід вивчення забруднення рослинної продукції  $^{90}\text{Sr}$  та рекомендації щодо проведення моніторингу, для спостережень були вибрані території, які безпосередньо прилягають до зони відчуження (ЗВ). Проби ґрунту та зернової продукції відбирали у 2011–2013 рр. з полів північної частини Іванківського району Київської області та Козелецького і Чернігівського районів Чернігівської області, на територіях яких існує вірогідність забруднення  $^{90}\text{Sr}$  продовольчого зерна вище Допустимих рівнів вмісту радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у продуктах харчування та питній воді (ДР–2006). У 2012–2013 рр. у лісах Іванківського району Київської області, де можлива наявність деревини, яка б не відповідала Гігієнічному нормативу питомої активності радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у деревині та продукції з деревини (ГНПАР–2005) за вмістом  $^{90}\text{Sr}$  для дров паливних, відбирались проби ґрунту та деревини.

У кожній точці пробовідбору за допомогою приймача GPSmap 78s (Garmin, США) встановлювалася географічна координата в системі WGS84 з точністю  $< 10$  м (для 95 % вимірювань). Перед відбором проб на досліджуваній ділянці вимірювали потужність еквівалентної дози гамма-випромінювання в повітрі радіометром-дозиметром РКС-01 «СТОРА-ТУ» (ECOTEST, Україна) на висоті 10 і 100 см над поверхнею ґрунту в місці наміченого пробовідбору.

Спряжені проби ґрунту та рослин відбирали згідно відповідних методичних рекомендацій із урахуванням загальноприйнятих стандартних підходів, методології, вимог оптимізації пробовідбору та вимірювань зразків при здійсненні радіоекологічного моніторингу:

- проби ґрунту відбирали на кожному полі спеціальним пробовідбірником діаметром 37 мм на глибину орного шару (20 см) у п'яти точках із кроком не менше 5–10 м один від одного методом конверту (СОУ 74.14–37–425:2006 та 74.14–37–424:2006.);

- сряжені зразки господарсько-цінних частин урожаю (колосків) зернових культур відбиралися на тих же ділянках, що і проби ґрунтів. Колоски зрізали ножицями по діагоналям пробовідбірних ділянок з майданчиків площею не менше  $1 \times 1$  м. Об'єднана проба складалася з 11 точкових проб, що гарантувало відносну похибку оцінки медіани питомої активності радіонукліду в урожаї ( $\delta_\gamma = 0,95$ ) близько 20 % за точності вимірювань активності у зразках на рівні 20 % (СОУ 01.1–37–426:2006);

- сряжені зразки деревини (дрова паливні, хмиз) відбиралися на тих же ділянках, що і проби ґрунтів, в тих самих мішаних лісних масивах. Проби деревини відбирали спеціальним приростковим буром діаметром 0,5 см на висоті стовбура 1,3 м декількох представників дерев одного виду та за допомогою пилки (відбирали проби гілок дерев довжиною близько 20 см діаметром не менше 5 см).

У 2013 р. був проведений мікропольовий експеримент із вивчення ефективності контрзаходів (вапнування та внесення підвищених доз фосфорних добрив) для зменшення надходження  $^{90}\text{Sr}$  в зерно ярої пшениці. Цей експеримент проводився на 4 типових ґрунтах України (дерново-підзолистих, сірих лісових, чорноземах лугових та чорноземах типових) на експериментальному майданчику в зоні відчуження. Вирощування врожаю проводилося із залученням необхідних агротехнічних заходів. Після збору врожаю було проведено відбір зразків ґрунту та зерна для визначення вмісту радіонуклідів.

У зразках ґрунтів за допомогою стандартних агрохімічних методів було визначено кислотність ґрунтового розчину (рН) та вміст обмінного Кальцію в ґрунті, які впливають на швидкість розчинення паливних частинок (ПЧ) та кореневе надходження  $^{90}\text{Sr}$  в рослини.

В усіх відібраних зразках ґрунту та рослин вимірювалася активність  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  за допомогою стандартних методів гамма-, бета-спектрометрії та радіохімії. Вміст  $^{137}\text{Cs}$  в попередньо підготовлених пробах визначався на

високоєфективному гама-спектрометрі з напівпровідниковим детектором із високочистого германію «GEM-30185» фірми «EG & ORTEC» США. Вміст  $^{90}\text{Sr}$  у пробах визначався після його радіохімічного виділення за активністю його дочірнього радіонукліду  $^{90}\text{Y}$  на бета-спектрометрі СЕБ-01 (АКП, Україна). Питома активність радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  в зерні, деревині та ґрунті розраховувалася на абсолютно-суху масу.

При дослідженні швидкості розчинення ПЧ і частки вилугуваного з них  $^{90}\text{Sr}$  визначали частку  $^{90}\text{Sr}$  у ґрунті в обмінній формі (Павлоцька Ф. І., 1997).

Статистичну обробку експериментальних даних проводили методом математичної статистики за допомогою програми «Microsoft Excel».

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

**Результати вимірювань питомої активності радіонуклідів у ґрунті.** За результатами експериментальних досліджень визначено, що середня питома активність  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  в 20-сантиметровому орному шарі ґрунту в Іванківському районі Київської області складала в середньому 47 Бк/кг ( $19 \div 88$  Бк/кг) і 158 Бк/кг ( $70 \div 242$  Бк/кг), що відповідає щільності забруднення 12 кБк/м<sup>2</sup> і 40 кБк/м<sup>2</sup> відповідно і добре узгоджується з офіційними даними (Атлас, Україна, радіоактивне забруднення, 2008). Вміст  $^{137}\text{Cs}$  у ґрунті в середньому в 3,8 разів перевищував вміст  $^{90}\text{Sr}$ . Кислотність ґрунтової витяжки змінювалася від слабокислої (рН=5,0) до слаболужної (рН=8,1) і в середньому становила рН=6,1; вміст обмінного Кальцію в середньому становив 2,7 мг-екв/100 г ґрунту ( $0,9 \div 5,7$  мг-екв/100 г). Частка активності  $^{90}\text{Sr}$  в обмінній формі в ґрунті на час досліджень – 68 % ( $25 \div 88$  %), що наближається до значень для надходження радіостронцію у ґрунт у водорозчинній формі (85 %) і свідчить про значне розчинення ПЧ.

Середня питома активність  $^{90}\text{Sr}$  у 20-сантиметровому орному шарі ґрунту в Чернігівській області становила 17 Бк/кг ( $10 \div 26$  Бк/кг), що відповідає щільності забруднення близько 3 кБк/м<sup>2</sup> і незначно відрізняється від рівня дочорнобильських глобальних випадінь. Цим обумовлено «старіння» глобального радіостронцію та відносно невисокий його вміст в обмінній формі 46 % ( $31 \div 63$  %). Питома активність  $^{137}\text{Cs}$  в орному шарі досліджуваних полів Чернігівської області, за рахунок його конденсаційних випадінь, змінювалася в широких межах від 23 до 469 Бк/кг. Кислотність ґрунтової витяжки змінювалася від слабокислої (рН=5,4) до нейтральної (рН=7,0) і в середньому становила рН=6,0; вміст обмінного Кальцію в середньому складав 3,3 мг-екв/100 г ґрунту ( $1,7 \div 5,0$  мг-екв/100 г). У 2012–2013 рр. з лісів Іванківського району Київської області було відібрано 26 спряжених зразків ґрунту та деревини. Отримані результати показали, що у ґрунті питома активність  $^{137}\text{Cs}$  змінювалася в діапазоні 51–290 Бк/кг (середня 149 Бк/кг), що добре узгоджується з результатами для сільськогосподарських угідь. Питома активність  $^{90}\text{Sr}$  у ґрунті знаходилася в межах 4–93 Бк/кг (середня 31 Бк/кг), що відповідає щільності забруднення

території 4–25 кБк/м<sup>2</sup> і добре узгоджується з офіційними даними (Атлас, Україна, радіоактивне забруднення, 2008) та результатами для сільськогосподарських угідь. У деяких пробах спостерігалось зменшення вмісту <sup>90</sup>Sr по відношенню до <sup>137</sup>Cs у 20-сантиметровому шарі лісових ґрунтів (відношення питомих активностей <sup>137</sup>Cs/<sup>90</sup>Sr > 7,5 при середній величині 3,8 для орного 20-сантиметрового шару), що може бути зумовлене його вертикальною та біогенною міграцією. За даними агрохімічного аналізу вміст рухомого Кальцію (Ca) у відібраних пробах варіював у діапазоні 0,06÷4,06 мг-екв/100 г (середнє значення 0,62 мг-екв/100 г). Кислотність водної витяжки (рН) досліджуваних зразків варіювала від 4,4 до 7,5.

### Результати вимірювань питомої активності радіонуклідів у зерні.

У 2011–2013 рр. із усіх полів населених пунктів (НП) Іванківського району, де у промислових масштабах вирощувалися зернові культури (Дитятки, Зорин, Горностайпіль, Прибірськ та Пироговичі), та у 2012 р. в Чернігівській області було проведено відбір спряжених зразків ґрунту та зерна (жита, вівса та пшениці). Питома активність <sup>137</sup>Cs в усіх відібраних у 2011–2012 рр. пробах зерна не перевищувала 13 Бк/кг при допустимому рівні для продовольчого зерна 50 Бк/кг. Вміст <sup>137</sup>Cs у більшості проб був на рівні мінімально детектованої активності (МДА) 1–5 Бк/кг. У 2013 р. спостерігалось збільшення питомої активності <sup>137</sup>Cs в зерні з усіх полів (до 26 Бк/кг), що, можливо, було пов'язано з погодними умовами і внесенням підвищених доз азотних добрив для збільшення урожайності, а також розчиненням паливних частинок і вилугуванням із них радіонуклідів.

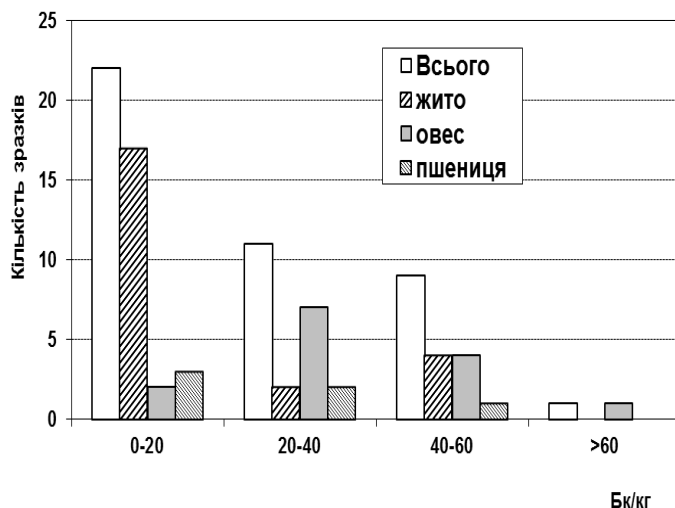


Рис. 1. Розподіл зразків зернових культур за вмістом <sup>90</sup>Sr у зерні у 2011–2013 рр. у Київській і Чернігівській областях

порівнянні з озимими пшеницею (середнє – 24 Бк/кг) і житом (середнє – 19 Бк/кг).

Як свідчать результати проведених радіохімічних досліджень, вміст <sup>90</sup>Sr в зерні у 2011–2013 рр. коливався від 1 до 61 Бк/кг і в половині випадків перевищував допустимий рівень для харчового зерна (20 Бк/кг) (рис. 1). Отримані результати показали, що <sup>90</sup>Sr при одних і тих самих умовах дещо більш інтенсивно накопичується у зерні вівса (середній вміст у всіх пробах – 38 Бк/кг) у

Середній рівень питомої активності  $^{90}\text{Sr}$  у зерні усіх видів культур в Іванківському районі з 2011 по 2013 рр. збільшився з 19 до 45 Бк/кг. Якщо розглядати одні й ті ж культури, вирощені на одних і тих самих полях, то питома активність  $^{90}\text{Sr}$  у зерні жита із 2011 по 2013 рр. збільшилася в  $3,1 \div 4,5$  рази, пшениці – в 5,8 разів і вівса – в  $1,3 \div 2,0$  рази. Таке збільшення пов'язане як із розчиненням паливних частинок і вилуговуванням із них радіонуклідів, так і з різними погодними умовами і, можливо, застосуванням вапнування та мінеральних добрив у/чи перед 2011 р., а також підвищених (нерекомендованих) доз азотних добрив у 2013 р. для збільшення урожайності культур.

Якщо у 2011 р. в 5 пробах із 13 (42 %) в Іванківському районі поблизу сіл Дитятки та Прибірськ вміст радіонуклідів (в основному, за рахунок  $^{90}\text{Sr}$ ) не відповідав ДР–2006, то у 2012 р. нормативам не відповідали вже 10 із 13 проаналізованих зразків (77 %). У 2013 р. в усіх 11 вимірюваних зразках зерна активність  $^{90}\text{Sr}$  перевищувала допустимий рівень 20 Бк/кг, а тому були зроблені висновки про невідповідність жодної з відібраних у 2013 р. проб зерна вимогам ДР–2006. У Чернігівській області в 2012 р. лише один зразок із 8 (поблизу села Карпилівка) унаслідок забруднення зерна  $^{90}\text{Sr}$  не відповідав ДР–2006. Вміст  $^{137}\text{Cs}$  в зерні, яке вирощене у Чернігівській області, був майже вдвічі нижчим, порівняно з результатами, які отримані для Київської області.

**Результати вимірювань питомої активності радіонуклідів у деревині.** У 2012–2013 рр. одночасно з пробами зерна, було відібрано проби маломірної неокорованої деревини сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) – 14 зразків та листяних порід – 12 зразків (9 зразків берези пониклої (*Betula pendula* Roth.) та по одному зразку верби білої (*Salix alba* L.), осики (*Populus tremula* L.) та дуба звичайного або черешчатого (*Quercus robur* L.)) у північній частині Іванківського району Київської області. Питома активність  $^{137}\text{Cs}$  в усіх відібраних пробах сосни знаходилася в межах 2–121 Бк/кг (середнє 34 Бк/кг), а вміст  $^{90}\text{Sr}$  у зразках коливався від 41 до 393 Бк/кг (середнє 197 Бк/кг). Найбільша активність проб відібраних поблизу сіл Оране, Дитятки та Губин. Дослідження в деревині листяних порід свідчать, що питома активність  $^{137}\text{Cs}$  знаходиться в межах 6–270 Бк/кг (середнє 59 Бк/кг), і є дещо більшою в порівнянні з середньою активністю деревини сосни, включаючи й різні породи дерев в тих самих мішаних лісових масивах. Вміст  $^{90}\text{Sr}$  у зразках листяних порід дерев був вищим практично у двічі в порівнянні з деревиною сосни і становив 104–643 Бк/кг (середнє 349 Бк/кг). Найвищий вміст  $^{90}\text{Sr}$  у деревині берези, яку відібрано поблизу сіл Оране (> 600 Бк/кг), Медвин (> 400 Бк/кг), Дитятки та Горностайпіль (> 300 Бк/кг); деревині дуба, відібраного поруч з селом Дитятки (392 Бк/кг); деревині сосни, відібраної поблизу сіл Оране, Дитятки та Губин (> 300 Бк/кг).

Таким чином, лише 4 із 26 відібраних проб деревини (15 %) відповідали ГНПАР–2005 за вмістом  $^{90}\text{Sr}$  для дров паливних та паливних пучків.

**Результати проведення мікропольового експерименту з вивчення ефективності контрзаходів у зоні відчуження.** У пробах ґрунту і зерна, відібраних із усіх досліджуваних майданчиків у 2013 р. було визначено питому активність  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$ . Отримані результати з вмісту радіонуклідів у ґрунті та зерні показали, що радіологічна ефективність застосованих контрзаходів (кратність зниження питомої активності у зерні) щодо надходження радіостронцію в зерно ярої пшениці у перший рік після застосування була нижчою, ніж очікувалося та наведена в науковій літературі (1,5–2,6 для вапна та 0,8–1,2 для добрив NPK в рекомендованих кількостях) (Прістер Б. С., ред., 2007, Цыбулько Н. Н., ред., 2012). Найбільший ефект від дії контрзаходів очікувався на кислому дерново-підзолистому ґрунті. Вапно повільно розчиняється і взаємодіє з ґрунтом, його дія виявляється поступово, тому ефект від вапнування досягає максимуму тільки на другий-третій рік. Це і є основною причиною низької ефективності контрзаходів у перший польовий сезон.

**Поведінка  $^{90}\text{Sr}$  в ґрунті.** Процес розчинення паливних частинок в ґрунті і переходу  $^{90}\text{Sr}$  з їх матриці в ґрунтовий розчин може бути описаний рівнянням кінетики першого порядку (1). При цьому частка активності  $^{90}\text{Sr}$  в обмінній формі в ґрунті в момент часу  $t$  після випадіння ( $A_{\text{Sr\_ex}}(t)$ , %) буде дорівнювати:

$$A_{\text{Sr\_ex}}(t) = A'_{\text{Sr\_ex}} \cdot (1 - \text{FP}(t)) = A'_{\text{Sr\_ex}} \cdot (1 - \exp(-kt)), \quad (1)$$

де  $A'_{\text{Sr\_ex}}$  – частка активності радіоізоотопів стронцію ( $^{90}\text{Sr}$  чи  $^{85}\text{Sr}$ ) в обмінній формі у ґрунті при надходженні в водорозчинній формі чи після повного розчинення ПЧ (%);  $\text{FP}(t)$  – частка активності  $^{90}\text{Sr}$  у складі ПЧ на час  $t$ ;  $k$  – стала трансформації ПЧ ( $\text{рік}^{-1}$ );  $t$  – тривалість знаходження ПЧ у ґрунті після аварії (років).

Залежності сталих трансформації чорнобильських ПЧ від кислотності ґрунтового розчину (рН), які було отримано в 1997–2000 рр. (для південного сліду  $k=40 \cdot 10^{-(0.45 \cdot \text{pH})} \text{рік}^{-1}$  при  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} < 6,5$  і  $k=0,05 \text{рік}^{-1}$  при  $7,5 > \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} > 6,5$ ), дозволяють оцінити частку активності  $^{90}\text{Sr}$  в обмінній формі в ґрунті ( $A_{\text{Sr\_ex}}(t)$ ) на 2011–2013 рр. залежно від кислотності ґрунтів (рис. 2). Отримані теоретичні прогнозовані оцінки добре узгоджуються з отриманими нами експериментальними даними.

На період дослідження основна маса ПЧ на всіх досліджуваних полях розчинилася, радіостронцій перейшов у ґрунтовий розчин і став доступним для кореневого надходження в рослини. Лише в нейтральних ґрунтах близько 20 % активності  $^{90}\text{Sr}$  може ще знаходитися у складі матриці ПЧ, що з урахуванням похибки вимірювання не буде принципово впливати на кореневе надходження  $^{90}\text{Sr}$  у рослини в теперішній час і в майбутньому в різних ґрунтово-кліматичних умовах. Усе це дозволяє спрогнозувати динаміку переходу  $^{90}\text{Sr}$  з матриці ПЧ в ґрунтовий розчин і його залучення до процесів міграції, а також кореневого надходження в рослини. Отримані результати вперше підтвердили дієздатність моделі, її параметри і прогнозні оцінки 1997–1999 рр. щодо швидкості

розчинення ПЧ, вилуговування з них  $^{90}\text{Sr}$  і довготривалої динаміки його вмісту в обмінній формі, що визначає кореневе надходження в рослини залежно від кислотності ґрунтового розчину протягом 29 років після Чорнобильської аварії.

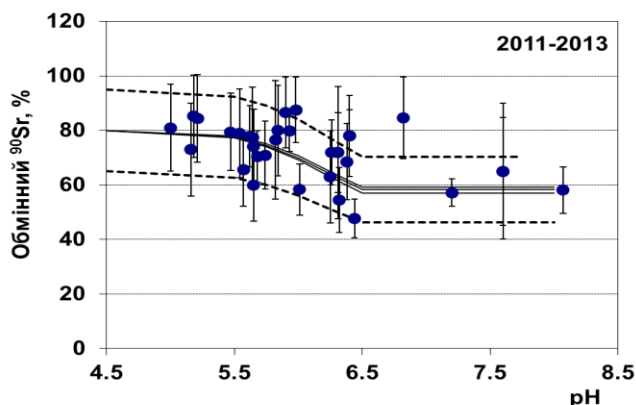


Рис. 2. Частка активності  $^{90}\text{Sr}$  в обмінній формі в ґрунті ( $A_{\text{Sr\_ex}}(t)$ ) на 2011–2013 рр. в залежності від кислотності ґрунтів

Примітка. Суцільна лінія – розрахункова, теоретична залежність з довірчим інтервалом – пунктирна лінія

На мінеральних ґрунтах  $^{137}\text{Cs}$  менш мобільний у порівнянні з  $^{90}\text{Sr}$ . Саме тому при значній вертикальній міграції  $^{90}\text{Sr}$  з 20-сантиметрового шару ґрунту спостерігається збільшення відношення  $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$  у ґрунті з часом, у порівнянні зі значеннями цієї величини для радіоактивних випадів гострого періоду. На досліджуваних сільськогосподарських угіддях не спостерігалось достовірного зменшення відношення  $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}=3,8$  залежно від вмісту в орному 20-сантиметровому кореневмісному шарі ґрунту обмінного Са. На лісових ґрунтах Іванківського району з меншим вмістом Са середнє відношення  $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}=8$  і було більше ніж у 2 рази вищим і достовірно зменшувалося із зниженням вмісту в ґрунті обмінного Са / гумусу (рис. 3а). Це вказує на суттєву вертикальну міграцію  $^{90}\text{Sr}$  на бідних слабогумусованих дерново-підзолистих піщаних та супіщаних ґрунтах і його значне надходження в біомасу деревостою лісів, що призвело до зменшення вмісту  $^{90}\text{Sr}$  у 20-сантиметровому кореневмісному шарі більш ніж на 50 %. Так, при вмісті обмінного Кальцію менше 0,25 мг-екв/100 г ґрунту відносно зменшення вмісту  $^{90}\text{Sr}$  у 20-сантиметровому шарі в середньому становило 67 % ( $T_{\text{forest}1/2} = 16$  років), а при  $[\text{Ca}] = 0,2 \div 1$  мг-екв/100 г ґрунту відносно вимивання радіостронцію – 35 % ( $T_{\text{forest}1/2} = 42$  роки) (рис. 3б).

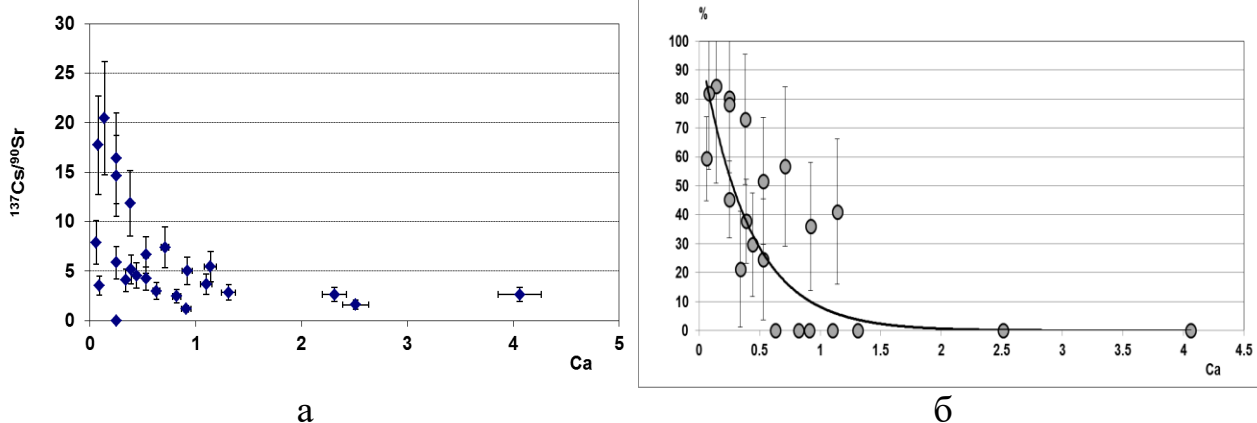


Рис. 3. Відношення активності  $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$  (а) та відносна вертикальна міграція  $^{90}\text{Sr}$  із 20-сантиметрового кореневмісного шару лісових ґрунтів (б) від вмісту у ґрунті обмінного Са (мг-екв/100 г) у 2012–2013 рр.

**Закономірності кореневого надходження  $^{90}\text{Sr}$  у рослини.** Для параметризації інтенсивності кореневого надходження  $^{90}\text{Sr}$  у зерно було визначено коефіцієнти накопичення ( $K_H$ ) – відношення масової питомої активності радіонукліда в сухих рослинах до його масової питомої активності в 20-сантиметровому орному шарі ґрунту, на якому ці рослини вирощені, (Бк/кг)/(Бк/кг); коефіцієнти переходу ( $K_{II}$ ) – відношення масової питомої активності радіонукліда в сухих рослинах до щільності забруднення ґрунту, на якому вони вирощені, (Бк/кг)/(кБк/м<sup>2</sup>).

Отримані значення  $K_H$   $^{90}\text{Sr}$  в зерно більш ніж на порядок величини перевищують  $K_H$  для  $^{137}\text{Cs}$ . Достовірно не відрізнялися величини  $K_H$   $^{90}\text{Sr}$  в зерно жита (середнє значення 0,81), пшениці (середнє значення 0,79) і вівса (середнє значення 0,83) з урахуванням розкиду для різного виду зернової культури.

Отримані в 2011 р. величини  $K_{II}$  і  $K_H$   $^{90}\text{Sr}$  в зерно жита, вівса і озимої пшениці (рис. 4) були близькі і мали чітко виражену обернено пропорційну залежність від вмісту в ґрунті обмінного Кальцію, добре узгоджувались з отриманими раніше ( $K_H=1,2$  [Ca]<sup>-1</sup>) й узагальненими даними МАГАТЕ для мінеральних піщаних ґрунтів.

У 2012 і 2013 рр. не спостерігалось чіткої залежності величини  $K_H$   $^{90}\text{Sr}$  в зерні відносно вмісту в ґрунті обмінного Кальцію. При цьому отримані результати не мали значної строкатості порівняно з отриманими у 2011 р. даними (рис. 4).

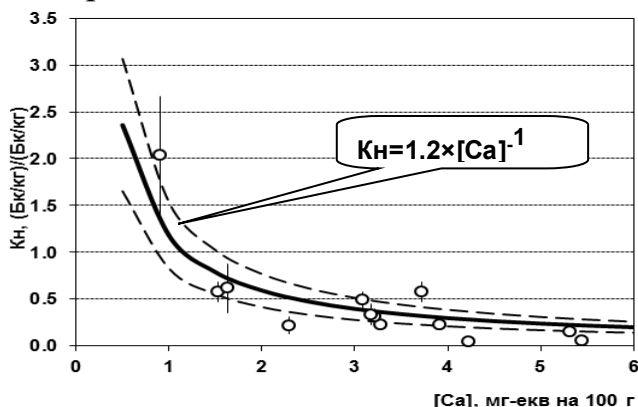


Рис. 4. Залежність коефіцієнта накопичення –  $K_H$   $^{90}\text{Sr}$  в зерні жита, вівса і озимої пшениці в 2011 р. від вмісту в ґрунті обмінного Кальцію ([Ca])

Примітка. Суцільна лінія – залежність  $K_H=1,2 \cdot [Ca]^{-1}$

**Вміст  $^{90}\text{Sr}$  в неокорованій маломірній паливній деревині (хмиз/паливні пучки).** Для параметризації інтенсивності кореневого надходження  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$  у деревину були також розраховані  $K_H$  та  $K_{II}$ . Інтенсивність кореневого надходження у деревину  $^{90}\text{Sr}$  в десятки і сотні разів може перевищувати параметри переходу  $^{137}\text{Cs}$ . В середньому  $K_H$   $^{90}\text{Sr}$  перевищував  $K_H$   $^{137}\text{Cs}$  для листяних порід дерев в 43 рази, а для сосни – в 130 разів. В деревині листяних порід дерев  $K_{II}$   $^{90}\text{Sr}$  в середньому складав 34 (Бк/кг)/(кБк/м<sup>2</sup>) і змінювався від 9 до 78 (Бк/кг)/(кБк/м<sup>2</sup>), а для сосни – 61 (Бк/кг)/(кБк/м<sup>2</sup>) і змінювався від 3 до 151 (Бк/кг)/(кБк/м<sup>2</sup>). Отримані значення  $K_{II}$  у деяких випадках перевищують значення, рекомендовані МАГАТЕ (0,6–6,2 для деревини берези і 0,6–10 для сосни). Це пояснюється тим, що вимірювання проводилися для неокорованої маломірної паливної деревини (хмиз / паливні пучки), питома активність якої до 10 разів може

перевищувати питому активність окорованої деревини. Крім того, малородючі ґрунти даного регіону з низьким вмістом гумусу та обмінного Кальцію характеризуються підвищеними  $K_D$  і  $K_H$  радіостронцію в деревину. Також слід зазначити, що підвищені значення  $K_D$  і  $K_H$  радіостронцію в деревину обумовлені зменшенням його вмісту в даний час в 20-сантиметровому кореневмісному шарі ґрунтів за рахунок вертикальної міграції та надходження в деревостій, що також слід враховувати.

Спостерігається залежність  $K_D$   $^{90}\text{Sr}$  в неокоровану маломірну паливну деревину листяних порід дерев і сосни в 2012–2013 рр. на території Іванківського району від вмісту в ґрунті обмінного Кальцію (рис. 5).

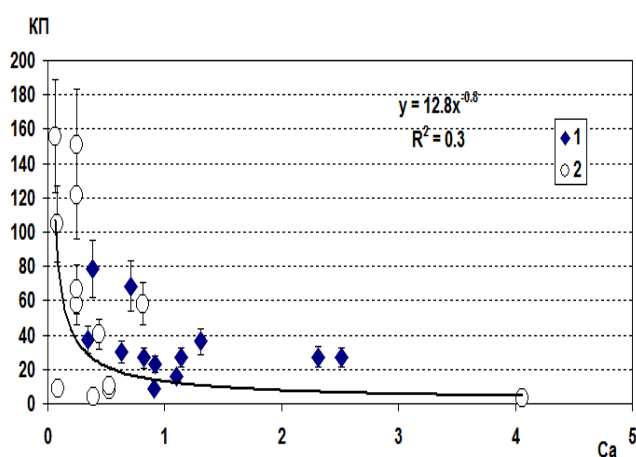


Рис. 5. Залежність коефіцієнту переходу –  $K_D$  ((Бк/кг)/(кБк/м<sup>2</sup>))  $^{90}\text{Sr}$  в неокоровану маломірну паливну деревину листяних порід дерев (1) і сосни (2) в 2012–2013 рр. на території Іванківського району від вмісту в ґрунті обмінного кальцію ([Ca]), мг-екв/100 г ґрунту  
Примітка. Суцільна лінія – лінія тренда для деревини сосни

Слід особливо відзначити, що при  $K_D$  вище 60 (Бк/кг)/(кБк/м<sup>2</sup>) вже за щільності забруднення території, починаючи з 1 кБк/м<sup>2</sup> у дровах і паливних пучках (хмиз) питома активність  $^{90}\text{Sr}$  може перевищувати гігієнічний норматив ГНПАР-2005 (60 Бк/кг).

**Динаміка кореневого надходження  $^{90}\text{Sr}$  в зерно.** Динаміка забруднення  $^{90}\text{Sr}$  рослинності визначається кінетикою розчинення ПЧ і зумовленою цим зміною вмісту мобільного радіостронцію в кореневому шарі ґрунту. В динаміці дослідження величини  $K_H$   $^{90}\text{Sr}$  в зерно у населених пунктах Іванківського району протягом 1997–2013 рр. узгоджується з прогнозними оцінками біологічної доступності цього радіонукліда, зробленими на основі емпіричної моделі розчинення ПЧ (1) у 2001 р., і принципово відрізняється від експоненціально спадаючої динаміки  $K_H$  для глобальних випадів  $^{90}\text{Sr}$ .

**Довгостроковий прогноз вмісту  $^{90}\text{Sr}$  у рослинах.** Вміст  $^{90}\text{Sr}$  у зерні ( $A_p$ , Бк/кг) на паливних слідах радіоактивних випадів буде визначатися кінетикою його вилуговування з матриці паливних частинок ( $(1 - FP) = (1 - \exp(-k \cdot t))$ ), вмістом у ґрунті обмінного кальцію ( $K_D = 4 \cdot [Ca]^{-1}$ , (Бк/кг)/(кБк/м<sup>2</sup>) чи  $K_H = 1,2 \cdot [Ca]^{-1}$ , (Бк/кг)/(Бк/кг)), а також щільністю забруднення ґрунту радіостронцієм ( $A_s$ , кБк/м<sup>2</sup>) або його питомою активністю в 20-сантиметровому орному шарі ( $A_m$ , Бк/кг) на момент аварії (2):

$$A_p = A_s \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \cdot (1 - \exp(-k \cdot t)) \cdot 4 \cdot [Ca]^{-1}, \quad (2)$$

де  $\lambda = 0,024 \text{ рік}^{-1}$  – стала радіоактивного розпаду  $^{90}\text{Sr}$ .

До теперішнього часу вже досягнутий максимум кореневого забруднення  $^{90}\text{Sr}$  зерна після розчинення ПЧ і в майбутньому буде спостерігатися зменшення питомої активності радіостронцію у зерні за рахунок радіоактивного розпаду з періодом піврозпаду близько 29 років (рис. 6а).

Питома активність  $^{90}\text{Sr}$  в неокорованій маломірній паливній деревині ( $A_p$ , Бк/кг) на паливних слідах радіоактивних випадіннь на час  $t$  (рік) без урахування міграції радіостронцію із підстилки в кореневмісний шар ґрунту в перші роки після чорнобильських радіоактивних випадіннь буде визначатися кінетикою його вилуговування із матриці паливних частинок  $((1 - FP) = (1 - \exp(-k \cdot t))$ ), вмістом у ґрунті обмінного Кальцію  $((K_{II}(\text{Ca}) = K_{II}(\text{при Ca} = 1 \text{ мг-екв/100 г}) \cdot \text{Ca}^{-1}$  та також щільністю забруднення ґрунту радіостронцієм ( $A_s$ , кБк/м<sup>2</sup>) на момент аварії (3):

$$A_p = A_s \cdot \exp(-\ln(2)/T_{forest1/2}(\text{Ca})) \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \cdot (1 - \exp(-k \cdot t)) \cdot K_{II}(\text{при Ca} = 1) \cdot [\text{Ca}]^{-1}, \quad (3)$$

де  $T_{forest1/2}$  – екологічний період напівзменшення вмісту  $^{90}\text{Sr}$  в 20-сантиметровому кореневмісному шарі лісових ґрунтів (років).

При зменшенні вмісту в ґрунті обмінного Кальцію  $[\text{Ca}]$  збільшується інтенсивність кореневого надходження  $^{90}\text{Sr}$  у деревину (рис. 6б) і одночасно зменшення його вмісту в 20-сантиметровому кореневмісному шарі ґрунту (рис. 3). Два цих взаємно різноспрямовані процеси призводять до того, що в даний час забруднення  $^{90}\text{Sr}$  паливної деревини не залежить від вмісту в ґрунті обмінного Кальцію ( $< 1$  мг-екв/100 г ґрунту) при однакових рівнях початкового забруднення ґрунту радіостронцієм після аварії (рис. 6б).

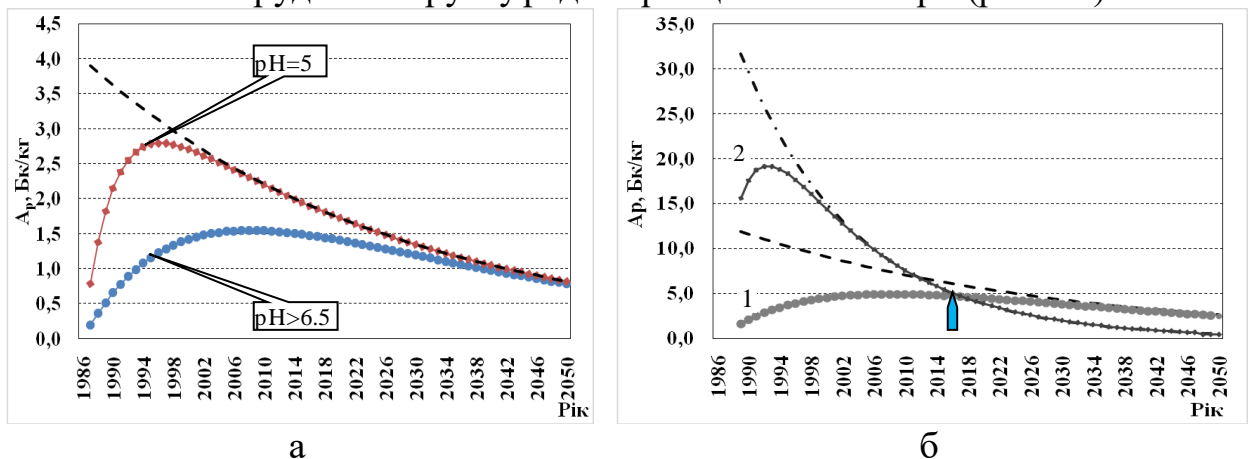


Рис. 6. Динаміка кореневого забруднення  $^{90}\text{Sr}$  зерна (а) та деревини (б),  $A_p$ , Бк/кг на конденсаційних ( $k = \infty$ , пунктирна лінія) і паливних ( $k = 0,05 \text{ рік}^{-1}$ , суцільна лінія) слідах радіоактивних випадіннь при  $A_s = 1 \text{ кБк/м}^2$  на 1986 рік,  $K_{II}(\text{при Ca} = 1) = 1 \text{ (Бк/кг)/(кБк/м}^2)$

Примітка. Вміст обмінного кальцію в ґрунті: 1 –  $[\text{Ca}] = 1 \text{ мг-екв/100 г}$  ґрунту ( $T_{forest1/2} = \infty$  років); 2 –  $[\text{Ca}] < 0,25 \text{ мг-екв/100 г}$  ґрунту ( $T_{forest1/2} = 16$  років) на пізній фазі Чорнобильської аварії

**Ризик отримання в Іванківському районі продукції, що за вмістом радіонуклідів не відповідає гігієнічним нормативам.** На основі отриманих залежностей для їх практичного використання були побудовані номограми залежності щільності забруднення  $^{90}\text{Sr}$  території від вмісту рухомого Кальцію в ґрунті, при якому вміст  $^{90}\text{Sr}$  в зерні та паливній деревині може перевищувати ДР–2006 та ГНПАР–2005.

На даний час за вмісту у ґрунті обмінного Кальцію [Ca] на рівні 1 мг-екв/100 г ґрунту або менше, уже при щільності забруднення  $^{90}\text{Sr}$  території вище 5 кБк/м<sup>2</sup> вміст  $^{90}\text{Sr}$  як у зерні, так і у маломірній паливній деревині може перевищувати гігієнічні нормативи. Практично вся східна частина – половина Іванківського району Київської області має щільності забруднення території  $^{90}\text{Sr}$  вище 5 кБк/м<sup>2</sup>, половина з якої забруднена  $^{90}\text{Sr}$  вище 10 кБк/м<sup>2</sup>, отже на цій території може вироблятися зерно та маломірна паливна деревина із вмістом  $^{90}\text{Sr}$  вище ДР–2006 та ГНПАР–2005. Ці дані можуть бути використані для оптимізації системи радіаційного контролю.

**Оцінка внеску  $^{90}\text{Sr}$  у дозу опромінення жителів Іванківського району.** На підставі даних стосовно вмісту  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  в зерні були зроблені оцінки очікуваної ефективної дози опромінення дітей і дорослого працездатного населення ( $E_{ing}$ , мЗв/рік) за рахунок споживання зернової продукції (хліб та борошно), вирощеної в Іванківському районі, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

**Очікувана ефективна доза внутрішнього опромінення дітей та дорослого населення Іванківського району за рахунок споживання продукції з місцевого зерна**

Населений пункт	Максимальна питома активність зерна, Бк/кг		Внутрішнє опромінення, мЗв/рік					
			Діти 12–17 років			Дорослі		
	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	сума	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	сума
Горностайпіль	16	39	0,004	0,07	0,08	0,006	0,03	0,04
Дитятки	16	55	0,004	0,10	0,11	0,006	0,05	0,05
Прибірськ	25	59	0,006	0,11	0,12	0,010	0,05	0,06

Основний внесок у формування дози внутрішнього опромінення дає  $^{90}\text{Sr}$  (більше 90 % для дітей і більше 80 % для дорослих), при цьому ефективна доза опромінення дітей віком 12–17 років за рахунок споживання продукції з місцевого зерна в 2 рази може перевищувати дозу для дорослих і офіційну паспортну дозу (рис. 7).

Отримані результати вказують на необхідність додаткових досліджень реальних рівнів споживання населенням місцевого зерна для коректного визначення оцінки доз та радіаційного захисту населення Іванківського району.

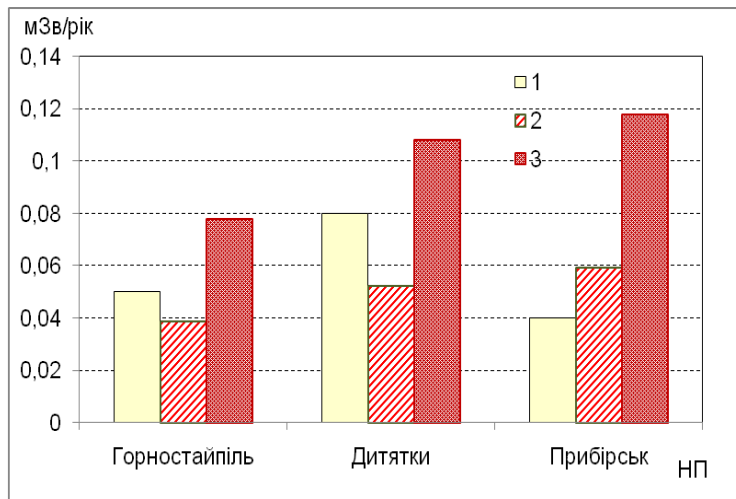


Рис. 7. Очікувана ефективна доза внутрішнього опромінення: 1 – паспортна на 2012 р., 2 – дорослого населення і 3 – дітей Іванківського району за рахунок споживання продукції із місцевого зерна

Чернігівським центром «Облдержродючість» було показано, що вапнування ґрунтів у Іванківському районі економічно ефективно тільки за умови перевезення вапна на відстань не більше 300 км з Житомирської або Чернігівської областей. На основі зроблених оцінок можна зазначити, що для зменшення вмісту  $^{90}\text{Sr}$  у продовольчому зерні, сільськогосподарські підприємства 3-ї зони радіоактивного забруднення у Іванківському районі в теперішній час повинні вносити на площі 1500 га близько 3500 тонн вапна. В обов'язковому порядку в першу чергу внесення вапна мусить бути здійснено саме на площах, де планується виробництво продовольчого зерна.

## ВИСНОВКИ

1. Проведено комплексний моніторинг забруднення  $^{90}\text{Sr}$  критичної сільськогосподарської та лісової продукції (зерна та деревини) у найбільш забруднених  $^{90}\text{Sr}$  населених регіонах України, що межують із зоною відчуження, на пізній фазі Чорнобильської аварії з метою радіаційного захисту населення та навколишнього середовища.

2. Установлено, що на період дослідження основна кількість паливних частинок південного сліду радіоактивних випадів розчинилася в ґрунті, а частка  $^{90}\text{Sr}$  в обмінній формі становить в середньому 68 %. Уперше було підтверджено дієздатність емпіричної моделі розчинення паливних частинок та прогнозні оцінки 1997–2001 рр. щодо вилугування з них  $^{90}\text{Sr}$  для пізньої фази Чорнобильської аварії залежно від кислотності ґрунтового розчину і ступеня окислення матриці паливних частинок.

3. Виявлено збільшення вмісту  $^{90}\text{Sr}$  в зерні за останні 15 років в Іванківському районі (середній рівень питомої активності  $^{90}\text{Sr}$  в зерні всіх видів культур в Іванківському районі з 2011 по 2013 р. збільшився з 19 до 45 Бк/кг). На пізній фазі аварії динаміка середньої величини  $K_H$   $^{90}\text{Sr}$  в зерні в населених пунктах Іванківського району протягом 1997–2013 рр. добре узгоджується з прогнозованими оцінками біологічної доступності цього радіонукліду, зробленими в 1997–2001 рр. на основі емпіричної моделі розчинення паливних частинок, і принципово відрізняється від експоненціально спадаючої динаміки  $K_H$  для глобальних випадів  $^{90}\text{Sr}$ .

4. Установлено, що біогенна та вертикальна міграція  $^{90}\text{Sr}$  в лісах призводить до значного зменшення вмісту радіостронцію у 20-сантиметровому кореневмісному шарі ґрунтів із низьким вмістом обмінного Кальцію, що необхідно враховувати при прогнозуванні забруднення лісової рослинності. При зменшенні вмісту в ґрунті обмінного Кальцію збільшується інтенсивність кореневого надходження  $^{90}\text{Sr}$  в деревину, водночас, його вміст у 20-сантиметровому кореневмісному шарі ґрунту зменшується за рахунок вертикальної міграції. Саме тому забруднення  $^{90}\text{Sr}$  деревини не залежить від вмісту в ґрунті обмінного Кальцію ( $< 1$  мг-екв/100 г ґрунту) при однакових рівнях початкового забруднення ґрунту радіостронцієм на пізній фазі Чорнобильської аварії.

5. Виявлено, що на всій східній частині Іванківського району Київської області із щільністю забруднення території  $^{90}\text{Sr}$  вище  $5$  кБк/м<sup>2</sup> можливе виробництво зерна та неокорованої маломірної деревини з умістом  $^{90}\text{Sr}$  вище гігієнічного нормативу для продовольчого зерна ДР–2006 (20 Бк/кг) та для дров паливних та паливних пучків ГНПАР–2005 (60 Бк/кг), що потребує істотного розширення зони 2а (обмеження на використання паливної та маломірної деревини).

6. Показано, що очікувані ефективні дози опромінення дітей та дорослого працездатного населення за рахунок споживання борошна і хліба з місцевого зерна можуть давати основний внесок у формування дози внутрішнього опромінення населення Іванківського району (близько  $0,1$  мЗв/рік від  $^{90}\text{Sr}$ ) та у 2 рази перевищувати офіційну паспортну дозу, що вказує на необхідність додаткових досліджень для встановлення реальних рівнів споживання населенням продукції з місцевого зерна.

7. Побудовані номограми залежності щільності забруднення території  $^{90}\text{Sr}$  від вмісту рухомого Кальцію в ґрунті, при якому вміст  $^{90}\text{Sr}$  в зерні та паливній деревині може перевищувати гігієнічний норматив, необхідно використовувати для оптимізації системи радіаційного контролю з метою зменшення витрат на тривалі радіохімічні вимірювання активності  $^{90}\text{Sr}$  у продукції, а також для прийняття управлінських рішень щодо відбракування або обмеження використання в Україні (переробки, цільового призначення і т.д.) продовольчого зерна та деревини.

## **СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Статті в фахових виданнях України**

1. Отрешко Л. М. Значення паливних частинок у забрудненні зернової продукції  $^{90}\text{Sr}$  в Іванківському районі Київської області / **Л. М. Отрешко**, В. О. Кашпаров, С. Є. Левчук, І. М. Малоштан // Ядерна фізика та енергетика. – 2012. – Т. 13. – № 1. – С. 89–97. *(Здобувачем отримано експериментальні дані, виконано математичну обробку, інтерпретовано результати).*

2. Отрешко Л. М. Проблеми, пов'язані із вмістом  $^{90}\text{Sr}$  в зерновій продукції Іванківського району Київської області [Електронний ресурс] / **Л. М. Отрешко**, Л. В. Йощенко, І. М. Малоштан // Електронні доповіді

НУБіП України жовтень 2012. – № 5 (34). – [13 с.]. – Режим доступу : [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Nd/2012\\_5/12olm.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Nd/2012_5/12olm.pdf) (Здобувачем отримано експериментальні дані, виконано математичну обробку, інтерпретовано результати, підготовлено матеріали до друку).

3. Отрешко Л. М. Моніторинг забруднення  $^{90}\text{Sr}$  зернової продукції в Іванківському районі Київської області / Л. М. Отрешко // Вісник аграрної науки. – 2013. – № 4. – С. 67–69.

4. Отрешко Л. М. Вміст  $^{90}\text{Sr}$  в зерні на паливних слідах чорнобильських радіоактивних випадів / **Л. М. Отрешко**, С. Е. Левчук, Л. В. Йощенко // Ядерна фізика та енергетика. – 2014. – Т. 15. – № 2. – С. 171–177. (Здобувачем отримано експериментальні дані, виконано математичну обробку, інтерпретовано результати, підготовлено матеріали до друку).

5. Содержание  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в древесине на южном топливном следе чернобыльских радиоактивных выпадений / **Л. Н. Отрешко**, М. А. Журба, А. М. Билоус, Л. В. Йощенко // Ядерна фізика та енергетика. – 2015. – Т. 16. – № 2. – С. 183–193. (Здобувачем отримано експериментальні дані, інтерпретовано результати, підготовлено матеріали до друку).

**Стаття у науковому виданні іншої держави,  
яке включено до міжнародних наукометричної бази даних**

6. Загрязнение сельскохозяйственной продукции  $^{90}\text{Sr}$  в Украине в отдаленный период после Чернобыльской аварии / В. А. Кашпаров, С. Е. Левчук, **Л. М. Отрешко**, И. М. Малоштан // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2013. – Т. 53. – № 6. – С. 639–650. (Здобувачем отримано експериментальні дані).

**Статті в інших наукових виданнях України:**

7. Кашпаров В. О. Радиологічні проблеми ведення сільськогосподарського виробництва на забрудненій в результаті Чорнобильської катастрофи території України / В. О. Кашпаров, С. В. Поліщук, **Л. М. Отрешко** // Чорнобильський науковий вісник, Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. – 2011. – № 2 (38). – С. 13–31. (Здобувача брала участь у отриманні експериментальних даних).

8. Забруднення  $^{90}\text{Sr}$  зернових культур в регіонах, прилеглих до зони відчуження Чорнобильської АЕС / **Л. М. Отрешко**, С. Е. Левчук, В. О. Кашпаров, Л. В. Йощенко // Вісник Житомирського національного агроекологічного університету – 2013. – Т. 1. – № 1 (36). – С. 281–289. (Здобувачем отримано експериментальні дані, виконано математичну обробку, інтерпретовано результати, підготовлено матеріали до друку).

**Матеріали та тези наукових доповідей:**

9. Отрешко Л. М. Забруднення зерна  $^{90}\text{Sr}$  в Іванківському районі Київської області / **Л. М. Отрешко** // Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених [«Актуальні проблеми наук про життя та природокористування»],

26–29 жовт. 2011 р.: прогр. конф. – Київ, 2011. – С. 173–174. *(Здобувачем отримано експериментальні дані, виконано математичну обробку, інтерпретовано результати, підготовлено матеріали до друку).*

10. Моніторинг забруднення зернової продукції  $^{90}\text{Sr}$  в Іванківському районі Київської області / **Л. М. Отрешко**, С. Є. Левчук, В. О. Кашпаров, І. М. Малоштан // XIX Щорічна наук. конф. Інституту ядерних досліджень, 24–27 січ. 2012 р.: тези доп. – Київ, 2012. – С. 146–147. *(Здобувачем отримано експериментальні дані, виконано математичну обробку, інтерпретовано результати, підготовлено матеріали до друку).*

11. Отрешко Л. М. Проблеми із вмістом  $^{90}\text{Sr}$  у зерні на територіях, постраждалих внаслідок аварії на ЧАЕС / **Л. М. Отрешко**, С. Е. Левчук, Л. В. Йощенко. // I Міжнарод. наук.-техн. конф. [«Современные проблемы физики, химии и биологии»] ФизХимБио – 2012, 28–30 лист. 2012 р.: тези доп. – Севастополь, 2012. – С. 122. *(Здобувачем отримано експериментальні дані, виконано математичну обробку, інтерпретовано результати, підготовлено матеріали до друку).*

12. Отрешко Л. М. Результати проведення радіологічного моніторингу забруднення  $^{90}\text{Sr}$  зернової продукції у Київській та Чернігівській областях / **Л. М. Отрешко** // XX Щоріч. наук. конф. Інституту ядерних досліджень, 28 січ.–01 лют. 2013 р.: тези доп. – Київ, 2013. – С. 187–188. *(Здобувачем отримано експериментальні дані, виконано математичну обробку, інтерпретовано результати, підготовлено матеріали до друку).*

13. Отрешко Л. М. Результати проведення радіологічного моніторингу забруднення  $^{90}\text{Sr}$  зерна у Київській та Чернігівській областях / **Л. М. Отрешко** // X Всеукраїнська наукова конференція студентів, магістрів та аспірантів [«Сучасні проблеми Екології та геотехнологій»], 10–12 квіт. 2013 р.: тези доп. – Житомир, 2013. – С. 165. *(Здобувачем отримано експериментальні дані, виконано математичну обробку, інтерпретовано результати, підготовлено матеріали до друку).*

14. Отрешко Л. М. Забруднення  $^{90}\text{Sr}$  деревини у Іванківському районі Київської області ЧАЕС / **Л. М. Отрешко** // Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, аспірантів і докторантів [«Наукові пошуки молоді у третьому тисячолітті»], 16–17 трав. 2013 р.: тези доп. – Біла Церква, 2013. – С. 4. *(Здобувачем отримано експериментальні дані, виконано математичну обробку, інтерпретовано результати, підготовлено матеріали до друку).*

15. Отрешко Л. М. Проблеми із вмістом  $^{90}\text{Sr}$  в зерновій продукції та деревині на території, що межує із зоною відчуження Чорнобильської АЕС / **Л. М. Отрешко** // II Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів [«Актуальні проблеми наук про життя та природокористування»], 16–18 жовт. 2013 р.: тези доп. – Київ, 2013. – С. 57–58. *(Здобувачем отримано експериментальні дані, виконано математичну обробку, інтерпретовано результати, підготовлено матеріали до друку).*

16. Отрешко Л. М. Результати проведення радіологічного моніторингу забруднення  $^{90}\text{Sr}$  деревини в Іванківському районі Київської області /

**Л. М. Отрешко**, С. Є. Левчук, В. О. Кашпаров, Л. В. Йощенко // XXI Щоріч. наук. конф. Інституту ядерних досліджень, 27–31 січ. 2014 р.: тези доп. – Київ, 2013. – С. 208–209. *(Здобувачем отримано експериментальні дані, виконано математичну обробку, інтерпретовано результати, підготовлено матеріали до друку).*

17. Отрешко Л. М. Проблеми із вмістом  $^{90}\text{Sr}$  у зерні Іванківського району Київської області на пізній стадії ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС/ **Л. М. Отрешко**, С. Є. Левчук, В. О. Кашпаров, Л. В. Йощенко // XXI Щоріч. наук. конф. Інституту ядерних досліджень, 27–31 січ. 2014 р.: тези доп. – Київ, 2013. – С. 209–210. *(Здобувачем отримано експериментальні дані, виконано математичну обробку, інтерпретовано результати, підготовлено матеріали до друку).*

18. Отрешко Л. М. Проблеми із вмістом  $^{90}\text{Sr}$  в зерновій продукції на суміжній із Зоною відчуження території / **Л. М. Отрешко** // Міжнар. наук. – практ. конф. [«Наука. Молодь. Екологія.»], в рамках I Всеукр. з'їзд екологів з міжнар. участю, 21–23 трав. 2014 р.: тези доп. – Житомир, 2014. – С. 149–153. *(Здобувачем отримано експериментальні дані, виконано математичну обробку, інтерпретовано результати, підготовлено матеріали до друку).*

19. Отрешко Л. М. Проблеми із вмістом  $^{90}\text{Sr}$  в паливній деревині на південному паливному сліді чорнобильських радіоактивних випадіннь / **Л. М. Отрешко**, М. А. Журба, Л. В. Йощенко // Наук.-практ. конф. [«Радіоекологія – 2015»], 24–26 квіт. 2015 р.: тези доп. – Київ, 2015. – / С. 149–154. *(Здобувачем отримано експериментальні дані, виконано математичну обробку, інтерпретовано результати, підготовлено матеріали до друку).*

## АНОТАЦІЯ

**Отрешко Л. М. Забруднення сільськогосподарської та лісової продукції  $^{90}\text{Sr}$  в регіонах, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата біологічних наук за спеціальністю 03.00.01 – радіобіологія. – Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2015.

У дисертації представлено результати радіологічного моніторингу вмісту  $^{90}\text{Sr}$  у ґрунті на території, що межує із зоною відчуження, а також актуальну інформацію щодо радіоактивного забруднення  $^{90}\text{Sr}$  продовольчого зерна та деревини у відповідності до ДР–2006 та ГНПАР–2005 (відповідно) у критичних регіонах Київської та Чернігівської областей.

Було визначено питому активність радіонуклідів у ґрунті, зерновій продукції та деревині, вмісту обмінного кальцію у ґрунті та рН ґрунтового розчину, розраховано  $K_H$  та  $K_L$   $^{90}\text{Sr}$  для зерна та деревини, отримано залежності вмісту  $^{90}\text{Sr}$  у продукції від вмісту обмінного кальцію у ґрунті та його кислотності. Також дано оцінку про можливість подальшого використання даної продукції. Крім того, проведено польовий експеримент з

вивчення ефективності контрзаходів (вапнування та внесення підвищених доз фосфорних добрив).

**Ключові слова:** Чорнобильська аварія, радіонукліди, питома активність, щільність забруднення ґрунту, паливні частинки, допустимі рівні, радіологічний моніторинг, коефіцієнт переходу, контрзаходи.

### АННОТАЦІЯ

**Отрешко Л. Н. Загрязнение сельскохозяйственной и лесной продукции  $^{90}\text{Sr}$  в регионах, которые пострадали в результате Чернобыльской катастрофы. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук по специальности 03.00.01 – радиобиология. – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, 2015.

В диссертации представлены результаты радиологического мониторинга 2011–2013 гг. по содержанию  $^{90}\text{Sr}$  в почве, сельскохозяйственной и лесной продукции на территории, граничащей с зоной отчуждения и загрязненной топливной компонентой чернобыльских радиоактивных выпадений.

Целью исследований было определить на поздней фазе аварии на ЧАЭС радиологическое загрязнение  $^{90}\text{Sr}$  сельскохозяйственной и лесной продукции на территориях с наибольшей плотностью загрязнения для прогнозирования радиационной обстановки и разработки методов радиационной защиты населения.

Была определена удельная активность радионуклидов в почве, зерновой продукции и древесине, содержание обменного кальция в почве и рН почвенного раствора, рассчитаны коэффициенты накопления ( $K_H$ ) и перехода ( $K_{П}$ )  $^{90}\text{Sr}$  для зерна и древесины, были получены зависимости содержания  $^{90}\text{Sr}$  в продукции от содержания обменного кальция в почве и его кислотности. В рамках диссертационной работы был проведен полевой эксперимент по изучению эффективности применения контрмер (известкование и внесение повышенных доз фосфорных удобрений).

На основании экспериментальных данных было установлено, что в настоящее время основная масса топливных частиц на всех исследованных полях Иванковского района растворилась,  $^{90}\text{Sr}$  перешел в обменные формы (68 %) и стал доступен для корневого поступления в растения. Полученные результаты впервые подтвердили работоспособность модели растворения топливных частиц в зависимости от кислотности почвенного раствора и степени окисления матрицы частиц, а также сделанные в 1997–1999 гг. прогнозные оценки для поздней фазы Чернобыльской аварии.

Было достоверно установлено, что биогенная и вертикальная миграция  $^{90}\text{Sr}$  в лесах приводит к значительному (более 50 %) обеднению 20-сантиметрового корнеобитаемого слоя почв при содержании обменного  $\text{Ca} < 0,25$  мг-экв/100 г почвы, что необходимо учитывать при прогнозировании загрязнения лесной растительности.

Показано, что в течение последних 15 лет происходило увеличение содержания  $^{90}\text{Sr}$  в зерне Иванковского района (средний уровень удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в зерне ржи, пшеницы и овса с 2011 по 2013 г. увеличился с 19 до 45 Бк/кг). На поздней фазе Чернобыльской аварии динамика средних величин  $K_H$   $^{90}\text{Sr}$  для зерна в населенных пунктах Иванковского района в 1997–2013 гг. хорошо согласуется с прогнозными оценками изменения биологической доступности радиостронция, выщелоченного из матрицы топливных частиц и принципиально отличается от экспоненциально спадающей зависимости динамики  $K_D$  для глобальных радиоактивных выпадений  $^{90}\text{Sr}$  после испытания ядерного оружия в атмосфере и Кыштымской аварии 1957 г. Полученные значения коэффициентов накопления  $^{90}\text{Sr}$  зерном ржи, пшеницы и овса после растворения топливных частиц, с учетом погрешностей определения, достоверно не отличаются, хорошо согласуются с полученными ранее и имеют обратно пропорциональную зависимость от содержания в почве обменного кальция.

Результаты исследований зерновой продукции показали, что на сегодняшний день на всей восточной части Иванковского района Киевской области с плотностью загрязнения территории  $^{90}\text{Sr}$  выше 5 кБк/м<sup>2</sup> может производиться зерно с содержанием данного радионуклида выше гигиенического норматива для продовольственного зерна (20 Бк/кг), а начиная с плотности загрязнения территории  $^{90}\text{Sr}$  выше 2–3 кБк/м<sup>2</sup> уже существует риск превышения гигиенического норматива содержания  $^{90}\text{Sr}$  в топливной древесине и топливных пучках / хворосте (60 Бк/кг), что требует значительно расширения зоны 2а (ограничения использования топливной древесины) в этом регионе.

Для оптимизации системы радиационного контроля в Украине с целью уменьшения затрат на долговременные и дорогостоящие радиохимические анализы содержания  $^{90}\text{Sr}$  в продукции, а также принятия управленческих решений по бракеражу или ограничению целевого использования продовольственного зерна и древесины, были построены номограммы зависимости плотности загрязнения территории  $^{90}\text{Sr}$  от содержания в почве подвижного кальция, при которых удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  в зерне и топливной древесине может превышать гигиенические нормативы.

В результате проделанной работы показано, что потребление зерновой продукции из местного зерна в пищу может вносить основной вклад в формирование ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения населения Иванковского района за счет перорального поступления  $^{90}\text{Sr}$  (более 90 % у детей и более 80 % у взрослых). При этом эффективная доза облучения детей возрастом 12–17 лет за счет потребления местного зерна может в 2 раза превышать дозу для взрослых и официальную паспортную дозу. Полученные результаты указывают на необходимость дополнительных исследований уровней реального потребления населением разного возраста местного зерна для корректных оценок эффективных доз облучения с целью радиационной защиты населения Иванковского района.

На основании полученных оценок можно отметить, что для уменьшения содержания  $^{90}\text{Sr}$  в продовольственном зерне, сельскохозяйственные предприятия 3-й зоны радиоактивного загрязнения в Иванковском районе в настоящее время должны вносить на площади 1500 га около 3500 тон извести.

**Ключевые слова:** Чернобыльская авария, радионуклиды, удельная активность, плотность загрязнения почвы, топливные частицы, допустимые уровни, радиологический мониторинг, коэффициент перехода, контрмеры.

## SUMMARY

**Otreshko L. N. Contamination of agricultural and forest products by  $^{90}\text{Sr}$  in areas affected by Chernobyl accident. – Manuscript.**

Thesis is submitted for the scientific degree of the candidate of biological sciences on specialty 03.00.01 – radiobiology. – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kiev, 2015.

The results of the radiological monitoring of the  $^{90}\text{Sr}$  content in the soil on the territory bordering on the Exclusion Zone are presented in the thesis. Also the up-to-date information on the levels of the radioactive contamination of food grains and firewood by  $^{90}\text{Sr}$  and these levels compliance with the PL-2006 and SSSAR-2005, respectively, in the critical areas of Kyiv and Chernihiv regions are presented.

The specific activity of radionuclides in the soil, grain and wood products, the content of the exchangeable calcium in the soil and pH of the soil solution were determined, the transfer and accumulation factors of  $^{90}\text{Sr}$  to grain and wood were calculated, the dependences of the  $^{90}\text{Sr}$  content in the products on the content of the exchangeable calcium in the soil and on its acidity were obtained. Also the possibility of future use of these products was assessed. In addition the field experiment on the research of the effectiveness of countermeasures (liming and increasing the amounts of phosphate fertilizers) was conducted.

**Keywords:** Chernobyl accident, radionuclides, specific activity, soil contamination density, fuel particles, permissible levels, radiological monitoring, transfer factor, countermeasures.