

**ДОВГОТРИВАЛА ДИНАМІКА НАДХОДЖЕННЯ  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  В  
ЗЛАКОВІ ТРАВИ З КОНТРАСТНИХ ЗА ВЛАСТИВОСТЯМИ ҐРУНТІВ**

**Ю. О. ІВАНОВ**, доктор біологічних наук,

**Ю.В. ХОМУТІНІН**, доктор сільськогосподарських наук

*Український НДІ сільськогосподарській радіології НУБіП України*

*В умовах модельно-польового і вегетаційного дослідів оцінено параметри динаміки коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$ , внесених у ґрунт у початковій водорозчинній формі, багаторічними злаковими травами з контрастних за фізико-хімічними властивостями і гранулометричним складом ґрунтів за часу депонування радіонуклідів у ґрунтах від 0.5 до 25 років. Виявлено принципові відмінності довготривалої динаміки надходження  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  з ґрунту в рослини - значно вищі коефіцієнти накопичення  $^{90}\text{Sr}$  та повільніше їх зниження в часі. Обговорюється роль властивостей ґрунтів у формуванні динаміки коефіцієнтів накопичення, порівняння експериментальних і модельних прогнозних оцінок довготривалої динаміки коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  рослинами.*

**Ключові слова:**  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , коефіцієнти накопичення, довготривала динаміка, контрастні ґрунти, модельні прогнозні оцінки.

З часом біологічна доступність радіонуклідів рослинам з ґрунту знижується, при цьому параметри часової залежності залежать від властивостей ґрунту і радіоізотопів різних хімічних елементів. Біологічна доступність рослинам  $^{137}\text{Cs}$  знижується з часом швидше, ніж  $^{90}\text{Sr}$ . Тому одним з важливих радіоекологічних завдань на пізній фазі аварії є оцінка динаміки надходження радіонуклідів у рослини. Зміна або постійність

параметрів надходження радіонуклідів у ланці ґрунт-рослина зумовлює адекватність прогнозних оцінок їх біологічної доступності.

У зв'язку із специфікою довготривалої динаміки біологічної доступності радіонуклідів, використання кількісних характеристик динаміки перерозподілу радіонуклідів у компонентах фітоценозів, отриманих на ранній і середній фазах аварії, для розрахунку прогнозних оцінок надходження  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  у рослини на пізній фазі аварії зумовлює високий ризик одержання некоректних оцінок

Зрозуміло, що для коректного використання експериментальних даних і залежностей, які характеризують довготривалу динаміку біологічної доступності радіонуклідів (у першу чергу,  $^{90}\text{Sr}$ ) на паливних слідах випадань ЧАЕС [6, 10], винятково важливе значення мають характеристики довготривалої динаміки біологічної доступності радіонуклідів, інтродукованих у ґрунт у початковій водорозчинній формі. Одержання і використання таких оцінок дозволяє: коректне планування й реалізацію реабілітаційних заходів на відселених територіях, а також підтримку прийняття адекватних управлінських рішень з планування й реалізації заходів щодо мінімізації наслідків аварії на ЧАЕС.

**Метою статті** є узагальнення отриманих авторами результатів вивчення багаторічної динаміки надходження  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$ , внесених у початковій водорозчинній формі в контрастні за властивостями ґрунти, в злакові лучні трави при початковому розподілі радіонуклідів у верхньому 20-сантиметровому шарі ґрунту.

**Матеріали і методи дослідження.** Для вивчення і оцінки надходження  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  з контрастних за властивостями ґрунтів використано результати модельно-польових експериментів на майданчиках експериментального полігону УкрНДІСГР у Зоні відчуження ЧАЕС [8], а також результати вегетаційних експериментів з свіжовнесеними в ґрунт радіонуклідами. У 1988 році на полігоні був закладений модельно-польовий експеримент з використанням металевих ящиків без дна розміром 100x100x50 см, у які

поміщали ґрунти, завезені з різних регіонів України, нижчі горизонти представлені пухким піском. Повторність чотириразова. Радіонукліди в початковій водорозчинній формі були розподілені у верхньому 20-сантиметровому горизонті ґрунтів. Упродовж 1988-1998 рр. і в 2010 р. ґрунти в ящиках перекопували на глибину 20 см. Характеристика ґрунтів наведена в табл.1. Фізико-хімічні властивості ґрунтів визначали стандартними методами [3, 5], їх гранулометричний склад - методом лазерної гранулометрії з використанням аналізатора FRITSCH Analysette 22 COMFORT.

Міграцію радіонуклідів у системі ґрунт-рослина вивчали з використанням суміші багаторічних злакових трав: тимофіївки лучної (*Phleum pratense L.*), вівсяниці лучної (*Festuca pratensis HUDS.*) і грястиці збірної (*Dactylis glomerata L.*).

Питому активність радіонуклідів у зразках рослин визначали загальноприйнятими методами -  $^{137}\text{Cs}$  - гамма-спектрометричним,  $^{90}\text{Sr}$  - бета-спектрометричним [2] і радіохімічними методами [9].

Як показник біологічної доступності радіонуклідів рослинам використовували коефіцієнти накопичення радіонуклідів (CR - concentration ratio), рівні відношенню питомої активності радіонуклідів у повітряно-сухий масі рослин до питомої активності радіонуклідів у 20-сантиметровому горизонті ґрунту.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Експериментальні оцінки багаторічної динаміки коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  з контрастних за властивостями ґрунтів у лучні трави наведено в табл. 2 і 3.

Характеристики надходження  $^{90}\text{Sr}$  в рослини суттєво відрізняються від таких для  $^{137}\text{Cs}$ . В середньому за 25 років депонування радіонуклідів у ґрунтах значення коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  рослинами в 77 разів перевищують такі для  $^{137}\text{Cs}$ . Для контрастних за властивостями ґрунтів співвідношення коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  в різні роки варіює в межах 10 - 400 разів.

Межі коливань коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  рослинами залежно від фізико - хімічних властивостей і гранулометричного складу ґрунтів становлять в середньому за роками 38 разів, при варіюванні від 32 до 46 разів. Максимальні значення коефіцієнтів накопичення виявлені для ґрунтів легкого, а мінімальні - для ґрунтів важкого механічного складу.

1. Фізико-хімічні властивості і механічний склад ґрунтів

№ пп.	Ґрунт	pH <sub>KCl</sub>	Гумус, %	Ca <sub>обм</sub> мг-екв/ 100 г	K <sub>2</sub> O <sub>рухл</sub> мг/кг	Вміст ф.з. глини, %
П1	Дерново-підзолистий рихлопіщаний	5.1	1.3	1.6	50	4.9
П2	Слабогумусований пісок (рихлопіщаний)	5.2	0.6	1.0	23	3.9
П3	Дерново-підзолистий супіщаний	5.4	1.6	2.2	41	11.6
П4	Дерново-підзолистий легкосуглинковий	4.8	2.2	6.8	169	31.6
П5	Світло-сірий лісовий зв'язнопіщаний	6.8	1.0	2.4	51	5.4
П6	Темно-сірий лісовий легкосуглинковий	6.9	2.8	8.0	207	20.8
П7	Дерново-підзолистий зв'язнопіщаний	6.8	3.8	6.5	157	8.1
П8	Дерново-підзолистий зв'язнопіщаний	4.8	1.1	2.0	71	5.3
П9	Дерново-підзолистий середньосуглинковий	4.8	2.9	5.7	140	32.9
П10	Чорнозем південний важкосуглинковий	7.0	2.3	10.7	267	42.7
П11	Лугово-чорноземний важкосуглинковий	7.0	4.0	12.4	314	43.4
П12	Чорнозем реградований середньосуглинковий	5.7	3.5	11.2	141	33.6
П13	Темно-сірий лісовий середньосуглинковий	5.2	3.1	12.0	177	37.4
П14	Чорнозем типовий важкосуглинковий	6.2	3.1	13.6	178	42.8
П15	Чорнозем типовий середньосуглинковий	5.2	5.0	12.8	281	32.4

Одночасно, розмах значень коефіцієнтів накопичення  $^{137}\text{Cs}$  рослинами залежно від фізико-хімічних властивостей і гранулометричного складу ґрунтів істотно вищий і становить у середньому за роками 72 рази. Виявлено зниження кратності відмінностей коефіцієнтів накопичення за роками від 144 до 60 разів. Як і для  $^{90}\text{Sr}$  максимальні значення коефіцієнтів накопичення були на ґрунтах легкого, а мінімальні - на ґрунтах важкого механічного складу.

Аналіз експериментальних даних багаторічної динаміки надходження  $^{90}\text{Sr}$  в злакові трави показує досить повільне його зниження в часі. Коефіцієнти накопичення  $^{90}\text{Sr}$  багаторічними травами з ґрунтів змінювалися впродовж 25 років у 1.7 - 6 разів залежно від їх властивостей, або в середньому знижувалися в 3.3 раза. В ґрунтах важкого механічного складу коефіцієнти накопичення знижуються в 3 - 6 разів, в ґрунтах легкого механічного складу – в 1.7 – 2.9 раза.

Аналіз експериментальних даних багаторічної динаміки надходження  $^{137}\text{Cs}$  в злакові трави показує більше його зниження в часі. Коефіцієнти накопичення  $^{137}\text{Cs}$  багаторічними травами з ґрунтів змінювались протягом 25 років залежно від властивостей ґрунтів у 3 - 62 рази, або в середньому знижувалися в 20 разів. У ґрунтах важкого механічного складу коефіцієнти накопичення  $^{137}\text{Cs}$  знижуються в 6 - 62 разів, а в ґрунтах легкого механічного складу - в 3 - 25 разів.

Безумовно важливими є отримані результати відносно невеликого варіювання значень коефіцієнтів накопичення обох радіонуклідів для кожного конкретного ґрунту протягом 22 – 25 років депонування радіонуклідів в ґрунтах. Варіювання коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  рослинами становить 5-75 % від його середньої величини за вказаний період для конкретного ґрунту. Аналогічна величина для  $^{137}\text{Cs}$  становить 20-75 %. Невелике варіювання значень коефіцієнтів накопичення у цей період (на пізній фазі аварії) можна пояснити відповідним варіюванням метеорологічних умов упродовж вегетаційних періодів у вказані роки.

2. Динаміка коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  багаторічними травами, (Бк/кг пов.-сухої маси)/( Бк/кг ґрунту)

Варіант	Ґрунт	Час знаходження радіонукліда в ґрунті, роки					
		0.5	1.5	22	23	24	25
1-2	Слабогумусований пісок (рихлопіщаний)	59.3±10.5	Не визн.*	16.4±2.5	22.2±4.4	23.0±3.4	17.0±3.4
1-3	Дерново-підзолистий супіщаний	6.6±1.4	6.4±1.1	3.5±0.5	3.4±1.0	2.2±0.3	3.1±0.8
1-4	Дерново-підзолистий легкосуглинковий	3.2±0.6	4.0±0.6	0.75±0.11	1.4±0.4	1.6±0.2	1.4±0.3
1-5	Світло-сірий лісовий зв'язнопіщаний	7.4±1.7	5.9±1.0	6.2±0.9	4.6±1.4	3.1±0.5	4.0±1.0
1-6	Темно-сірий лісовий легкосуглинковий	2.4±0.4	2.3±0.3	Не визн.	0.74±0.22	0.49±0.07	0.62±0.15
1-7	Дерново-підзолистий зв'язнопіщаний	1.6±0.5	2.0±0.4	0.68±0.10	0.48±0.14	0.45±0.07	0.55±0.13
1-8	Дерново-підзолистий зв'язнопіщаний	11.9±2.7	5.5±0.8	4.3±0.6	7.8±2.3	8.4±1.3	6.8±1.5
1-9	Дерново-підзолистий середньосуглинковий	3.0±0.7	2.1±0.4	1.3±0.2	1.6±0.5	1.0±0.2	1.4±0.4
1-10	Чорнозем південний важкосуглинковий	2.0±0.5	Не визн.	0.66±0.10	0.66±0.20	0.65±0.1	0.59±0.16
1-11	Лугово-чорноземний важкосуглинковий	2.0±0.5	1.6±0.3	0.52±0.08	0.57±0.17	0.50±0.07	0.41±0.09
1-12	Чорнозем реградований середньосуглинковий	2.2±0.5	2.0±0.4	0.83±0.12	0.70±0.21	0.7±0.11	0.68±0.16
1-13	Темно-сірий лісовий середньосуглинковий	3.2±0.8	1.8±0.4	0.77±0.12	0.77±0.23	0.77±0.12	0.57±0.13
1-14	Чорнозем типовий важкосуглинковий	1.7±0.4	Не визн.	0.58±0.09	0.55±0.16	0.53±0.08	0.56±0.13
1-15	Чорнозем типовий середньосуглинковий	3.3±0.8	2.2±0.5	0.42±0.06	0.58±0.17	0.52±0.08	0.550.13

- Не визначали

3. Динаміка коефіцієнтів накопичення  $^{137}\text{Cs}$  багаторічними травами, (Бк/кг пов.-сухої маси)/( Бк/кг ґрунту)

Варіант	Ґрунт	Час знаходження радіонукліда в ґрунті, роки					
		0.5	3	22	23	24	25
2-1	Дерново-підзолистий рихлопіщаний	1.6±0.19	0.96±0.17	0.17±0.22	0.17±0.05	0.19±0.07	Не визн.
2-2	Слабогумусований пісок (рихлопіщаний)	5.9±0.7	1.03±0.17	0.21±0.32	0.22±0.07	0.31±0.11	Не визн.
2-3	Дерново-підзолистий супіщаний	1.2±0.15	0.54±0.09	0.090±0.13	0.072±0.011	0.047±0.019	0.086±0.026
2-4	Дерново-підзолистий легкосуглинковий	0.50±0.06	0.17±0.07	0.0081±0.004	0.016±0.002	0.0080±0.0024	0.0099±0.004
2-5	Світло-сірий лісовий зв'язнопіщаний	0.82±0.08	0.37±0.15	0.10±0.06	Не визн.	0.049±0.015	0.096±0.029
2-6	Темно-сірий лісовий легкосуглинковий	0.050±0.02	Не визн.	0.0083±0.004	0.012±0.004	0.017±0.005	0.027±0.006
2-7	Дерново-підзолистий зв'язнопіщаний	0.071±0.02	0.024±0.01	0.018±0.005	0.015±0.003	0.011±0.004	0.012±0.004
2-8	Дерново-підзолистий зв'язнопіщаківий	0.17±0.03	0.22±0.09	0.061±0.018	Не визн.	0.053±0.016	0.076±0.023
2-9	Дерново-підзолистий середньосуглинковий	0.27±0.03	0.11±0.08	0.0094±0.0028	0.014±0.004	0.005±0.0016	0.018±0.0025
2-10	Чорнозем південний важкосуглинковий	0.041±0.02	0.0091±0.006	0.0087±0.0026	Не визн.	0.0050±0.0017	0.0088±0.0035
1-11	Лугово-чорноземний важкосуглинковий	0.058±0.006	0.0048±0.0024	0.0063±0.0031	0.012±0.003	0.0053±0.0012	0.0071±0.0028
1-14	Чорнозем типовий важкосуглинковий	0.084±0.008	0.0083±0.0050	0.0081±0.0024	Не визн.	0.0077±0.0027	0.0063±0.0025
1-15	Чорнозем типовий середньосуглинковий	0.072±0.007	0.022±0.017	0.0044±0.0018	0.011±0.002	0.0057±0.0023	0.0039±0.0016

- Не визначали



Для отримання прогностичних оцінок переходу радіонуклідів у ланці "грунт - рослина" і оцінки загальних тенденцій динаміки цього процесу можливо використання регресивних залежностей, що описують цю динаміку.

Раніше були опубліковані результати оцінки багаторічної динаміки надходження  $^{137}\text{Cs}$  в різні сільськогосподарські рослини на слідах випадань ЧАЕС з використанням 2-експоненціальної моделі виду [7, 11]:

$$y = a \cdot e^{-b \cdot t} + (1-a) \cdot e^{-c \cdot t} \quad (1)$$

де  $y$  - коефіцієнт переходу радіонукліду в рослини, що нормований відносно його максимального значення ( $\text{КП}_i/\text{КП}_i(\text{макс})$ );  $a, b, c$  - чисельні параметри;  $t$  - час, що минув після аварії.

Використання наведеної моделі має як переваги, так і недоліки. До перших належить можливість виділення декількох часових періодів зміни значень коефіцієнтів переходу радіонукліда в ланці "грунт - рослина". Одночасно, коефіцієнти накопичення радіонукліда рослинами (вміст біологічно доступних форм радіонукліда в ґрунті) не можуть знижуватися до нульових значень, що припускає використання наведеної моделі (1), зрозуміло, окрім випадку повного фізичного розпаду радіонукліда. У зв'язку з цим для опису і оцінки багаторічної динаміки зміни коефіцієнтів накопичення  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  рослинами нами в роботі використана така експоненціальна модель:

$$CR(t) = CR_0 \cdot e^{-\beta \cdot t} + CR_\infty, \quad (2)$$

де  $CR_\infty$  - гранична нижня межа коефіцієнта накопичення при  $t \rightarrow \infty$ ;

$CR_0 + CR_\infty$  - максимальне значення коефіцієнта накопичення в момент  $t=0$ ;

$\beta$  - інтенсивність зниження коефіцієнта накопичення, 1/рік;

$t$  - час з моменту внесення (випадання) радіонуклідів.

Використання моделі (2) дозволяє оцінити теоретичні значення нижніх граничних значень коефіцієнтів накопичення радіонукліда в конкретному ґрунті при його довготривалому депонуванні.

Для оцінки параметрів цієї моделі були використані наведені вище результати спостережень. Результати обробляли методами статистичного аналізу (відновлення залежностей) [1, 4] з використанням пакету програм "Статистика". Отримані оцінки параметрів моделі (2) для контрастних за властивостями ґрунтів показано в табл. 4 і 5 з вказівкою відповідних похибок на рівні  $\pm\sigma$ .

Результати дисперсійного аналізу регресії показали, що частина дисперсії, що пояснюється моделлю, суттєво перевищує частину дисперсії, що пов'язана із дією випадкових факторів (див. табл. 4, 5). Отримані оцінки дозволяють зробити висновок щодо достатньо адекватної апроксимації динаміки залежності коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  рослинами використаною залежністю. Приклади відповідності спостережуваних коефіцієнтів накопичення моделі (2) для деяких типів ґрунтів показані на рисунку.

Отримані оцінки параметрів регресійної залежності дозволили оцінити теоретичну кратність зниження значень коефіцієнтів накопичення радіонуклідів злаковими травами з контрастних за властивостями ґрунтів. Як критерій оцінки використали співвідношення максимального значення коефіцієнта накопичення радіонуклідів ( $CR_0+CR_\infty$  при  $t=0$ ) і нижнього можливого значення коефіцієнта накопичення радіонуклідів ( $CR_\infty$  при  $t \rightarrow \infty$ ). Отримані оцінки підтвердили висновки, які були зроблені для динаміки коефіцієнта накопичення радіонуклідів на підставі експериментальних результатів. Значення теоретичної кратності зниження коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  злаковими травами з контрастних за властивостями ґрунтів становить, в середньому, 4.1 раза при варіюванні для різних ґрунтів - від 2.1 до 8.2 раза. Аналогічні оцінки для  $^{137}\text{Cs}$  істотно вищі - у середньому, 24.7 раза при варіюванні для різних ґрунтів від 4.5 до 92 разів.

4. Оцінки параметрів моделі (2), що описує залежність коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  рослинами на ґрунтах різних типів

Варіант	Ґрунт	$CR_0$	$\beta$	$CR_\infty$	Пояснена доля дисперсії
1-2	Слабогумусований пісок рихлопіщаний	34.5.1±1.1	0.12±0.03	17.7±1.1	0.721
1-3	Дерново-підзолистий супіщаний	4.74±0.19	0.11±0.02	2.32±0.05	0.792
1-4	Дерново-підзолистий легкосуглинковий	3.02±0.23	0.14±0.07	0.86±0.19	0.607
1-5	Світло-сірий лісовий зв'язнопіщаний	3.67±0.42	0.10±0.03	3.43±0.14	0.470
1-6	Темно-сірий лісовий легкосуглинковий	2.20±0.02	0.12±0.03	0.41±0.01	0.956
1-7	Дерново-підзолистий зв'язнопіщаний	1.85±0.05	0.10±0.02	0.35±0.01	0.798
1-8	Дерново-підзолистий зв'язнопіщачковий	5.23±1.53	0.13±0.03	5.23±0.32	0.992
1-9	Дерново-підзолистий середньосуглинковий	2.07±0.18	0.26±0.05	1.16±0.02	0.785
1-10	Чорнозем південний важкосуглинковий	1.52±0.01	0.20±0.03	0.63±0.01	0.991
1-11	Лугово-чорноземний важкосуглинковий	1.69±0.02	0.27±0.03	0.49±0.01	0.973
1-12	Чорнозем реградований середньосуглинковий	1.77±0.02	0.27±0.03	0.75±0.01	0.987
1-13	Темно- сірий лісовий середньосуглинковий	2.91±0.09	0.33±0.02	0.72±0.01	0.922
1-14	Чорнозем типовий важкосуглинковий	1.28±0.01	0.20±0.03	0.54±0.01	0.987
1-15	Чорнозем типовий середньосуглинковий	3.33±0.06	0.24±0.01	0.46±0.01	0.936

5. Оцінки параметрів моделі (2), що описує залежність коефіцієнтів накопичення  $^{137}\text{Cs}$  рослинами на ґрунтах різних типів

Варіант	Ґрунт	$CR_0$	$\beta$	$CR_\infty$	Пояснена доля дисперсії
2-1	Дерново-підзолистий рихлопіщаний	1.61±0.003	0.24±0.01	0.17±0.01	0.998
2-2	Слабогумусований пісок рихлопіщаний	8.46±0.05	0.80±0.01	0.24±0.01	0.993
2-3	Дерново-підзолистий супіщаний	1.35±0.03	0.35±0.01	0.068±0.001	0.978
2-4	Дерново-підзолистий легкосуглинковий	0.61±0.01	0.45±0.01	0.011±0.001	0.921
2-5	Світло-сірий лісовий зв'язнопіщаний	0.91±0.03	0.36±0.02	0.061±0.001	0.798
2-6	Темно-сірий лісовий легкосуглинковий	0.056±0.001	0.80±0.02	0.012±0.001	0.645
2-7	Дерново-підзолистий зв'язнопіщаний	0.081±0.003	0.69±0.03	0.014±0.001	0.783
2-8	Дерново-підзолистий зв'язнопіщаківий	0.161±0.008	0.20±0.04	0.062±0.003	0.897
2-9	Дерново-підзолистий середньосуглинковий	0.315±0.004	0.37±0.01	0.007±0.001	0.972
2-10	Чорнозем південний важкосуглинковий	0.058±0.003	1.04±0.05	0.0065±0.0001	0.572
1-11	Лугово-чорноземний важкосуглинковий	0.084±0.007	1.0±0.1	0.0063±0.0001	0.985
1-14	Чорнозем типовий важкосуглинковий	0.19±0.01	1.78±0.05	0.0073±0.0001	0.998
1-15	Чорнозем типовий середньосуглинковий	0.088±0.002	0.57±0.04	0.0055±0.0001	0.962

Зіставлення середніх значень експериментально отриманих оцінок коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  рослинами для 22 - 25 років депонування радіонукліда в ґрунтах з граничними значеннями коефіцієнтів накопичення ( $CR_{\infty}$ ) показало, що для частини оцінюваних ґрунтів вказані середні значення значимо не відрізняються від нижньої можливої величини коефіцієнта накопичення радіонукліда ( $CR_{\infty}$ ) рослинами. Одночасно, для ряду ґрунтів середні значення експериментальних оцінок коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  рослинами перевищують нижню можливу величину коефіцієнта накопичення радіонукліда ( $CR_{\infty}$ ) від 1.3 (дерново-підзолистий супіщаний, світло-сірий лісовий зв'язнопіщаний, дерново-підзолистий зв'язнопіщаний ґрунти) до 1.5-1.6 раз (дерново-підзолистий легкосуглинковий, темно-сірий лісовий легкосуглинковий та дерново-підзолистий зв'язнопіщаний ґрунти).

Аналогічне зіставлення середніх значень експериментально отриманих оцінок коефіцієнтів накопичення  $^{137}\text{Cs}$  рослинами для 22 - 25 років депонування радіонукліда в ґрунтах з граничними значеннями коефіцієнтів накопичення ( $CR_{\infty}$ ) показало, що з урахуванням погрішностей порівнюваних величин достовірні відмінності відсутні. Це означає, що через 22-25 років депонування радіонукліда в оцінюваних ґрунтах значення коефіцієнтів накопичення  $^{137}\text{Cs}$  рослинами досягають теоретичної мінімальної межі, подальша зміна (варіювання в невеликих межах) може реалізовуватися, в першу чергу, за рахунок варіювання гідрометеорологічних умов. Зрозуміло, що йдеться про відсутність застосування будь-яких контрзаходів.

Таким чином, для частки ґрунтів показана можливість подальшого невеликого зниження в часі (у 1.3 - 1.6 раз) значень коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  рослинами, для  $^{137}\text{Cs}$  таких можливостей не виявлено.

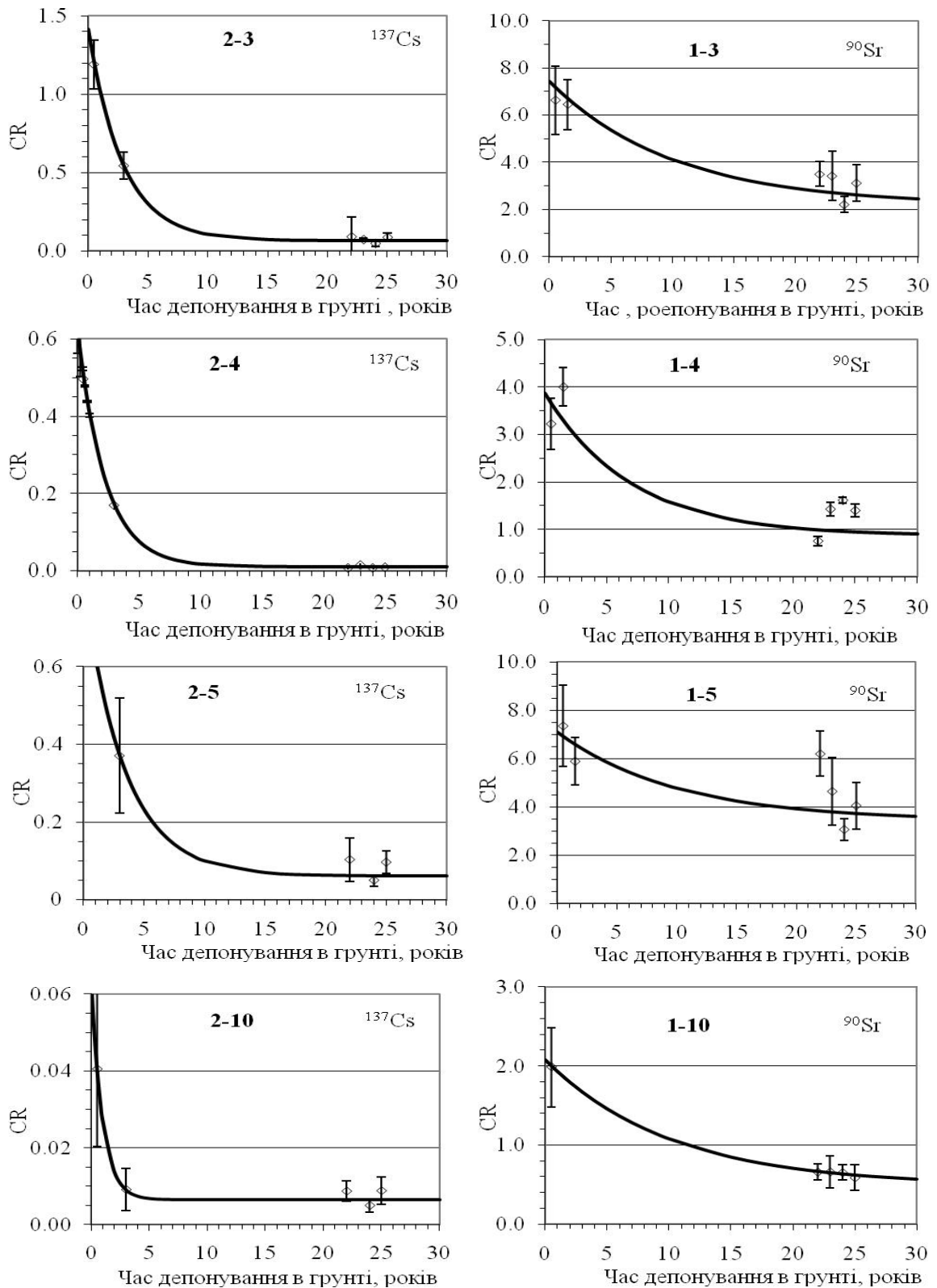


Рис. Апроксимація багаторічної динаміки зміни коефіцієнтів накопичення  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  рослинами з контрастних за властивостями ґрунтів з використанням моделі:

$CR(t) = CR_0 \cdot e^{-\beta \cdot t} + CR_\infty$ : 1-3, 2-3 - дерново-підзолистий супіщаний; 1-4, 2-4 - дерново-підзолистий легкосуглинковий; 1-5, 2-5 - світло-сірий лісовий зв'язнопіщаний; 1-10, 2-10 - чорнозем південний важкосуглинковий

## Висновки

1. В умовах модельно-польового і вегетаційного експериментів оцінено параметри динаміки коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$ , внесених у ґрунт в початковій водорозчинній формі, багаторічними злаковими травами з контрастних за фізико-хімічними властивостями і гранулометричним складом ґрунтів при часі депонування радіонуклідів у них від 0.5 року до 25 років.
2. Визначено істотні відмінності накопичення радіонуклідів рослинами - в середньому за 25 років депонування в ґрунтах коефіцієнти накопичення  $^{90}\text{Sr}$  в 77 разів перевищують їх для  $^{137}\text{Cs}$ . Для контрастних за властивостями ґрунтів співвідношення коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  в різні роки варіює в межах 10 - 400 разів.
3. Залежно від фізико-хімічних властивостей і гранулометричного складу ґрунтів межі коливань коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  рослинами становлять в середньому за роками 38 разів, при варіюванні від 32 до 46 разів,  $^{137}\text{Cs}$  - у середньому за роками 72 рази, при варіюванні від 144 до 60 разів. Для обох радіонуклідів максимальні значення коефіцієнтів накопичення відзначені для ґрунтів легкого, а мінімальні - для ґрунтів важкого механічного складу.
4. Зниження в часі надходження в рослини  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  суттєво відрізняється. Цей процес для  $^{90}\text{Sr}$  є досить повільним - коефіцієнти накопичення  $^{90}\text{Sr}$  багаторічними травами змінюються протягом 25 років у середньому в 3.3 раза при варіюванні зниження в ґрунтах важкого механічного складу в 3 - 6 разів, а легкого - в 1.7 - 2.9 раза. На відміну від  $^{90}\text{Sr}$  коефіцієнти накопичення  $^{137}\text{Cs}$  травами з ґрунтів змінюються впродовж 25 років у середньому в 20 разів при варіюванні зниження в ґрунтах важкого механічного складу в 6 - 62 разів, а легкого - в 3 - 25 разів.
5. Зіставлення експериментальних і модельних прогнозних оцінок довготривалої динаміки надходження радіонуклідів у лучні трави з контрастних за властивостями ґрунтів показало, що після 22-25 років депонування в ґрунті у 6 ґрунтах з 15 оцінюваних виявлена можливість

подальшого невеликого зниження в часі (у 1.3 - 1.6 раза) значень коефіцієнтів накопичення  $^{90}\text{Sr}$  рослинами, для  $^{137}\text{Cs}$  таких можливостей не виявлено.

### Список літератури

1. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Исследование зависимостей / С.А.Айвазян, И.С.Енюков, Л.Д.Мешалкин – М.: Финансы и статистика, 1985.- 488 с.
2. Активность, удельная активность и объемная активность бета- излучающих радионуклидов в счетных образцах объектов технологических и природных сред. Методика выполнения измерений с использованием спектрометра энергий бета-излучения сцинтиляционного типа СЕБ-01.-МИ-12-05-99.- Разработчики: Кравченко Н.И., Коваленко Г.Д., Лихтарев И.А. - ГНПО "Метрология", Украинский НИИ экологических проблем, Институт радиационной защиты АТН Украины. - 69 с..
3. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Аринушкина Е.В. – М.: Изд. МГУ, 1970– 488 с..
4. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ / А.Афифи, С.Эйзен. – М.: Мир, 1992.– 488с..
5. Вадюнина А. Ф. Методы исследования физических свойств почв.— 3-е изд., перераб. и доп. / А. Ф.Вадюнина, З. А.Корчагина – М.: Агропромиздат, 1986. – 176 с..
6. Значення паливних частинок у забрудненні зернової продукції  $^{90}\text{Sr}$  в Іванківському районі Київської області / [Отрешко Л.М., Кашпаров В.О., Левчук С.Е. та ін.] // Ядерна фізика та енергетика. – 2012, – Т.13, № 1. – С.89-97.
7. Іванов Ю.О. Динаміка перерозподілу радіонуклідів у ґрунтах і рослинності // Чорнобиль. Зона відчуження. (Збірник наукових праць) / Іванов Ю.О. – К.: Наукова думка, 2001. – С.47-76.



8. Общие закономерности загрязнения продукции растениеводства на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС / Бондарь П.Ф., Лошилов Н.А., Дутов А.И. и др. // Проблемы сельскохозяйственной радиологии: Сб. науч. тр.; / под ред Н.А. Лошилова. – К.: – УкрИНТЭИ – 1991. – С. 88 – 105.
9. Павлоцкая Ф.И. Основные принципы радиохимического анализа объектов природной среды и методы определения радионуклидов стронция и трансурановых элементов / Ф.И. Павлоцкая // Журн. аналит. химии. – 1997. – Т 52, № 2. – С. 126–143.
10. Dissolution kinetics of particles of irradiated Chernobyl nuclear fuel: influence of pH and oxidation state on the release of radionuclides in contaminated soil of Chernobyl / Kashparov V.A., Protsak V.P., Ahamdach N. [et al.] // Journal of Nuclear Materials. – 2000. – Vol. 279. – P.225-233.
11. Experimental Substantiation and Parametrization of the Model Describing  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  Behavior in a Soil-Plant System / Prister B.S., Barjakhtar V.G., Perepelyatnikova L.V. [et al.]// Environ.Sci.&Pollut.Res.. Spesial Issue. – 2003. – 1. – P.126-136.

**Долговременная динамика поступления  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в злаковые травы из контрастных по свойствам почв**  
Ю.А.Иванов, Ю.В.Хомутигин

В условиях модельно-полевого и вегетационного экспериментов оценены параметры динамики коэффициентов накопления  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , внесенных в почву в исходной водорастворимой форме, многолетними злаковыми травами из контрастных по физико-химическим свойствам и гранулометрическому составу почв при времени депонирования радионуклидов в почвах от 0.5 до 25 лет. Отмечены принципиальные различия долговременной динамики поступления  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  из почв в растения - значительно более высокие значения коэффициентов накопления  $^{90}\text{Sr}$ , более медленное их снижение во времени. Обсуждается роль свойств почв в формировании динамики коэффициентов накопления, сравнение экспериментальных и модельных прогнозных оценок долговременной динамики коэффициентов накопления  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  растениями.

*Ключевые слова:*  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , коэффициенты накопления, долговременная динамика, контрастные почвы, модельные прогнозные оценки.

**Long-term dynamics of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  intake to cereal grasses from soils, contrasted by properties**  
Yu.A. Ivanov, Yu.V. Khomutinin

Parameters of dynamics of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  concentration ratio to permanent grasses from soils, contrasted by their physical-and-chemical properties, and granulometric composition, have been analysed as a results of model-field and greenhouse experiments. Radionuclides have been introduced in soils in initial water-soluble form, period of its deposition in soils was from 0.5 to 25 years. Principal differences of long-term dynamics parameters of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  transfer from soil to plants have noted, including significantly higher values of  $^{90}\text{Sr}$  concentration ratio as well as much more slow its decreasing in time. Role of soil properties in formation of long-term dynamics of radionuclides concentration ratio as well as comparison of experimental and model forecast assessments of radionuclides concentration ratio dynamics are discussed.

*Key words:*  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , concentration ratio, long-term dynamics, contrasted soils, model forecast assessments.