

І. М. Малоштан*, С. В. Поліщук, Ю. В. Хомутінін

*Український науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіології
Національного університету біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна*

*Відповідальний автор: radiometry@quality.ua

**ДИНАМІКА КОЕФІЦІЄНТІВ ПЕРЕХОДУ ТА НАКОПИЧЕННЯ ^{137}Cs
ТРАВ'ЯНИСТОЮ РОСЛИННІСТЮ ПРИРОДНИХ ЛУКІВ НА ТОРФ'ЯНО-БОЛОТНИХ
ГРУНТАХ У ПОЧАТКОВИЙ ПЕРІОД ПІСЛЯ ІМІТАЦІЇ РАДІОАКТИВНИХ ВИПАДАНЬ**

Представлено результати по вивченню динаміки біологічної доступності привнесеного зразкового радіоактивного розчину ^{137}Cs на торф'яно-болотному ґрунті в умовах дрібноділянкового польового досліду. Установлено початкові значення коефіцієнтів накопичення і переходу ($\text{КН}(t)$ і $\text{КП}(t)$) ^{137}Cs у надземну фітомасу природної лугової трав'янистої рослинності в природних ґрунтово-кліматичних умовах Західного Полісся. На основі даних польового та лабораторних дослідів оцінено значення швидкого (T_e^f) і повільного (T_e^s) екологічних періодів напівзменшення $\text{КН}/\text{КП}$ радіоактивного цезію на дослідних ґрунтах. Запропоновано модель прогнозу динаміки КН та КП радіоактивного цезію у природну лугову трав'янисту рослинність з торф'яно-болотного ґрунту з аномально високою біологічною доступністю.

Ключові слова: ^{137}Cs , коефіцієнт накопичення, коефіцієнт переходу, динаміка, торф'яно-болотні ґрунти, математична модель.

1. Вступ

Оцінка параметрів динаміки поведінки радіонуклідів у ґрунтово-рослинному покриві та довгострокове прогнозування поведінки радіонуклідів в екосистемах на основі моделювання є важливими завданнями з точки зору отримання адекватних прогнозних оцінок для наступного прийняття правильних управлінських рішень та забезпечення радіологічної і екологічної безпеки регіонів, в яких розташовані підприємства атомної промисловості. Результати таких досліджень дозволяють ще до радіаційної аварії оцінити «потенційно критичні» щодо накопичення радіонуклідів цезію в сільськогосподарській продукції об'єкти землекористування, оперативно сформулювати сітку радіоекологічного моніторингу і прийняти рішення про пріоритетне проведення оптимальних захисних заходів та, найголовніше, своєчасно запобігти формуванню значних дозових навантажень на населення. Зокрема, детальні дослідження аномально високих значень коефіцієнтів накопичення (КН) і коефіцієнтів переходу (КП) ^{137}Cs та їхньої динаміки на торф'яно-болотних ґрунтах зони Полісся є дуже важливими для прогнозування вмісту ^{137}Cs у рослинах у віддалений період після аварії на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС) та ліквідації наслідків потенційних радіаційних аварій на Рівненській АЕС, а також для отримання ретроспективних оцінок забруднення ^{137}Cs рослинності, сільськогосподарської продукції та доз внутрішнього опромінення населення в перші роки після аварії на ЧАЕС [1 - 4].

Проте відсутність даних про рівні забруднення ^{137}Cs природної рослинності на торф'яно-болотних ґрунтах зони Полісся в перші роки після Чорнобильської аварії не дозволила отримати початкові значення КН і КП та визначити швидкий екологічний період напівзменшення (T_e^f) $\text{КН}(\text{КП})$ ^{137}Cs з ґрунту в рослини. Відсутність зазначених вихідних параметрів не дозволила побудувати адекватну динамічну модель кореневого накопичення ^{137}Cs трав'янистою рослинністю на торф'яно-болотних ґрунтах з аномально високою біологічною доступністю.

Метою даної роботи було отримання початкових значень $\text{КН}(t)$ і $\text{КП}(t)$ ^{137}Cs у надземну фітомасу природної лугової трав'янистої рослинності з торф'яно-болотного ґрунту в природних ґрунтово-кліматичних умовах зони Полісся.

2. Об'єкти та методика досліджень

Для дослідження динаміки біологічної доступності привнесеного зразкового радіоактивного розчину (ЗРР) ^{137}Cs із торф'яно-болотних ґрунтів у трав'янисту рослинність у природних ґрунтово-кліматичних умовах зони Полісся 26 квітня 2018 р. було здійснено закладку дрібноділянкового польового досліду.

Експериментальний майданчик було облаштовано на території болотного масиву з не порушеним ґрунтовим покривом в околицях населеного пункту Старе Село Рокитнівського району Рівненської області.

Вибір території дослідження був обумовлений такими чинниками: у даному населеному пункті до цього часу отримується сільськогосподарська продукція з рівнями забруднення ¹³⁷Cs, вищими за встановлені ДР-2006 [5]; у населеному пункті та його околицях у ґрунтовому покриві значну частку займають перезволожені торф'яно-болотні ґрунти, для яких властиві аномально високі значення КП ¹³⁷Cs у природну трав'янисту рослинність [3, 6 - 9].

Угіддя, на яких облаштовано експериментальний майданчик, відносяться до осоково-злаково-різнотравних луків надмірного зволоження на торф'яно-болотних ґрунтах із змінним відсотковим внеском у травостій протягом вегетаційного періоду представників різних видів.

Ґрунт території місця закладки досліду відно-

ситься до перехідних торфо-глейових залишково-низинних мезотрофних болотних ґрунтів на піщаних водно-льодовикових відкладах з потужністю торф'яного горизонту від 35 до 50 см, для якого характерні надмірне перезволоження внаслідок поверхневого затоплення і підтоплення різної тривалості в період весняних повеней і літньо-осінніх паводків та високий рівень стояння ґрунтових вод.

За допомогою стандартних методів визначено основні фізико-хімічні та агрохімічні властивості ґрунту експериментального майданчика [10], питому активність ¹³⁷Cs у ґрунті та щільність забруднення ¹³⁷Cs території (табл. 1) і вертикальний розподіл ¹³⁷Cs чорнобильських випадань у ґрунтовому профілі (табл. 2).

Таблиця 1. Фізико-хімічні та агрохімічні властивості верхнього 10-см шару торф'яно-болотного ґрунту експериментального майданчика

Найменування показників, одиниці вимірювань	Результати вимірювань
Актуальна кислотність, рН водний	4,4 ± 0,10
Обмінна кислотність, рН сольовий	3,7 ± 0,10
Гідролітична кислотність, ммоль-екв/100 г	48 ± 4,8
Сума увібраних основ, мг-екв/100 г	0,5 ± 0,02
Місткість катіонного обміну (МКО), мг-екв/100 г	48,5 ± 4,8
Ступінь насичення основами V, %	1,04 ± 0,01
Загальний азот, %	1,4 ± 0,20
Амонійний азот, мг/100 г	2,1 ± 0,21
Нітратний азот, мг/100 г	менше 1,15
Рухомі форми фосфору, мг/100 г	20,3 ± 2,03
Рухомі форми калію, мг/100 г	68,0 ± 6,4
Рухоме залізо, мг/100 г	103,0 ± 10,30
Рухоме залізо, %	0,12 ± 0,01
Зольність, %	27,2 ± 1,4
Об'ємна маса ґрунту, г/см ³	0,218 ± 0,02
Питома активність ¹³⁷ Cs ґрунту, Бк/кг	436 ± 39
Щільність забруднення ґрунту ¹³⁷ Cs, кБк/м ²	9,6 ± 0,9

Таблиця 2. Питома активність ¹³⁷Cs у верхньому 10-см шарі торф'яно-болотного ґрунту експериментального майданчика

Шар ґрунту, см	Питома активність ¹³⁷ Cs, Бк/кг	Розподіл від сумарної активності шару ґрунту 0 - 10 см, %
0 - 2	870 ± 70	39,9 ± 3,2
2 - 4	500 ± 45	22,9 ± 2,1
4 - 6	350 ± 32	16,1 ± 1,5
6 - 8	290 ± 30	13,3 ± 1,4
8 - 10	170 ± 17	7,8 ± 0,8
0 - 10	436 ± 39*	100

* Розрахункове значення.

Дослідження вертикального розподілу ¹³⁷Cs у профілі ґрунту полягало в пошаровому відборі зразків із кроком 2 см на глибину 10 см у ґрунтових монолітах, відібраних у 5 точках на захисних смугах між дослідними ділянками експеримен-

тального майданчика. Одиничні проби відповідних шарів ґрунту з кожного моноліту (0 - 2 см; 2 - 4 см; 4 - 6 см; 6 - 8 см; 8 - 10 см) об'єднували в одну репрезентативну середню. Після ретельної гомогенізації та сушки у сушильній шафі при

температурі 105 ± 2 °С проводили гамма-спектрометричний аналіз на вміст ^{137}Cs у кожному шарі ґрунту (див. табл. 2).

Згідно з даними визначання фізико-хімічних та агрохімічних властивостей (див. табл. 1) даний ґрунт характеризується високими показниками кислотності ґрунтового розчину, значною концентрацією амонію та низьким вмістом рухомих форм елементів мінерального живлення. Ґрунт місця закладки досліду станом на квітень 2018 р. мав середнє значення питомої активності ^{137}Cs 436 Бк/кг для 10-см шару природного непошкошеного ґрунту, щільність забруднення відповідно становила 9,6 кБк/м² (див. табл. 1 і 2).

Отримані дані (див. табл. 2) свідчать про те, що основна частка активності ^{137}Cs знаходиться в найбільш біологічно активному та насиченому корінням трав'янистих рослин шарі торфу 0 - 6 см і становить ≈ 85 % від сумарної активності шару ґрунту 0 - 10 см.

Схема модельного досліду по вивченню динаміки кореневого надходження радіоактивного цезію із торф'яно-болотних ґрунтів у лучну рослинність складалась із двох варіантів: 1) дослідні ділянки з поверхневим привнесенням ЗРР ^{137}Cs у трикратній повторності, закладені з метою імітації свіжих радіоактивних випадань у конденсаційній формі; 2) контрольні дослідні ділянки з ^{137}Cs чорнобильських випадань, закладені у шестикратній повторності.

Форма дослідних ділянок квадратна, площа кожної 1 м². Ширина захисних смуг між дослідними ділянками в досліді 2 м. Для запобігання горизонтальної міграції привнесеного у водорозчинній формі ЗРР ^{137}Cs дослідні ділянки, на яких здійснювалось поверхнєве привнесення ЗРР ^{137}Cs по периметру, було захищено пластиковими пластинами розмірами 100 × 40 × 0,7 см, зануреними у ґрунт на глибину 20 см.

Поверхнєве привнесенням водорозчинного ^{137}Cs на дослідні ділянки проводили методом дощування. Для цього готували розчин (розведення 135 мл ЗРР ^{137}Cs з питомою активністю 600 Бк/мл у 3,5 л дистильованої води) та здійснювали його нейтралізацію водним амоніаком (200 мкл) до рН = 6,85 - 6,86. Таким чином, на кожному з трьох ділянок, на яких імітуються свіжі радіоактивні випадання, було привнесено по 81 кБк/м² ^{137}Cs , що відповідає 3682 Бк/кг сухого ґрунту. Внесок ^{137}Cs чорнобильських радіоактивних випадань у сумарну активність на даних ділянках не перевищував 11 %. Для мінімізації поверхнєвого забруднення трав'янистих рослин ^{137}Cs , що вже перебували у фазах весняного відростання та кущення, ділянки додатково зрошували 1,5 л дистильованою водою для змиву залишків водорозчинного

^{137}Cs з листової поверхні.

Для забезпечення однакових показників вологості ґрунту на контрольних дослідних ділянках та ділянках із привнесеним ^{137}Cs контрольні ділянки були политі 5 л дистильованої води. Такий об'єм використаної для поливу води наближено відповідає 11 % середньої кількості опадів у квітні в північних районах Рівненської області (зокрема, у населеному пункті Старе Село) та не вносить суттєвого (внеску) відхилення до місячної кількості опадів у квітні (≈ 45 мм), їхньої величини за вегетаційний період (≈ 445 мм/рік) і норми опадів за рік (≈ 630 мм/рік) [11, 12]. У подальшому полив експериментальних ділянок не проводили.

Перший відбір надземної фітомаси трав'янистих рослин із дослідних ділянок здійснено 22 травня 2018 р. через 26 діб після закладки досліду, другий відбір відбувся через 60 діб – 25 червня 2018 р., третій через 110 діб – 14 серпня 2018 р. та четвертий через 174 доби – 17 жовтня 2018 р.

Надземну фітомасу рослин зрізували на висоті 1,5 см від поверхні ґрунту із всієї площі кожної дослідної ділянки (1 м²) варіантів досліду. У лабораторних умовах зразки лугової трав'янистої рослинності подрібнювали ножицями та сушили у сушильній шафі при температурі 105 ± 2 °С протягом доби. Після цього зважували та проводили гамма-спектрометричні дослідження на вміст ^{137}Cs .

Вимірювання питомої активності ^{137}Cs у зразках ґрунту та фітомаси трав'янистих рослин проводили на гамма-спектрометрі з напівпровідниковим детектором із високочистого германію «GEM-30185» та багатоканальним аналізатором ADCAM-300 («EG & ORTEC», США) у поліетиленових посудинах Марінеллі об'ємом 1000 см³ та у посудинах «Дента» об'ємом 130 см³. Відносна похибка вимірювання питомої активності ^{137}Cs у зразках не перевищувала ± 10 % при довірчій імовірності 0,95.

Для оцінки інтенсивності кореневого надходження ^{137}Cs з ґрунту в рослини було використано кількісні показники: КН – відношення питомої активності радіонукліда в рослинах (Бк/кг сухої маси) до питомої активності ґрунту (Бк/кг сухої маси) та КП – відношення питомої активності радіонукліда в рослинах (Бк/кг сухої маси) до щільності забруднення ґрунту (кБк/м² сухої маси), визначенні для 10-см шару ґрунту згідно з рекомендаціями МАГАТЕ та МКРО [13 - 15].

При оцінці значень параметрів $A_{\text{експ}}$, $KH_{\text{експ}}$ та $KP_{\text{експ}}$, що відповідають лише привнесеному ^{137}Cs , із загальної питомої активності віднімали частину, обумовлену ^{137}Cs чорнобильських випадань (за результатами активності на контрольних ділянках).

Для обробки результатів і оцінки статистичних характеристик випадкових величин були використані методи статистичного аналізу [16] із застосуванням пакетів програм MS Excell та STATISTICA 7. Статистична обробка результатів проводилася при допущенні, що кожне експериментальне значення відношення $\text{КН}_{\text{експ}}/\text{КН}_{\text{контр}}$ ($\text{КП}_{\text{експ}}/\text{КП}_{\text{контр}}$) враховувалося зі своїм ваговим коефіцієнтом, обернено пропорційним до похибки визначення. Статистична значущість параметрів моделі визначалася критерієм Стьюдента ($P = 95\%$). Експериментальні результати та параметри моделі наведено з відповідними стандартними відхиленнями (SD).

3. Результати та обговорення їх

У табл. 3 представлено динаміку значень параметрів біологічної доступності радіоцезію:

Таблиця 3. Динаміка параметрів біологічної доступності ^{137}Cs для трав'янистої рослинності природних луків у різні моменти часу після закладки дрібноділянкового польового досліду ($m \pm \text{SD}$)

Параметр, середньоарифметичні значення	Суша надземна фітомаса трав'янистої лугової рослинності			
	22.05.18 через 26 діб	25.06.18 через 60 діб	14.08.18 через 110 діб	17.10.18 через 174 доби
$A_{\text{контр}}$ (чорнобильський ^{137}Cs), Бк/кг	1135 ± 385	911 ± 300	1188 ± 580	880 ± 400
$A_{\text{експ}}$ (привнесений ЗРР ^{137}Cs), Бк/кг	60300 ± 11300	26400 ± 6800	26900 ± 4450	18900 ± 2200
$\text{КН}_{\text{контр}}$ (чорнобильський ^{137}Cs)	$2,6 \pm 0,9$	$2,1 \pm 0,7$	$2,7 \pm 1,3$	$2,0 \pm 1,3$
$\text{КН}_{\text{експ}}$ (привнесений ЗРР ^{137}Cs)	$16,4 \pm 3,1$	$7,2 \pm 1,9$	$7,3 \pm 1,2$	$4,9 \pm 1,2$
$\text{КП}_{\text{контр}}$ (чорнобильський ^{137}Cs)	118 ± 40	95 ± 31	124 ± 60	92 ± 30
$\text{КП}_{\text{експ}}$ (привнесений ЗРР ^{137}Cs)	744 ± 139	326 ± 84	332 ± 55	222 ± 28
$\text{КН}_{\text{експ}}/\text{КН}_{\text{контр}}$ та $\text{КП}_{\text{експ}}/\text{КП}_{\text{контр}}$	$6,3 \pm 1,4$	$3,4 \pm 0,8$	$2,7 \pm 0,8$	$2,4 \pm 0,6$

Із даних таблиці видно, що значення питомої активності ^{137}Cs (відповідно і значення $\text{КН}_{\text{контр}}$ та $\text{КП}_{\text{контр}}$) у надземній фітомасі трав'янистих лугових рослин із контрольних ділянок протягом вегетаційного періоду з часом майже не змінюються. Незначні коливання параметрів біологічної доступності ^{137}Cs можуть бути обумовлені змінами протягом вегетаційного періоду ряду факторів: кількості опадів, температурного та водного режимів ґрунту, проходженням певних фаз розвитку рослин, зміною частки внеску у травостій протягом вегетаційного періоду представників різних родин і видів природних лугових трав та ін., що неодноразово відзначалося раніше [8, 17, 18]. У той же час на дослідних ділянках із привнесеним ^{137}Cs вже для другого пробовідбору відбулося суттєве зниження питомої активності ^{137}Cs в надземній фітомасі лугових рослин та відповідно значень $\text{КН}_{\text{експ}}$ та $\text{КП}_{\text{експ}}$.

Із часом співвідношення між КН (КП) ^{137}Cs для лугових рослин на експериментальних ділянках із варіантом привнесеного ^{137}Cs та для рослин контрольних ділянок поступово зменшується. Так, при першому пробовідборі надземної

середні значення питомої активності ^{137}Cs у сухій фітомасі трав'янистої рослинності природних луків у варіантах з поверхневим привнесенням водорозчинної форми ^{137}Cs ($A_{\text{експ}}$) та варіантах контролю ($A_{\text{контр}}$), тобто трав'янистої рослинності, забруднення якої обумовлено ^{137}Cs чорнобильських випадань; значення КН та КП радіоцезію у суху фітомасу трав'янистої рослинності з ділянок з привнесеним ЗРР ^{137}Cs ($\text{КН}_{\text{експ}}$ і $\text{КП}_{\text{експ}}$) та з ділянок контролю ($\text{КН}_{\text{контр}}$ і $\text{КП}_{\text{контр}}$). У таблиці також наведено співвідношення $\text{КН}_{\text{експ}}/\text{КН}_{\text{контр}}$ та $\text{КП}_{\text{експ}}/\text{КП}_{\text{контр}}$ у різні часові періоди після закладки дрібноділянкового польового досліду. Значення перелічених параметрів наведено з відповідними стандартними відхиленнями, що характеризують варіабельність між повторностями.

фітомаси рослин через 26 діб дане співвідношення становило 6,3; при другому пробовідборі через 60 діб відбулося різке, майже двократне зниження співвідношення – 3,4; надалі процес уповільнюється, і для третього та четвертого пробовідборів надземної фітомаси рослин, через 110 і 174 діб, дане співвідношення становило 2,7 та 2,4 відповідно. Цілком імовірно даний факт свідчить про те, що відбуваються досить інтенсивні процеси сорбції радіоактивного цезію торф'яно-болотним ґрунтом, тобто знижується кількість біологічно доступних для кореневого надходження в рослини кореневого засвоєння рослинами форм ^{137}Cs .

У загальному вигляді динаміку КН та КП радіоактивного цезію у рослинність за рахунок незворотної фіксації ґрунтом описують двоекспонентною залежністю з виходом на рівноважний стаціонарний рівень, що відповідає кореневому надходженню стабільного цезію (КН_{const}) [13, 19, 20]:

$$\begin{aligned} \text{КН}(t) = & \text{КН}^f(0) \cdot \exp(-\ln(2) \cdot t / T_e^f) + \\ & + \text{КН}^s(0) \cdot \exp(-\ln(2) \cdot t / T_e^s) + \text{КН}_{\text{const}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 \text{КП}(t) &= \text{КП}^f(0) \cdot \exp(-\ln(2) \cdot t / T_e^f) + \\
 &+ \text{КП}^s(0) \cdot \exp(-\ln(2) \cdot t / T_e^s) + \text{КП}_{\text{const}}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

де $\text{КН}^f(0)$, $\text{КН}^s(0)$ або $\text{КП}^f(0)$, $\text{КП}^s(0)$ – КН чи КП швидкої і повільної складових на момент випадань $t = 0$ (1986 р., $(\text{Бк} \cdot \text{м}^{-1}) / (\text{кБк} \cdot \text{м}^{-2})$); t – час після випадань, роки; T_e^f, T_e^s – швидкий і повіль-

$$\frac{\text{КН}(t)}{\text{КН}_{\text{контр}}} = A \cdot [\alpha \cdot \exp(-\ln(2) \cdot t / T_e^f) + (1 - \alpha) \cdot \exp(-\ln(2) \cdot t / T_e^s)] + 1, \quad (3)$$

де A – безрозмірний коефіцієнт на час $t(0)$, дорівнює $A = \frac{\text{КН}(0)}{\text{КН}_{\text{контр}}} - 1$; α – доля швидкої компоненти зменшення КН з періодом напівзменшення T_e^f .

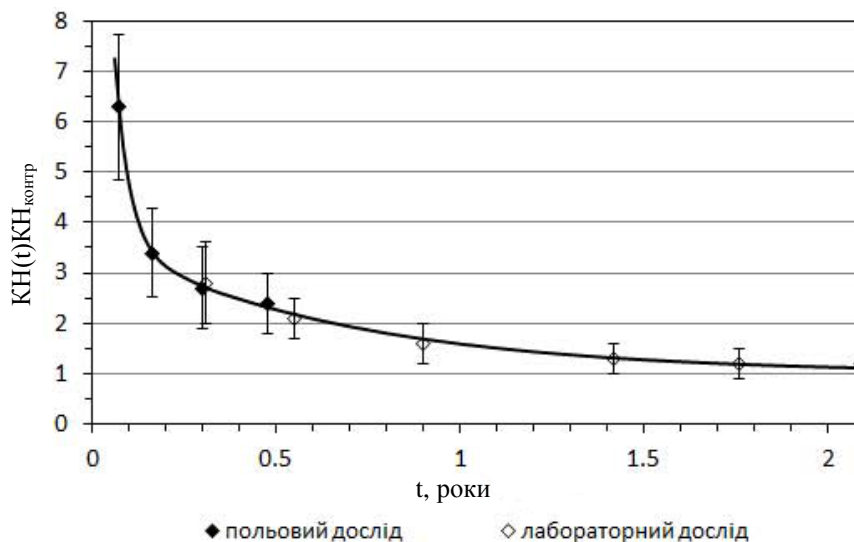
Наявність лише чотирьох часових експериментальних точок, отриманих у ході польових досліджень 2018 р., не дають змоги достатньо коректно оцінити параметри запропонованої моделі (3). Тому для оцінки значень параметрів T_e^f , T_e^s , α та A у даній моделі були використані додаткові дані, які були отримані нами раніше в умовах контрольованого лабораторного вегетаційного дослідження [3]. Близькість значень питомої активності та щільності забруднення ^{137}Cs у ґрунті, а також подібність багатьох агрохімічних та фізико-хімічних характеристик торф'яно-болотних ґрунтів, використаних у даному лабораторному вегетаційному досліді, дало змогу використати раніше отримані дані для розробки запропонованої моделі. На відміну від польових умов у лабораторному вегетаційному експерименті перший

ний екологічний період напівзменшення КН/КП ^{137}Cs з ґрунту в рослини, роки.

Для опису зміни у часі КН та КП привнесеного ^{137}Cs в лугову природну рослинність у польових дослідях було розраховано відношення $\text{КН}_{\text{експ}}/\text{КН}_{\text{контр}}$ ($\text{КП}_{\text{експ}}/\text{КП}_{\text{контр}}$) згідно з рівняннями (1) та (2), динаміка якого у першому наближенні може бути описана виразом

та наступні пробовідбори фітомаси виконані значно пізніше: перший відбувся через 113 діб, другий – через 201 добу і т.д., шостий – через 761 добу після закладки дослідів [3]. Незважаючи на те, що в лабораторних умовах час вегетації значно довший, ніж у польових умовах, зниження доступних до кореневого надходження форм ^{137}Cs «старіння радіоцезію» торф'яно-болотним ґрунтом має бути однаковим, оскільки визначається швидкістю процесів сорбції ^{137}Cs .

Необхідно відзначити, що відношення КН рослини до «постарілого» ^{137}Cs до «постарілого» за 32 роки чорнобильського ^{137}Cs в польовому експерименті для третього ($2,7 \pm 0,8$) та четвертого пробовідборів ($2,4 \pm 0,6$) добре узгоджуються із співвідношеннями $\text{КН}_{\text{експ}}/\text{КН}_{\text{контр}}$, які було отримано для першого ($2,8 \pm 0,8$) та другого ($2,1 \pm 0,4$) пробовідборів у лабораторному вегетаційному досліді. На рисунку відображено динаміку співвідношення $\text{КН}(t)/\text{КН}_{\text{контр}}$ на основі узагальнення результатів польового 2018 р. та лабораторного вегетаційного 2013 - 2015 рр. [3] дослідів.



Динаміка співвідношення $\text{КН}(t)/\text{КН}_{\text{контр}}$ на основі узагальнення результатів дрібноділянкового польового та лабораторного вегетаційного [3] дослідів.

На основі результатів проведених дослідів за допомогою «методу найменших квадратів» було оцінено значення параметрів T_e^f , T_e^s , α та A , що

T_e^f , років	T_e^s , років	α	A
$0,028 \pm 0,005$	$0,45 \pm 0,04$	$0,86 \pm 0,04$	$19,5 \pm 5,8$

Розраховані на основі результатів проведених дослідів значення швидкого T_e^f та повільного T_e^s екологічних періодів напівзменшення КН/КП ^{137}Cs з торф'яно-болотного ґрунту в природну лучну рослинність суттєво відрізняються від літературних даних [13, 14, 20 - 25] і становлять відповідно $T_e^f = 0,028 \pm 0,005$ років, $T_e^s = 0,45 \pm 0,04$ років. Так, наприклад, визначене значення КП ^{137}Cs у суху фітомасу природної лучної рослинності на 26 добу після привнесення водорозчинного ^{137}Cs у $\approx 3,3$ рази вище (див. табл. 3), ніж отримане шляхом екстраполяції на нульовий момент ($t = 0$) після чорнобильських випадань ^{137}Cs (КП = 218 - 223) у роботах [21 - 25].

4. Висновки

Уперше на основі результатів дрібноділянкового польового дослідів в природних ґрунтово-кліматичних умовах зони Полісся отримано початкові значення коефіцієнтів накопичення та

використані в запропонованій динамічній моделі (3), для надземної фітомаси природної трав'янистої лугової рослинності.

переходу $\text{КН}(t)$ і $\text{КП}(t)$ ^{137}Cs з торф'яно-болотного ґрунту у надземну фітомасу природної лугової трав'янистої рослинності для чотирьох часових проміжків вегетаційного періоду після імітації свіжих радіоактивних випадань у конденсаційній формі.

На основі результатів проведених дослідів оцінені значення швидкого екологічного періоду напівзменшення T_e^f та повільного екологічного періоду напівзменшення T_e^s КН/КП ^{137}Cs на торф'яно-болотному ґрунті в природну лучну рослинність становлять: $T_e^f = 0,028 \pm 0,005$ років, $T_e^s = 0,45 \pm 0,04$ років.

Для подальшого уточнення в динаміці значень КН і КП ^{137}Cs у природну лучну рослинність швидкого T_e^f та повільного T_e^s екологічних періодів напівзменшення КН/КП ^{137}Cs на торф'яно-болотних ґрунтах необхідним є продовження експериментальних досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ю.А. Кутлахмедов, В.И. Глазко, А.Н. Михеев. Нерешенные проблемы современной радиологии. *Агроэкологический журнал* 3 (2005) 83.
2. Б.С. Пристер та ін. Превентивна радіоекологічна оцінка території для ведення сільськогосподарського виробництва у разі радіаційних аварій. *Агроэкологический журнал* 1 (2016) 14.
3. І.М. Малоштан та ін. Динаміка коефіцієнтів накопичення ^{137}Cs трав'янистими рослинами на торф'яно-болотних ґрунтах з аномально високою біологічною доступністю. *Ядерна фізика та енергетика* 16(3) (2015) 263.
4. І.М. Гудков. Становлення сільськогосподарської радіоекології в Україні: етапи розвитку, досягнення, проблеми, перспективи. *Агроэкологический журнал* 2 (2017) 58.
5. Державні гігієнічні нормативи «Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у продуктах харчування та питній воді», ГН 6.6.1.1-130-2006.
6. Український інститут сільськогосподарської радіології.
7. I. Maloshtan et al. Assessment of radiological efficiency of countermeasures on peat-bog soils of Ukrainian Polissya. *Journal of Environmental Radioactivity* 175-176 (2017) 52.
8. І.М. Малоштан, С.В. Поліщук. Накопичення ^{137}Cs трав'янистими рослинами на торф'яно-болотних ґрунтах Західного Полісся України.
9. Ядерна фізика та енергетика 19(2) (2018) 150.
9. I. Labunska et al. Current radiological situation in areas of Ukraine contaminated by the Chernobyl accident: Part 1. Human dietary exposure to Caesium-137 and possible mitigation measures. *Environment International* 117 (2018) 250.
10. М.М. Городній та ін. *Агрохімічний аналіз*. Підручник. За ред. М. М. Городнього (К.: Арістей, 2004) 522 с.
11. Український гідрометеорологічний центр.
12. Кліматичні дані для міст у всьому світі.
13. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and fresh-water environments. IAEA-TRS-472 (Vienna, 2010) 194 p.
14. Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments, IAEA-TECDOC-1616 (Vienna, 2009) 616 p.
15. Quantities, Units and Terms in Radioecology. International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report 65. *Journal of the ICRU* 1(2) (2001) 2.
16. І.І. Горбань. *Теорія ймовірностей і математична статистика для наукових працівників та інженерів* (К.: ІПММС НАН України, 2003) 244 с.
17. Б.С. Пристер и др. *Основы сельскохозяйственной радиологии* (К.: Урожай, 1991) 472 с.
18. Г.П. Перепелятников. Миграция радионуклидов

- в природных и полуприродных луговых экосистемах. Проблемы экологии лесів і лісокористування на Поліссі України 3(9) (2002) 118.
19. S. Yoshida et al. Equilibrium of radiocesium with stable cesium within the biological cycle of contaminated forest ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity* 75 (2004) 301.
 20. *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience*. Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment'. Eds. L. Anspaugh, M.I. Balonov. Radiological assessment reports series, IAEA, STI/PUB/1239, 2006, 166 p.
 21. Б.С. Пристер, В.Д. Виноградская. Модель для прогнозирования дозы внутреннего облучения населения при почвенном пути включения долгоживущих радионуклидов в пищевые цепи. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля* 11 (2009) 128.
 22. Б.С. Пристер, В.Д. Виноградская. Кинетическая модель поведения ^{137}Cs в системе «почва-растение», учитывающая агрохимические свойства почвы. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля* 16 (2011) 151.
 23. *20 years after Chornobyl Catastrophe. Future outlook*. National report of Ukraine (K.: Atika, 2006) 216 p.
 24. *Twenty-five Years after Chornobyl Accident: Safety for the Future* (K.: KIM, 2011) 328 p.
 25. B.S. Prister et al. Experimental Substantiation and Parameterization of Model Describing ^{137}Cs and ^{90}Sr Behavior in a Soil-Plant System. *Environmental Science and Pollution Research* 1 (2003) 126.

И. М. Малоштан*, С. В. Полищук, Ю. В. Хомутинин

*Украинский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии
Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина*

*Ответственный автор: radiometry@quality.ua

**ДИНАМИКА КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕХОДА И НАКОПЛЕНИЯ ^{137}Cs
ТРАВЯНИСТОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ ПРИРОДНЫХ ЛУГОВ
НА ТОРФЯНО-БОЛОТНЫХ ПОЧВАХ В НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД
ПОСЛЕ ИМИТАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫПАДЕНИЙ**

Представлены результаты изучения динамики биологической доступности привнесенного образцового радиоактивного раствора ^{137}Cs на торфяно-болотной почве в условиях мелкоделяночного полевого опыта. Определены начальные значения коэффициентов накопления и перехода ($\text{КН}(t)$ і $\text{КП}(t)$) ^{137}Cs в наземную фитомассу природной луговой травянистой растительности в естественных почвенно-климатических условиях Западного Полесья. На основе данных полевого и лабораторного опытов оценены значения быстрого (T_e^f) и медленного (T_e^s) экологических периодов полууменьшения $\text{КН}/\text{КП}$ радиоактивного цезия на исследованных почвах. Предложена модель прогноза динамики КН и КП радиоактивного цезия в естественную луговую травянистую растительность из торфяно-болотной почвы с аномально высокой биологической доступностью.

Ключевые слова: ^{137}Cs , коэффициент накопления, коэффициент перехода, динамика, торфяно-болотные почвы, математическая модель.

I. M. Maloshtan*, S. V. Polishchuk, Yu. V. Khomutinin

*Ukrainian Institute of Agricultural Radiology,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

*Corresponding author: radiometry@quality.ua

**DYNAMICS OF ^{137}Cs TRANSFER AND CONCENTRATION FACTORS AND RATIOS
IN GRASS OF NATURAL MEADOWS ON PEAT-BOG SOILS IN THE EARLY PERIOD
AFTER IMITATION OF THE RADIOACTIVE FALLOUT**

Results of the small-field experimental study of the dynamics of biological availability of freshly added standard radioactive solution of ^{137}Cs in peat-bog soil are presented. The initial values of the ^{137}Cs concentration ratios $\text{CR}(t)$ and transfer factors $\text{TF}(t)$, in the aboveground phytomass of natural meadow grass vegetation in peat-bog soils in the real soil-climatic conditions of Western Polissya were determined. Based on the results of the field and laboratory studies, the values of fast and slow periods of the ecological half-reduction (T_e^f and T_e^s , respectively) of CR and TF of radioactive cesium in the studied soils were estimated. The model for prediction of the dynamics of CR and TF of radioactive cesium into natural meadow grass vegetation from peat-bog soils with its abnormal high biological availability was proposed.

Keywords: ^{137}Cs , concentration ratio, transfer factor, dynamics, peat-bog soils, mathematical model.

REFERENCES

1. Yu.A. Kutlakhmedov, V.I. Glazko, A.N. Mikheev. Unresolved issues of modern radioecology. *Agroekologichnyi zhurnal* 3 (2005) 83. (Rus)
2. B.S. Prister et al. Preventive radio-ecological assessment of the area for agricultural production in case of radiation accidents. *Agroekologichnyi zhurnal* 1 (2016) 14. (Ukr)
3. I.M. Maloshtan et al. Dynamics of ^{137}Cs accumulation by herbaceous plants on peat-bog soils with abnormally high bioavailability. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 16(3) (2015) 263. Ukr
4. I.M. Gudkov. Formation of agricultural radioecology in Ukraine: stages of development, achievements, problems, perspectives. *Agroekologichnyi zhurnal* 2 (2017) 58. (Ukr)
5. State hygiene standards "Permissible levels of ^{137}Cs and ^{90}Sr radionuclides in food and drinking water". Hygiene Standards 6.6.1.1-130-2006. (Ukr)
6. Ukrainian Institute of Agricultural Radiology
7. I. Maloshtan et al. Assessment of radiological efficiency of countermeasures on peat-bog soils of Ukrainian Polissya. *Journal of Environmental Radioactivity* 175-176 (2017) 52.
8. I. M. Maloshtan, S. V. Polishchuk. Accumulation of ^{137}Cs by herbaceous plants on peat-bog soils in the West Polissya of Ukraine. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 19(2) (2018) 150. (Ukr)
<https://doi.org/10.15407/jnpae2018.02.150>
9. I. Labunska et al. Current radiological situation in areas of Ukraine contaminated by the Chernobyl accident: Part 1. Human dietary exposure to Caesium-137 and possible mitigation measures. *Environment International* 117 (2018) 250.
10. M.M. Gorodnii et al. *Agrochemical Analysis*. Ed. M.M. Gorodnij (Kyiv: Aristey, 2004) 522 p. (Ukr)
11. Ukrainian Hydrometeorological Center.
12. Climate Data for Cities Worldwide.
13. *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments*. IAEA-TRS-472 (Vienna, 2010) 194 p.
14. *Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments*. IAEA-TECDOC-1616 (Vienna, 2009) 616 p.
15. Quantities, Units and Terms in Radioecology. International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report 65. *Journal of the ICRU* 1(2) (2001) 2.
16. I.I. Gorban. *Probability Theory and Mathematical Statistics for Scientists and Engineers* (Kyiv: IPMS of NAS of Ukraine, 2003) 244 p. (Ukr)
17. B.S. Prister et al. *Fundamentals of Agricultural Radiology* (Kyiv: Urozhay, 1991) 472 p. (Rus)
18. G.P. Perepelyatnykov. Radionuclide migration in natural and semi-natural meadow ecosystems. *Problemy Ekolohiyi Lisiv i Lisokorystuvannya na Polissi Ukrainy* 3(9) (2002) 118. (Rus)
19. S. Yoshida et al. Equilibrium of radiocesium with stable cesium within the biological cycle of contaminated forest ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity* 75 (2004) 301.
20. *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience*. Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment'. Eds. L. Anspaugh, M.I. Balonov. *Radiological assessment reports series, IAEA, STI/PUB/1239, 2006, 166 p.*
21. B.S. Prister, V.D. Vinogradskaya. Model for predicting the dose of internal exposure of the population in the soil pathway inclusion of long-lived radionuclides in food chains. *Problemy Bezpeky Atomnykh Elektrostantsii i Chornobylya* 11 (2009) 128. (Rus)
22. B.S. Prister, V.D. Vinogradskaya. Kinetic model of ^{137}Cs behavior in the "soil - plant" system, taking into account the agrochemical properties of the soil. *Problemy Bezpeky Atomnykh Elektrostantsii i Chornobylya* 16 (2011) 151. (Rus)
23. *20 Years After Chernobyl Catastrophe. Future Outlook: National Report of Ukraine* (Kyiv: Atika, 2006) 216 p.
24. *Twenty-five Years after Chernobyl Accident: Safety for the Future* (K.: KIM, 2011) 328 p.
25. B.S. Prister et al. Experimental Substantiation and Parameterization of Model Describing ^{137}Cs and ^{90}Sr Behavior in a Soil-Plant System. *Environmental Science and Pollution Research* 1 (2003) 126.

Надійшла 24.04.2019

Received 24.04.2019