

Ю. О. Іванов, Ю. В. Хомутінін

Український НДІ сільськогосподарської радіології НУБіП України, смт Чабани Київської області

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ МІГРАЦІЇ ^{90}Sr І ^{137}Cs
В КОМПОНЕНТАХ ҐРУНТОВО-РОСЛИННОГО ПОКРИВУ АГРОЦЕНОЗІВ
НА ПІЗНІЙ ФАЗІ РАДІАЦІЙНОЇ АВАРІЇ.
II. ПЕРЕВІРКА МОДЕЛІ ТА ПРОГНОЗНІ ОЦІНКИ**

Перевірено математичну модель прогнозування динаміки накопичення ^{90}Sr і ^{137}Cs багаторічними злаковими травами з контрастних за властивостями ґрунтів на пізній фазі радіаційної аварії. Результати тестування моделі показали можливість урахувати роль процесів, які зумовлюють динаміку надходження радіонуклідів у рослини (винос ^{90}Sr і ^{137}Cs з кореневмісного шару ґрунту, їхню іммобілізацію і фізичний розпад). З використанням реалізованих у моделі підходів розраховано прогнозні оцінки накопичення ^{90}Sr і ^{137}Cs багаторічними злаковими травами з контрастних за властивостями ґрунтів на пізній фазі радіаційної аварії.

Ключові слова: математична модель, ^{90}Sr , ^{137}Cs , прогнозування динаміки накопичення рослинами, пізня фаза аварії.

Вступ

У першій частині статті [1] наведено детальний опис моделі для прогнозування динаміки накопичення ^{90}Sr і ^{137}Cs багаторічними злаковими травами з контрастних за властивостями ґрунтів на пізній фазі радіаційної аварії та її параметризації.

Метою другої частини статті є перевірка розробленої математичної моделі міграції ^{90}Sr і ^{137}Cs в компонентах ґрунтового-рослинного покриву агроценозів на пізній фазі радіаційної аварії з урахуванням процесів, які визначають багаторічну динаміку надходження радіонуклідів у рослини, а також розрахунок відповідних прогнозних оцінок.

Результати обробляли методами статистичного аналізу (відновлення залежностей) [2, 3] з ви-

користанням програмних засобів MS Excel 2007 і пакета програм «Статистика».

Перевірка моделі

Для перевірки прогностичних властивостей моделей на пізній фазі аварії на ЧАЕС використано незалежні експериментальні дані про довготривалу динаміку накопичення ^{137}Cs багаторічними злаковими травами з дерново-підзолистого ґрунту і чорнозему типового у 2009 - 2013 рр. [4]. Серед використаних для параметризації ґрунтів (М) було вибрано однотипні ґрунти з найбільш близькими агрохімічними показниками до використовуваних для перевірки (Експ.) (табл. 1). Результати перевірки наведено в табл. 2 та 3.

Таблиця 1. Агрохімічні показники ґрунтів експериментальних ділянок [4] і ґрунтів, використаних для параметризації моделі

Ґрунт	pH _{KCl}	Гумус, %	Ca _{обм} , мг-екв/100 г	K ₂ O _{рухл} , мг/кг
Дерново-підзолистий (Експ.)	5,6	2,07	3,6	112
Дерново-підзолистий супіщаний (М)	5,4	1,6	2,2	41
Чорнозем типовий середньосуглинний (Експ.)	5,9	6,67	11,9	110
Чорнозем реградований середньосуглинний (М)	5,7	3,5	11,2	141

Таблиця 2. Зіставлення прогнозних та експериментальних оцінок довготривалої динаміки накопичення ^{137}Cs злаковими травами з дерново-підзолистого ґрунту

Час, роки	Моделльні оцінки, середнє ± 2 СВ	Експериментальні оцінки, середнє ± 2 СВ	Відношення A _{мод} /A _{експер}
23	200 ± 60	141 ± 51	1,40
24	190 ± 75	117 ± 42	1,64
25	190 ± 35	152 ± 55	1,23
26	180 ± 40	141 ± 51	1,28
27	175 ± 70	107 ± 39	1,64

© Ю. О. Іванов, Ю. В. Хомутінін, 2015

Таблиця 3. Зіставлення прогнозних та експериментальних оцінок довготривалої динаміки накопичення ^{137}Cs злаковими травами з чорнозему

Час, роки	Моделльні оцінки, середнє \pm 2 СВ	Експериментальні оцінки, середнє \pm 2 СВ	Відношення $A_{\text{мод}}/A_{\text{експер}}$
23	$17,2 \pm 10,3$	$34,0 \pm 10,0$	0,51
24	$16,8 \pm 10,1$	$38,0 \pm 17,0$	0,44
25	$16,3 \pm 9,8$	$17,0 \pm 6,0$	0,96
26	$15,9 \pm 9,6$	$43,0 \pm 15,0$	0,37
27	$15,5 \pm 9,3$	$33,0 \pm 17,0$	0,47

Наведені в табл. 2 оцінки показують, що відношення середніх значень прогнозних ($A_{\text{мод}}$) і експериментальних оцінок ($A_{\text{експер}}$) довготривалої динаміки накопичення ^{137}Cs злаковими травами з дерново-підзолистого ґрунту варіюють у межах 1,23 - 1,64 раза.

Наведені в табл. 3 оцінки показують, що відношення середніх значень прогнозних ($A_{\text{мод}}$) і експериментальних оцінок ($A_{\text{експер}}$) довготривалої динаміки накопичення ^{137}Cs злаковими травами з чорнозему варіюють у межах 0,37 - 0,96 раза, тобто приблизно в тих же межах, що і для дерново-підзолистого ґрунту.

Таким чином, результати проведеної перевірки в цілому показали задовільний збіг розрахункових прогнозних оцінок з використанням запропонованих моделей і експериментальних оцінок динаміки накопичення ^{137}Cs злаковими травами з двох контрастних за властивостями ґрунтів на пізній фазі аварії. Слід зазначити, що практично всі зна-

чення експериментальних оцінок накопичення ^{137}Cs злаковими травами з урахуванням значень стандартних відхилень (СВ) значимо не відрізняються від модельних оцінок з урахуванням двох значень стандартних відхилень.

Для перевірки адекватності відображення в оцінках моделі інтенсивності основних процесів перерозподілу радіонуклідів у компонентах ґрунтово-рослинного покриву проведено її тестування. Для цієї мети розраховано прогнозні оцінки надходження радіонуклідів у рослини у випадках реалізації всіх процесів перерозподілу радіонуклідів, що враховуються, і відсутності кожного з них. Для оцінок вибрано контрастні за властивостями ґрунту: слабогумусований пісок, в якому ^{90}Sr характеризується максимальною міграційною здатністю, а також чорнозем типовий важкосуглинний, в якому відзначено максимальний ступінь процесів іммобілізації ^{137}Cs . Отримані оцінки представлено на рис. 1.

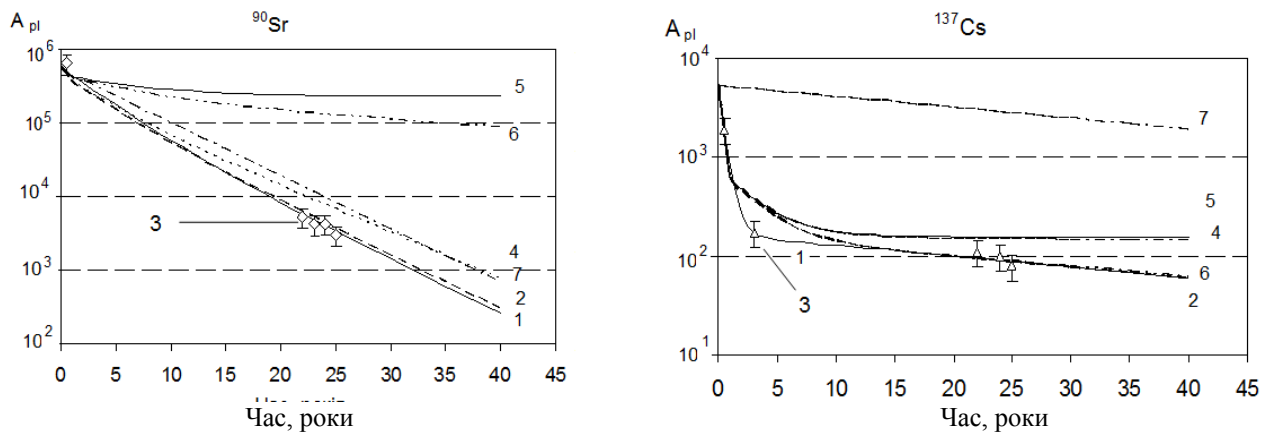


Рис. 1. Прогнозні оцінки вмісту радіонуклідів у багаторічних травах з контрастних за властивостями ґрунтів залежно від урахування основних процесів, які визначають динаміку накопичення радіонуклідів рослинами: ^{90}Sr , слабогумусований пісок: 1 - модель (1), ураховано всі фактори; 2 - модель (2), ураховано всі фактори; 3 - експериментальні дані; 4 - без урахування фізичного розпаду ^{90}Sr ; 5 - без урахування фізичного розпаду та виносу ^{90}Sr ; 6 - без урахування виносу ^{90}Sr ; 7 - без урахування динаміки вмісту рухливих форм ^{90}Sr . ^{137}Cs , чорнозем типовий важкосуглинний: 1 - модель (1), ураховано всі фактори; 2 - модель (2), ураховано всі фактори; 3 - експериментальні дані; 4 - без урахування фізичного розпаду ^{137}Cs ; 5 - без урахування фізичного розпаду та виносу ^{137}Cs ; 6 - без урахування виносу ^{137}Cs ; 7 - без урахування динаміки вмісту рухливих форм ^{137}Cs .

Наведені оцінки переконливо показують переважачу роль процесу винесення ^{90}Sr з кореневмісного горизонту ґрунту в надходженні ра-

діонукліда в рослини, тоді як для ^{137}Cs таким процесом є іммобілізація радіонукліда.

Розрахунок прогнозних оцінок надходження ^{90}Sr і ^{137}Cs в злакові трави з контрастних за властивостями ґрунтів на пізній фазі аварії

Використання розробленої моделі дає змогу розрахувати прогнозні оцінки багаторічної динаміки накопичення ^{90}Sr і ^{137}Cs злаковими травами з контрастних за властивостями ґрунтів за двома показниками. По-перше, реалізується розрахунок прогнозних оцінок динаміки накопичення (питомої активності) радіонуклідів рослинами відповідно до запропонованих моделей. Прикла-

ди таких розрахунків наведено у вигляді графіків залежності питомої активності рослин ($A_{\text{пл}}$) при часі депонування радіонуклідів у ґрунті від 0,5 до 40 років (рис. 2). Другий варіант прогнозування дає змогу оцінювати динаміку коефіцієнтів накопичення радіонуклідів із використанням описаних у першій частині статті [1] алгоритмів на основі емпіричної моделі, а також алгоритму на основі зв'язку між динамікою зміни в часі коефіцієнтів накопичення ^{90}Sr і ^{137}Cs рослинами та динамікою зміни суми вмісту у ґрунті водорозчинних і обмінних форм радіонуклідів.

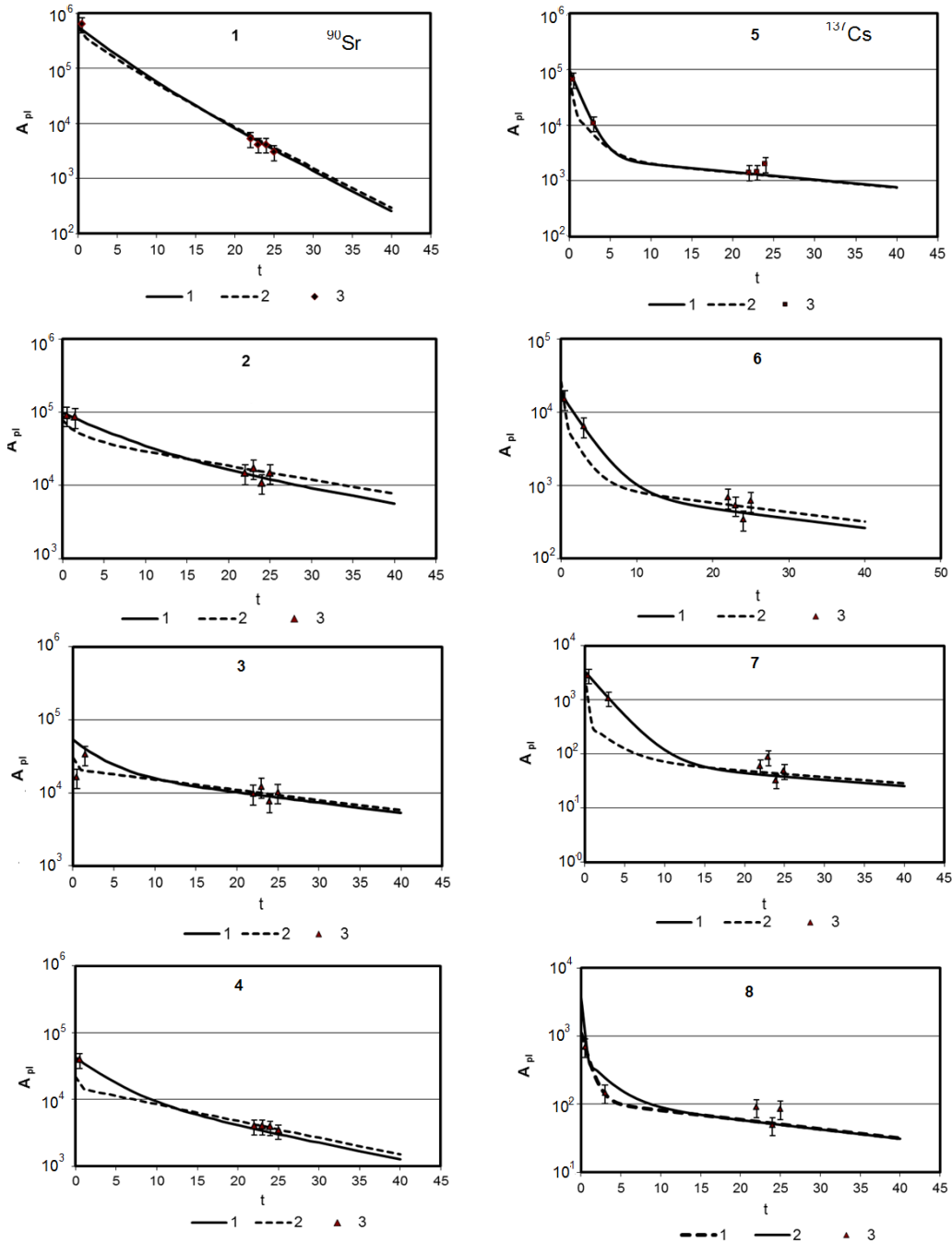


Рис. 2. Приклади прогнозних оцінок багаторічної динаміки накопичення ^{90}Sr і ^{137}Cs злаковими травами з контрастних за властивостями ґрунтів: 1 – емпірична модель (1); 2 – модель прогнозу (2); 3 – експериментальні дані. Ґрунти: 1, 5 – слабкогумусований пісок; 2, 6 – дерново-підзолистий супіщаний; 3, 7 – дерново-підзолистий середньосуглинний; 4, 8 – чорнозем південний важкосуглинний.

Аналіз кривих прогнозу показує відмінності в прогнозних оцінках накопичення ^{137}Cs рослинами для конкретних умов за двома моделями (7) і (8) [1] упродовж перших 3 - 5 років після забруднення ґрунту – до 2 - 3 разів, в окремих випадках – до 5 разів. Відмінності в прогнозних оцінках накопичення ^{90}Sr рослинами для конкретних умов за двома вказаними моделями [1] упродовж перших 3 - 5 років після забруднення ґрунту істотно менше – до 1,5 - 3 разів. Через указаний період часу (тобто для інтервалу часу 5 - 40 років після забруднення ґрунту) відмінності в прогнозних оцінках для конкретних умов за двома моделями (7) і (8) [1] і з експериментальними оцінками не перевищують 10 - 40 %. Ці результати показують можливість використання представлених моделей для розрахунку прогнозних оцінок забруднення рослин на пізній фазі аварії.

Аналіз розрахованих прогнозних оцінок коефіцієнтів накопичення ^{90}Sr і ^{137}Cs багаторічними злаковими травами з контрастних за властивостями ґрунтів показав, що упродовж 30 - 40 років депонування ^{90}Sr і ^{137}Cs у ґрунті значення CR радіонуклідів рослинами з конкретних типів ґрунтів значимо не відрізняються. Це свідчить про домінуючу роль процесу фізичного розпаду ^{90}Sr і ^{137}Cs у зниженні накопичення радіонуклідів рослинами на пізній фазі аварії. Виняток становлять ґрунти легкого гранулометричного складу (рихлопіщані), де значущим процесом, який впливає на зниження накопичення ^{90}Sr рослинами, залишається винесення радіонукліда з кореневмісного горизонту ґрунту за рахунок вертикальної міграції.

Висновки

1. З використанням незалежних експериментальних даних оцінено прогностичні властивості

моделей прогнозування динаміки накопичення ^{90}Sr і ^{137}Cs багаторічними злаковими травами з контрастних за властивостями ґрунтів на пізній фазі радіаційної аварії. Показано в цілому задовільний збіг розрахованих прогнозних оцінок і експериментальних оцінок накопичення радіонуклідів злаковими травами з контрастних за властивостями ґрунтів на пізній фазі аварії.

2. Результати тестування моделей показали можливість урахувувати роль процесів, що зумовлюють динаміку надходження радіонуклідів у рослини (винос ^{90}Sr і ^{137}Cs з кореневмісного шару ґрунту, їхню іммобілізацію і фізичний розпад).

3. Відзначено відмінності в прогнозних оцінках накопичення ^{137}Cs рослинами для конкретних умов за двома моделями (7) і (8) [1] упродовж перших 3 - 5 років після забруднення ґрунту – до 2 - 3 разів, в окремих випадках – до 5 разів. Відмінності в прогнозних оцінках накопичення ^{90}Sr рослинами для конкретних умов за цими моделями впродовж перших 3 - 5 років після забруднення ґрунту істотно менше – до 1,5 - 3 разів. Через указаний період часу відмінності в прогнозних оцінках з експериментальними оцінками не перевищують 10 - 40 %.

4. З використанням реалізованих у моделях підходів розраховано прогнозні оцінки накопичення ^{90}Sr і ^{137}Cs багаторічними злаковими травами з контрастних за властивостями ґрунтів на пізній фазі радіаційної аварії.

5. На основі прогнозних оцінок підтверджено раніше зроблені висновки [8], що після 22 - 25 років із моменту депонування радіонукліда у ґрунтах основним чинником зниження значень коефіцієнтів накопичення ^{137}Cs рослинами є фізичний розпад радіонукліда, їхнє варіювання в невеликих межах реалізовуватися в першу чергу за рахунок варіювання гідрометеорологічних умов.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Іванов Ю.О., Хомутінін Ю.В.* Математичне моделювання динаміки міграції ^{90}Sr і ^{137}Cs в компонентах ґрунтово-рослинного покриву агроценозів на пізній фазі радіаційної аварії. I. Побудова моделі та її параметризація // *Ядерна фізика та енергетика*. - 2015. - Т. 16, № 2. - С. 169 - 176.
2. *Айвазян С.А., Енюков І.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика. Исследование зависимостей. - М.: Финансы и статистика, 1985. - 488 с.
3. *Афифи А., Эйзен С.* Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ. - М.: Мир, 1992. - 488 с.
4. *Косарчук О.В., Лазарев М.М., Кадигриб О.М.* Динаміка ефективності довготривалого застосування контрзаходів на радіоактивно забруднених територіях у віддалений період після аварії на ЧАЕС // *Ядерна фізика та енергетика*. - 2014. - Т. 15, № 3. - С. 285 - 293.
5. *Іванов Ю.А.* Анализ факторов, определяющих долговременную динамику миграции радионуклидов в почвенно-растительном покрове // *Проблеми Чорнобильської зони відчуження*. - 2009. - № 9. - С. 23 - 39.

Ю. А. Иванов, Ю. В. Хомутинин

Украинский НИИ сельскохозяйственной радиологии НУБиП Украины, пгт Чабаны Киевской области

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МИГРАЦИИ ^{90}Sr И ^{137}Cs
В КОМПОНЕНТАХ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА АГРОЦЕНОЗОВ
НА ПОЗДНЕЙ ФАЗЕ РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ.
II. ПРОВЕРКА МОДЕЛИ И ПРОНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ**

Проверена математическая модель прогнозирования динамики накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs многолетними злаковыми травами из контрастных по свойствам почв на поздней фазе радиационной аварии. Результаты тестирования модели показали возможность учета роли процессов, определяющих динамику поступления радионуклидов в растения (вынос ^{90}Sr и ^{137}Cs из корнеобитаемого слоя почвы, их иммобилизацию и физический распад). С использованием реализованных в модели подходов рассчитаны прогнозные оценки накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs многолетними злаковыми травами из контрастных по свойствам почв на поздней фазе радиационной аварии.

Ключевые слова: математическая модель, ^{90}Sr , ^{137}Cs , прогнозирование динамики накопления радионуклидов растениями, поздняя фаза аварии.

Yu. O. Ivanov, Yu. V. Khomutinin

Ukrainian Scientific Research Institute of Agricultural Radiology,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Chabany, Kyiv region

**MATHEMATICAL MODELLING OF DYNAMICS OF ^{90}Sr AND ^{137}Cs MIGRATION IN COMPONENTS
OF AGROCENOSISES SOIL-PLANT COVER AT THE LATE PHASE OF RADIATION ACCIDENT.
II. MODEL VERIFICATION AND PREDICTION ASSESSMENTS**

Mathematical model for prediction of dynamics of ^{90}Sr and ^{137}Cs accumulation by perennial cereal grasses from contrasted by properties soils at the late phase of radiation accident was verified. Results of the model testing has shown the possibility of accountability of the role of processes, which predetermined the dynamics of radionuclides accumulation by plants (^{90}Sr and ^{137}Cs carry-over from root-inhabited soil layer, its immobilization and physical decay). Prediction assessments of ^{90}Sr and ^{137}Cs accumulation by perennial cereal grasses from contrasted by properties soils at the late phase of radiation accident was calculated with the use of realized in the model approaches.

Keywords: mathematical model, ^{90}Sr , ^{137}Cs , prediction of radionuclides accumulation by plants, late phase of the accident.

REFERENCES

1. *Ivanov Yu. O., Khomutinin Yu. V.* // Nucl. Phys. At. Energy. - 2015. - Vol. 16, No. 2. - P. 169 - 176. (Ukr)
2. *Ajvazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D.* Applied Statistics. Investigation of dependencies. M.: Finansy i statistika, 1985. - 488 p. (Rus)
3. *Afifi A., Ejzen S.* Statistical analysis. The approach of computer using. - Moskva: Mir, 1992. - 488 p. (Rus)
4. *Kosarchuk O.V., Lazarev M.M., Kadygrib O.M.* // Nucl. Phys. At. Energy. - 2014. - Vol. 15, No. 3. - P. 285 - 293. (Ukr)
5. *Ivanov Yu. A.* // Problemy Chornobyl'skoyi zony vidchuzhennya. - 2009. - No. 9. - P. 23 - 39. (Rus)

Надійшла 25.03.2015
Received 25.03.2015