

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІГРАЦІЇ ^{137}Cs В АГРОЛАНДШАФТАХ УКРАЇНСЬКОГО ПОЛІССЯ У ВІДДАЛЕНИЙ ПЕРІОД ПІСЛЯ АВАРІЇ НА ЧАЕС

Г.М. Чоботько, Л.А.Райчук, І.К. Швиденко, М.Д. Кучма

Інститут агроекології і природокористування НААН

Наведено результати математичного моделювання винесення ^{137}Cs із типових агроландшафтів Українського Полісся у віддалений період після Чорнобильської катастрофи. Окреслено основні процеси, які впливають на перерозподіл радіонуклідів ланками лісових, садових, лукопасовищних та польових екосистем. Встановлено, що у всіх без винятку екосистемах спостерігається зниження вмісту ^{137}Cs . Виявлено, що за умови реалізації оптимальної системи протирадіаційних заходів та активної експлуатації всі змодельовані екосистеми утворюють такий низхідний ряд за винесенням радіонукліда: лісові екосистеми — сіножаті та пасовища (подекуди овочеві ділянки) — польові екосистеми (переважно зернові та зернобобові культури) — садові екосистеми.

Ключові слова: ^{137}Cs , математична модель, агроландшафт, винесення радіонукліда.

Останніми десятиліттями проблема радіоактивного забруднення сільськогосподарської продукції на території Полісся України набула певних особливостей. За майже 34 роки, що минули після аварії на ЧАЕС, рівень радіоактивного забруднення території значно змінився. В умовах нищівної соціально-економічної ситуації доцільним та актуальним є розгляд питання радіоактивного забруднення не у межах окремих сільгоспугідь чи агроекосистем, а у межах агроландшафтів. Окресленій тематиці присвячено низку робіт як вітчизняних (зокрема «Еко модель», розроблена в Інституті агроекології і природокористування НААН) [1], так і закордонних науковців, однак у більшості з них, зазвичай, розглядається проблема у розрізі невеликих адміністративних територій. Окрім того, в основі таких досліджень лежать дані обстежень щонайменше 15–20-річної давнини.

У сучасних реаліях дедалі більшого значення набувають економічні аспекти ведення агропромислового виробництва в Українському Поліссі та питання комплексної реабілітації регіону. Слід зважати як на зміну рівнів радіоактивного забруднення території та перерозподіл радіонуклідів

між різними елементами агроландшафтів, так і на зміну радіологічного статусу деяких земель. Актуалізація наукових даних щодо згаданої проблематики та комплексне її вивчення з урахуванням не лише рівня радіонуклідного забруднення, а й його складу, нинішніх природно-кліматичних умов Українського Полісся та ландшафтної структури угідь дає змогу оцінювати та прогнозувати розвиток сільськогосподарського виробництва регіону.

Найдоцільнішим засобом у прогнозуванні будь-яких процесів, у т.ч. винесення радіонуклідів з агроландшафтів, є математичне моделювання. Тому метою нашої роботи було розроблення математичної моделі винесення радіонуклідів з агроландшафтів Полісся.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Математична модель була розроблена для відображення радіоекологічної ситуації в обмеженому регіоні, центром якого є невеликий населений пункт (селище, село або хутір). Особливостями зайнятості населення регіону Українського Полісся є ведення, переважно, сільськогосподарського виробництва, тому було враховано споживання мешканцями продукції, яку вони виробляють в районі свого проживання, а також лісових грибів та ягід.

Для зручності моделювання у нашому дослідженні ми розглядали агроландшафт досліджуваного регіону як сукупність чотирьох макроблоків (екосистем), що є функціональними одиницями модельованого агроландшафту: «лісова екосистема», «польова екосистема», «лукопасовищна екосистема» та «садова екосистема». Кожен із вказаних агроландшафтів має власну структуру і передбачає диференціацію на кілька підтипів за особливостями міграції полютанта мікроблоками екосистеми, а саме: лісова екосистема — хвойні, листяні, змішані та захисні насадження; польова екосистема — зернові, зернобобові і технічні, просапні та баштанні культури; лукопасовищна екосистема — природні та сіяні луки та пасовища; садова екосистема — промислові та присадибні сади. Кожен із цих підтипів передбачає різні коефіцієнти міжблокового переходу ^{137}Cs . Кожен із блоків характеризується певною особливістю та однорідністю. За основу в моделюванні екосистем було взято біогеохімічний цикл, що є комбінацією двох взаємопов'язаних циклів: геохімічного та біологічного. Основними ґрунтами у нашій моделі є: дерново-слабопідзолисті та дерново-середньопідзолисті (становлять близько 60% площі Українського Полісся); лугові та дернові (близько 20); торфовища та торфоболотні (10%).

Інформацію для побудови концептуальної моделі міграції радіонуклідів у лісових екосистемах було отримано з аналітичних досліджень біологічної ролі макро- та мікроеlementів [2–5]. Основним джерелом даних для створення моделі, переважно під час визначення коефіцієнтів швидкості переходу радіонуклідів із одного блоку моделі до іншого, були відповідні дані [6–17] та результати проведених нами досліджень на території Київської, Житомирської, Чернігівської, Рівненської та Волинської областей, розпочаті у 1993 р. Як додаткові джерела інформації були використані дані наукової літератури, матеріали, отримані з лісгоспів, Державної агенції лісових ресурсів України, місцевих державних адміністрацій.

Математична формалізація вказаної моделі має вигляд системи лінійних диференціальних рівнянь першого порядку зі сталими коефіцієнтами, уточнення яких було здійснено за відповідною методикою [18]. Розроблена модель належить до класу динамічних моделей і є детерміністичною за своїм характером. Невідомі показники переходу ^{137}Cs з одного блоку моделі до іншого визначено шляхом математичних розрахунків оптимальних параметрів, які зможуть забезпечити мінімальну розбіжність між експериментальними та розрахунковими значеннями за певних умов. Комп'ютерну реалізацію моделі було виконано в математичному пакеті MAPLE (version 10); графіки — у MAPLE 10 та Origin 16.

Рівень збігу прогнозів, отриманих за допомогою нашої моделі, з прогнозами вже існуючих подібних моделей (щодо лісової екосистеми) та з експериментальними даними оцінювали за значенням основної похибки. Для оцінки якості моделі, тобто наскільки добре вона відтворює дійсні часові ряди, використовували відповідну формальну статистику: середньоквадратичну похибку, середню похибку прогнозу, коефіцієнт нерівності Тейла U та відношення варіацій US .

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати досліджень, у т.ч. і експериментальних, проведених на території Українського Полісся, вказали на необхідність розробки нового підходу до моделювання радіоекологічної ситуації у цьому регіоні. Було окреслено основні чинники, що впливають на перерозподіл ^{137}Cs між елементами екосистем та значення винесення радіонукліда за їх межі. Основними процесами, що впливають на перерозподіл радіонуклідів ланками певного виду екосистеми, є: перехоплення, вивітрювання, поглинання, обробіток ґрунту, удобрення, полив, розкладання органічних решток, надходження радіонукліда в нижчі шари ґрунту, дифузія, фіксація мінералами ґрунту. Це дало змогу науково обґрунтувати та математично формалізувати модель винесення

сення ^{137}Cs за межі агроландшафтів різних регіонів Українського Полісся.

Під час побудови концептуальної схеми міграції радіонукліда в основних агроландшафтах Українського Полісся ми розглядали агроландшафт як єдине ціле, тобто як систему природних екосистем та агро-екосистем, що перебувають у взаємозв'язку і впливають одна на одну (рис. 1). Були враховані як вертикальні потоки в ланцюзі «грунт – рослина – тварина – людина», так і горизонтальні, що утворюються повітряними потоками та внаслідок людської діяльності. Ризик недооцінення чи неврахування важливих складових екосистеми або їх взаємодії зменшено завдяки використанню «інтерактивної матриці».

Загалом, математичну модель міграції ^{137}Cs основними агроландшафтами Українського Полісся сформульовано у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь:

$$\frac{dQ_i}{dt} = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N (a_{ji}Q_j + a_{ij}Q_i) + F_i(t) - \lambda Q_i,$$

де індекс j – номер блоку, в який спрямовано потік радіонукліда; індекс i – номер блоку, з якого цей потік витікає; $F_i(t)$ – надходження забруднювача у блок іззовні за одиницю часу ($\text{Бк м}^{-2}\text{т}^{-1}$); $Q_i(t)$ – уміст радіонуклідів у блоці з номером i (Бк м^{-2}); a_{ji} – ймовірність переходу радіоактивності із блоку j у блок i за одиницю часу ($t-1$); λ – швидкість напіврозпаду ^{137}Cs .

Модель може функціонувати у різних прикладних пакетах числового аналізу на основі використання даних радіологічних обстежень; розрахована на широке коло користувачів і не потребує глибоких спеціальних знань з відповідної галузі.

У розробленій нами моделі зберігається тенденція до повільного спаду концентрації ^{137}Cs в усіх мікроблоках лісової еко-

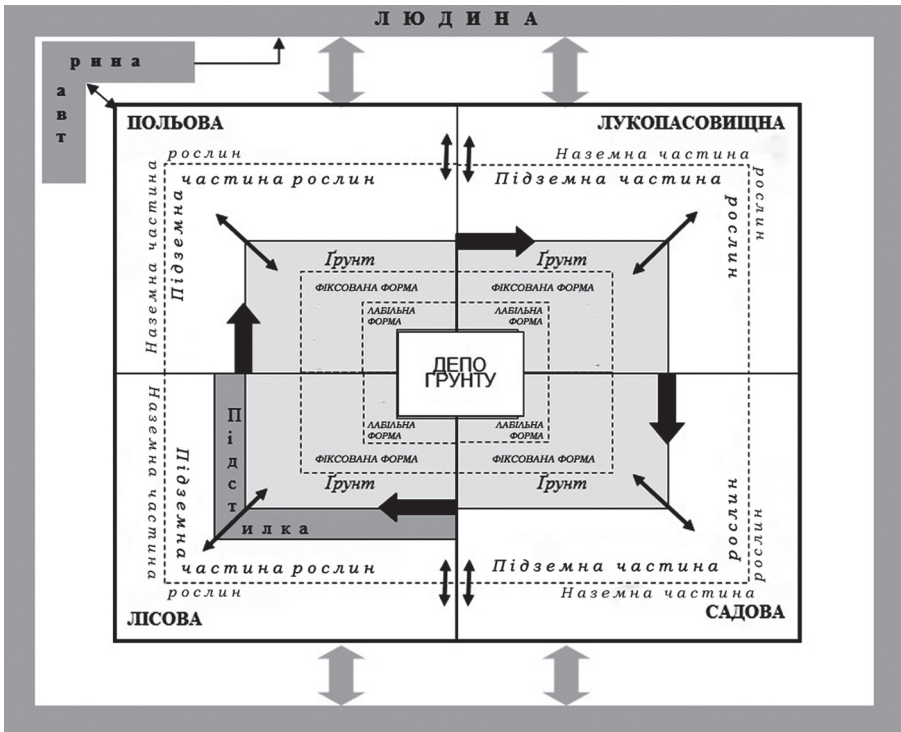


Рис. 1. Концептуальна модель міграції радіонуклідів у агроландшафтах Українського Полісся

системи, що описується експоненційною залежністю (рис. 2-а).

Аналогічними є моделі для садових (рис. 2-б), лукопасовищних (рис. 2-в) та польових (рис. 2-г) екосистем. Різняться вони лише тим, що в польовій, садовій та лукопасовищній екосистемах урахувано обробіток ґрунту, внесення добрив та передбачено врахування поливу.

Незважаючи на загальну подібність з лісовою екосистемою, вміст ^{137}Cs у мікроблоках садової екосистеми досягає свого максимуму на декілька років раніше. Це

зумовлено, насамперед, відсутністю підліска та, особливо, підстилки, яка є своєрідним бар'єром на шляху надходження забруднювачів у глибші шари ґрунту, що утримує їх упродовж певного часу, сповільнюючи колообіг радіонукліда ланками екосистеми. Найявністю обробітку ґрунту і удобрення дещо зменшує надходження ^{137}Cs у мікроблок «Дерево».

Завдяки моделюванню лукопасовищних екосистем, за відсутності проміжного бар'єра на шляху початкового аерального забруднення до рослинного покриву

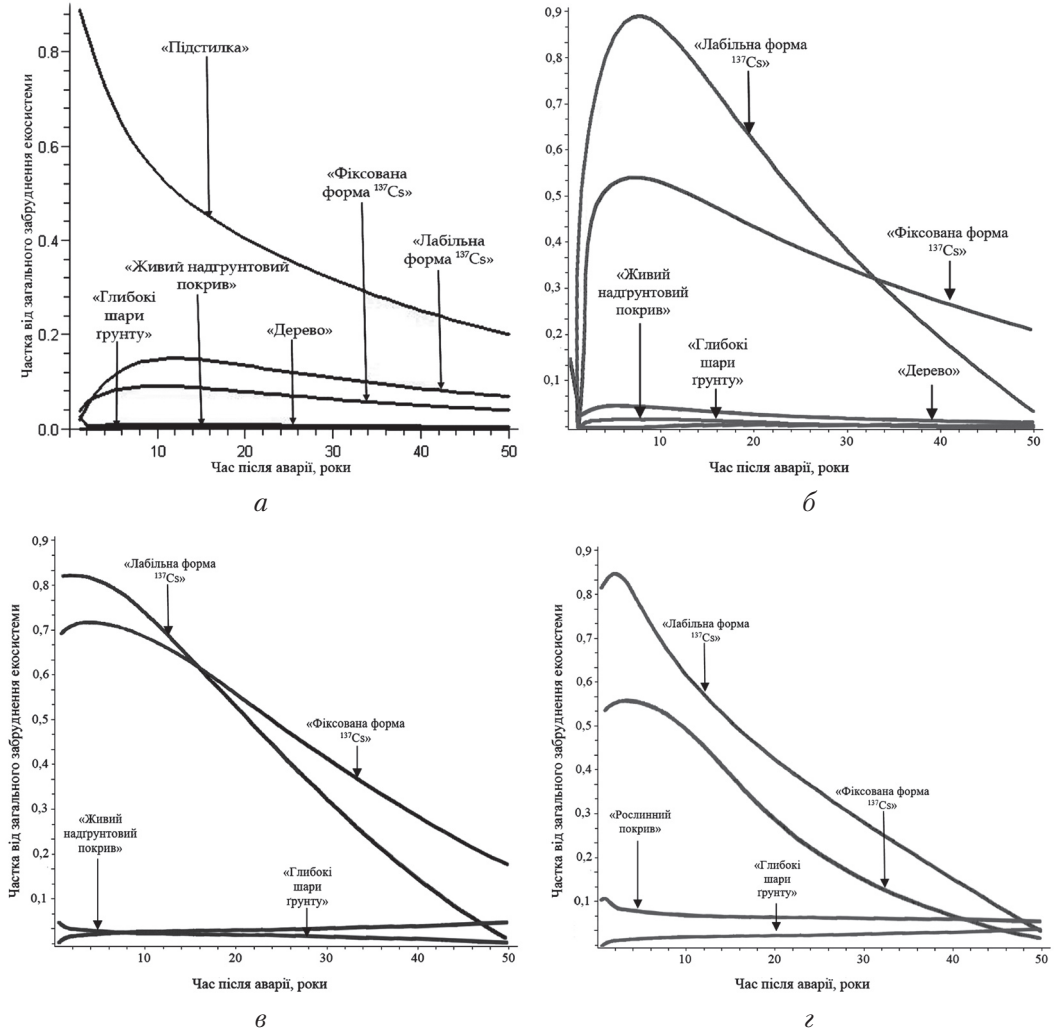


Рис. 2. Динаміка радіоактивного забруднення ^{137}Cs у підблоках моделі: а — лісова; б — садова; в — лукопасовищна; г — польова екосистеми

та ґрунту, вміст ^{137}Cs у всіх мікроблоках екосистеми, окрім глибоких шарів ґрунту (понад 80 см), поступово зменшується внаслідок дії низки як природних, так і антропогенних чинників. Наведені результати передбачають можливість періодичного поліпшення лук, що забезпечується певними операціями з обробітку і удобрення ґрунту. Слід зауважити, що реальна ситуація дещо відрізняється від модельованої, оскільки на практиці поліпшення, особливо докорінне, лук і пасовищ упродовж 1993–1996 рр. здійснювалося не належним чином і не в потрібному обсязі.

Для польових екосистем пік забруднення сільськогосподарських культур припав на перші 8 років після аварії на ЧАЕС, коли ^{137}Cs почав активно надходити не лише аеральним шляхом, але і з ґрунту. Після цього рівень забруднення рослинницької продукції поступово знижувався як унаслідок об'єктивних, незалежних від людини чинників, так і завдяки вжиттю протирадіаційних заходів. Під час моделювання було враховано припущення, що протирадіаційні заходи зреалізовано повною мірою і на постійній основі.

За умови реалізації оптимальної системи протирадіаційних заходів та активної експлуатації для всіх змодельованих екосистем найбільше винесення ^{137}Cs простежується у лісових екосистемах. Наступними за рівнем винесення полютанта є сіножаті та пасовища, іноді — овочеві ділянки. Польові (переважно зернові та зернобобові культури) та садові екосистеми за ступенем винесення радіонуклідів перебувають на останньому місці. Це обумовлено рівнем забруднення певних компонентів екосистем та їх фітомаси, а також вжитими протирадіаційними заходами.

Середньоквадратична похибка прогнозу забруднення ^{137}Cs усіх сільськогосподарських культур сягає рівня 10^{-2} – 10^{-4} , що свідчить про високу точність моделювання. Оскільки у 95% результатів дослідження значення середньої похибки прогнозу наближується до нуля, то, загалом, модель не має упередженості в оцінюванні. Для 80% розрахунків точність (зміщуваність

прогнозу) побудованої моделі не перевищує 30%. Тому можна зробити висновок, що модель міграції ^{137}Cs у ланці «ґрунт — рослина» має високу точність. Відповідно до значень коефіцієнта нерівності Тейла побудовані моделі можна використовувати для прогнозу винесення ^{137}Cs із екосистем. За показником U можна стверджувати, що, загалом, побудовані моделі є якісними, але в прогнозованих значеннях є деяка упередженість. Відношення варіацій US для моделі засвідчує, що вона має низку динамічних властивостей для поглинання варіації реальних рядів і може забезпечити менші систематичні коливання, ніж коливання реальних рядів.

ВИСНОВКИ

Основними відмінностями створеної моделі порівняно з уже існуючими є: використання актуальних показників переходу ^{137}Cs із ґрунту в рослини, урахування антропогенного втручання в агроекосистеми, зокрема, вжиття протирадіаційних заходів, урахування садових екосистем. Під час визначення показників переходу радіонуклідів з одного блоку моделі до іншого, які неможливо визначити за допомогою прямих вимірювань, були враховані також чинники, як-от: поліпшення лук і пасовищ, полив, обробіток ґрунту, внесення добрив, що виокремлює створену модель серед уже існуючих. Найскладнішими з погляду необхідної кількості врахованих показників є лісові екосистеми, а щодо варіабельності антропогенного впливу — польові.

Порівняння результатів моделювання лісового блоку моделі зі схожими моделями інших авторів засвідчило високий рівень збігу. Особливо високим є збіг для блоків форми вмісту радіонукліда в ґрунті — 85 та 81% для фіксованої та лабільної форми ^{137}Cs відповідно. Для глибоких шарів ґрунту частка збігу є найнижчою (60%). Такі результати пояснюються низьким ступенем впливу людини на екосистему і, відповідно, вищою порівняно з польовими чи лукопасовищними екосистемами точністю моделювання.

Верифікація моделі шляхом обчислення низки статистичних показників продемонструвала високу точність прогнозів та відсутність неточностей в оцінюванні. Побудовані макроблоки моделі мають низку динамічних властивостей для поглинання варіації реальних рядів даних і можуть забезпечити менші систематичні коливання порівняно з останніми.

Аналіз результатів моделювання засвідчив, що у всіх без винятку модельованих екосистемах спостерігається зниження

вмісту ^{137}Cs . Цей процес є характерним для всіх вказаних мікроблоків, окрім глибоких шарів ґрунту (понад 80 см), де відбувається повільне накопичення радіонукліда. Виявлено, що за умови реалізації оптимальної системи протирадіаційних заходів усі змодельовані екосистеми утворюють такий низхідний ряд: лісові екосистеми — сіножаті та пасовища (іноді овочеві ділянки) — польові екосистеми (переважно зернові та зернобобові культури) — садові екосистеми.

ЛІТЕРАТУРА

1. Екомодель: динамічна модель для радіоекологічної ситуації / В.А. Гірій, В.Р. Заїтов, В.А. Онишук, І.І. Ясковець // *Агроекологія й біотехнологія*. — 1999. — № 3. — С. 25–34.
2. *Nikolova I.* The accumulation of ^{137}Cs in the biological compartment of forest soils / I. Nikolova, K.J. Johanson, S. Clegg // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2000. — Vol. 47. — P. 319–326.
3. *Jongmans A.G.* Rock-eating fungi / A.G. Jongmans // *Nature*. — 1997. — Vol. 389. — P. 682–683.
4. *Rafferty B.* Decomposition in two pine forests: the mobilisation of ^{137}Cs and K from forest litter / B. Rafferty, D. Dawson, A. Kliashtorin // *Soil Biol. Biochem.* — 1997. — Vol. 29, No. 11/12. — P. 1673–1681.
5. *Steiner M.* The role of fungi in the transfer and cycling of radionuclides in forest ecosystems / M. Steiner, I. Linkov, S. Yoshida // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2002. — Vol. 58 — P. 217–241.
6. *Василенков С.В.* Технологии и технические решения по реабилитации радиоактивно загрязненных цезием территорий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / С.В. Василенков. — М., 2017. — 51 с.
7. Накопичення ^{137}Cs головними лісоутворювальними деревними породами Центрального Полісся / В.П. Краснов, В.М. Турко, С.П. Ірклієнко, І.Д. Іванюк // *Лісівництво й агролісомеліорація*. — 1999. — Вип. 95. — С. 9–15.
8. *Прикладная радиоэкология леса: Монография / [В.П. Краснов, А.А. Орлов, В.А. Бузун и др.]; под ред. д-ра с.-х. наук В.П. Краснова. — Житомир: Полісся, 2007. — 680 с.*
9. *Краснов В.П.* Радиоэкология съедобных макромицетов / В.П. Краснов, А.А. Орлов, Т.В. Курбет. — Житомир: Вольнь, ЧП «Рута», 2006. — 220 с.
10. Порівняльна оцінка ролі різних компонентів лісової екосистеми лишайникового бору у розподілі сумарної активності ^{137}Cs / [О.О. Орлов, С.П. Ірклієнко, О.Л. Прищеп та ін.] // *Проблеми екології лісу та лісокористування на Поліссі України*. — 2001. — Вип. 2(8). — С. 10–25.
11. Результаты динамического моделирования радиоэкологической обстановки в Украинском Полесье и сравнение их с данными измерений / И.И. Ясковец, В.А. Гиррий, В.А. Онишук, Л.И. Шпиннар // *Агроекологічний журнал*. — 2001. — № 2. — С. 62–67.
12. Simulation of ^{137}Cs migration over the soil–plant system of peat soils contaminated after the Chernobyl accident / S.V. Fesenko, S.I. Spiridonov, N.I. Sanzharova et al. // *Russian Journal of Ecology*. — 2002. — Vol. 33, No. 3. — P. 170–177.
13. *Goor F.* Processes, dynamics and modelling of radio-caesium cycling in a chronosequence of Chernobyl contaminated Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations / F. Goor, Y. Thiry // *Science of the Total Environment*. — 2004. — Vol. 325 — P. 163–180.
14. *Mamikhin S.V.* A simulation model of 3D migration of Cs-137 in soils / S.V. Mamikhin, W.M. Badawy // *Вестник Московского университета*. — 2011. — № 4. — С. 32–36. — (Серия: Почвоведение).
15. *Maskalchuk L.* Modeling of ^{137}Cs migration from soil to plants after usage of chemical matters / L. Maskalchuk, A. Baklay, T. Leontieva // *World Journal of Nuclear Sciences & Engineering*. — 2014. — Vol. 1, No. 1. — P. 1–7.
16. Modelling the migration and accumulation of radionuclides in forest ecosystems: Final report on the BIOMASS Forest Working Group activities 1998–2000. — Vienna: IAEA, 2000. — 125 p.
17. Model-directed sampling in Chernobyl forests: general methodology and 1994 sampling program / [W.R. Schell, I. Linkov, V. Remkevich et al.] // *The Science of the Total Environment*. — 1996. — No. 180. — P. 119–240.
18. *Перетятко Є.Є.* Метод розширення динамічних компартментних моделей міграції радіонуклідів у лісових екосистемах / Є.Є. Перетятко, Л.А. Прокopenko, І.І. Ясковець // *Агроекологічний журнал*. — 2006. — № 2. — С. 58–63.

REFERENCES

- Hiriy, V.A., Zayitov, V.P., Onyshchuk, V.A., & Yaskovets, I.I. (1999). Ekomodel: dynamichna model dlya radioekolohichnoyi sytuatsiyi [Ecomodel: dynamic model for Radiological situation]. *Ahroekolohiya y biotekhnolohiya – Agroecology and biotechnology*, 3, 25–34 [in Ukrainian].
- Nikolova, I., Johanson, K.J., & Clegg, S. (2000). The accumulation of ^{137}Cs in the biological compartment of forest soils. *Journal of Environmental Radioactivity*, 47, 319–326 [in English].
- Jongmans, A.G. (1997). Rock-eating fungi. *Nature*, 389, 682–683 [in English].
- Rafferty, B., Dawson, D., & KliashTORIN, A. (1997). Decomposition in two pine forests: the mobilisation of ^{137}Cs and K from forest litter. *Soil Biol. Biochem*, 29(11/12), 1673–1681 [in English].
- Steiner, M., Linkov, I., & Yoshida, S. (2002). The role of fungi in the transfer and cycling of radionuclides in forest ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity*, 58, 217–241 [in English].
- Vasilenkov, S.V. (2017). Tehnologii i tehnicheskie resheniya po rehabilitatsii radioaktivno zagryaznennykh terytoriy [Technologies and technical solutions for the rehabilitation of territories contaminated by cesium]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Moskva [in Russian].
- Krasnov, V.P., Turko, V.M., Irklienکو, S.P., & Ivan-yuk, I.D. (1999). Nakopychennia ^{137}Cs holovnymy lisoutvoriuvahlynymy derevnymy porodamy Tsentralnoho Polissia [^{137}Cs accumulation is the main forest-forming wood species of the Central Polesie]. *Lisivnytstvo i ahrolisomeliioratsiia – Forestry and agroforestry*, 95, 9–15 [in Ukrainian].
- Krasnov, V.P., Orlov, A.A., Buzov, V.A. et al. (2007). *Prikladnaja radiojekologija lesa: monografija* [Applied Forest Radioecology: monograph]. V.P. Krasnov (Ed.). Zhytomyr: Polissia [in Russian].
- Krasnov, V.P., Orlov, A.A. & Curvet, T.V. (2006). *Radiojekologija syedobnykh makromicetov* [The radioecology of edible macromycetes]. Zhitomir: Volyn', ChP «Ruta» [in Russian].
- Orlov, O.O., Irklienکو, S.P., & Pryshchepa, O.L. et al. (2001). Porivnialna otsinka roli riznykh komponentiv lisovoi ekosystemy lyshainykovoho boru u rozpodili sumarnoi aktyvnosti ^{137}Cs [Comparative evaluation of the role of different components of the lichen pine forest ecosystem in the distribution of ^{137}Cs total activity]. *Problemy ekolohii lisu ta lisokorystuvannia na Polissi Ukrainy – Problems of forest ecology and forest management in the Polesie of Ukraine*, 2(8), 10–25 [in Ukrainian].
- Yaskovets, I.I., Giryi, V.A., Onischuk, V.A., & Spinar, L.I. (2001). Rezultaty dinamicheskogo modelirovaniya radiojekologicheskoy obstanovki v Ukrainskom Polesye i sravnenie ih s dannymi izmerenij [The results of dynamic modeling of the radioecological situation in Ukrainian Polesie and their comparison with measurement data]. *Ahroekolohichnyy zhurnal – Agroecological journal*, 2, 62–67 [in Russian].
- Fesenکو, S.V., Spiridonov, S.I., Sanzharova, N.I., Anisimov, V.S., & Aleksakhin, R.M. (2002). Simulation of ^{137}Cs migration over the soil–plant system of peat soils contaminated after the Chernobyl accident. *Russian Journal of Ecology*, 33(3), 170–177 [in English].
- Goor, F., & Thiry, Y. (2004). Processes, dynamics and modelling of radiocaesium cycling in a chronosequence of Chernobyl contaminated Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations. *Science of the Total Environment*, 325, 163–180 [in English].
- Mamikhin, S.V., & Badawy, W.M. (2011). A simulation model of 3D migration of Cs-137 in soils. *Vesnyk Moskovskoho Unyversyteta: Pochvovedenye – Bulletin of Moscow University: Soil science*, 4, 32–36 [in English].
- Maskalchuk, L., Baklay, A., & Leontieva, T. (2014). Modeling of ^{137}Cs migration from soil to plants after usage of chemical matters. *World Journal of Nuclear Sciences & Engineering*, 1(1), 1–7 [in English].
- Modelling the migration and accumulation of radionuclides in forest ecosystems. Final report on the BIOMASS Forest Working Group activities 1998–2000. (2002). Vienna: IAEA [in English].
- Schell, W.R., Linkov, I., Remkevich, V., Chistic, O., Lutsko, A., Dvornik, A.M., & Zhuchenko, T.A. (1996). Model-directed sampling in Chernobyl forests: general methodology and 1994 sampling program. *The Science of the Total Environment*, 180, 119–240 [in English].
- Peretyatko, Y.Y., Prokopenko, L.A., & Yaskovets, I.I. (2006). Metod rozshyrennia dynamichnykh kompartmentnykh modelei mihratsii radionuklidiv u lisovykh ekosystemakh [Method for extending dynamic compartmental models of radionuclide migration in forest ecosystems]. *Ahroekolohichnyy zhurnal – Agroecological journal*, 2, 58–63 [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції журналу 18.01.2020