

В.М. Янчук, доц.
Житомирський інженерно-технологічний інститут

АВТОМАТИЗАЦІЯ ФОРМУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ МІГРАЦІЇ РАДІОНУКЛІДІВ В ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ

Складність формування математичних моделей робить неможливим їх використання фахівцями-екологами з погляду побудови самої моделі і подальшого пошуку її чисельних параметрів. Основні складнощі криються в недоступності використання математичного моделювання екологами через складність формування математичних моделей та їх подальшого дослідження. У даній роботі викладені основні підходи, що використовуються для автоматизації побудови математичної моделі, та наведено приклад використання авторського програмного забезпечення для побудови та дослідження математичної моделі міграції радіонуклідів в лісових екосистемах.

У даній роботі викладені основні підходи, що використовуються для автоматизації побудови математичної моделі і пошуку коефіцієнтів моделі на базі балансових співвідношень активності ^{137}Cs , отриманої для компартментів в процесі радіоекологічних досліджень. Процес побудови математичних моделей радіоекологічних процесів необхідно проводити за певним сценарієм, використання ж інформаційних систем дозволяє автоматизувати цей процес і в подальшому також дозволяє автоматизувати інтерпретацію отриманих результатів моделювання.

В даній статті описані особливості методики автоматизації побудови математичної моделі та її реалізації в інформаційно-довідниковій системі "Полинь". Запропонована методика автоматизації, реалізована в згаданій системі, здійснює перехід від предметних понять та термінів до формалізованих описів складових екосистеми та реалізує процедуру формування математичної моделі міграції ^{137}Cs в лісових екосистемах. Цей процес передбачає підбір параметрів математичної моделі міграції ^{137}Cs в лісових екосистемах. Завдяки запропонованій методиці стала можливою побудова математичних моделей міграції ^{137}Cs в лісових екосистемах загального типу з подальшою деталізацією на конкретні види екосистем (за типами умов місцезростання, породним складом деревостану тощо).

Методика формування математичної моделі міграції ^{137}Cs в лісових екосистемах

Представлений на рис. 1 граф отримано адаптуванням концептуальної схеми взаємодії складових лісової екосистеми шляхом вилучення складових, які нині математичній моделі поки не враховуються. Вузли графа представляють компартменти екосистеми, де x_1 – x_{10} – мінеральні шари ґрунту завтовшки 2 см, що знаходяться один під одним; де x_1 – найвищий і x_{10} – найнижчий з тих, що розглядаються; x_{11} – блок деревини, представлений сукупністю органів рослин та сумарною активністю ^{137}Cs всього компартмента. Блок підстилки представлений трьома складовими: x_{12} , x_{13} , x_{14} – свіжа, напіврозкладена та розкладена лісова підстилка відповідно. Блок надземної фітомаси представлений змінною x_{15} .

Окремо в даній екосистемі представлені види грибів x_{16} , x_{17} . Таке виділення грибів в окремі змінні зумовлено тим, що зазначені види живляться з різних рівнів екосистеми, що не дозволяє їх об'єднання в один блок, оскільки сумування значень активностей ^{137}Cs у грибах лише спотворить картину міграції ^{137}Cs у лісовій екосистемі.

На основі схеми-графа фітоценозу можна побудувати матрицю зв'язків компартментів лісової екосистеми, поставивши на перетині рядків та стовпців кількість зв'язків, якими зв'язані дані вершини за принципом побудови матриці суміжностей в графах.

На основі даної матриці встановлюються залежності між компартментами лісової екосистеми, які дозволяють визначити напрямки потоків ^{137}Cs в екосистемі.

Оскільки функції, що описують процеси міграції ^{137}Cs між компартментами екосистеми, невідомі і в деяких випадках залежать від часу, а дослідження таких залежностей є складним процесом, слабо вивченим на сьогоднішній день [10], в запропонованій моделі використовуватимуться постійні коефіцієнти міграції ^{137}Cs .

Пошук коефіцієнтів моделі здійснюється шляхом аналізу балансу сумарних активностей ^{137}Cs у компартментах лісової екосистеми. Виходячи з міркування, що з досліджуваної екосистеми не здійснюється винесення ^{137}Cs , згаданий баланс за певний рік буде дорівнювати різниці балансу сумарної активності ^{137}Cs (добутку питомої активності на одиницю маси) за

попередній рік та наступний рік, з урахуванням річного значення радіоактивного розпаду ^{137}Cs . Таким чином, на основі графа потоків ^{137}Cs у лісовій екосистемі (рис. 1) та на основі матриці зв'язків між компартментами екосистеми можна побудувати систему рівнянь балансів активностей ^{137}Cs для всіх компартментів екосистеми.

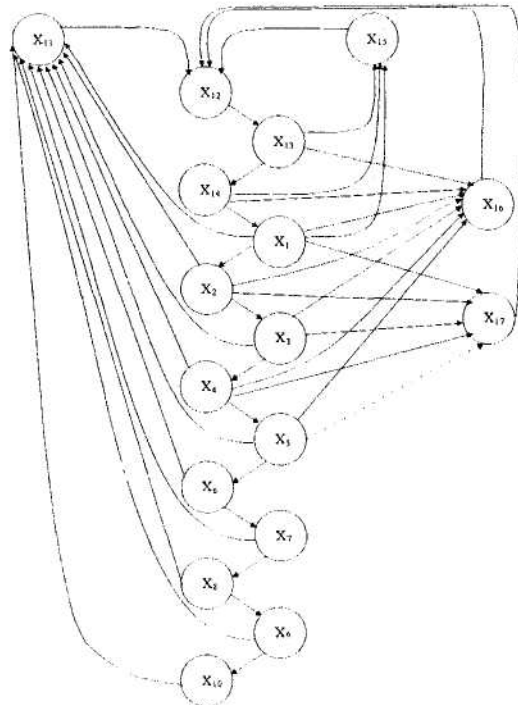


Рис. 1. Граф потоків ^{137}Cs у лісовій екосистемі

У загальному вигляді систему рівнянь можна представити у вигляді:

$$\sum_{\substack{i=1, n, \\ i \neq k}} a_{i-k} \cdot l_{i-k} \cdot x_i(t_1) - x_k(t_1) \cdot \sum_{\substack{i=1, n, \\ i \neq k}} a_{k-i} \cdot l_{k-i} = x_k(t_2) - (1 - \lambda - q_k) x_k(t_1),$$

де n – кількість компартментів; k – номер компартмента; l_{k-i} – коефіцієнти, взяті з матриці зв'язків на перетині рядка k -го компартмента та стовпчика i -го компартмента; x_i – активність i -го компартмента екосистеми (Бк/м²); t_1 та t_2 – моменти відбору проб (роки); λ – постійна напіврозпаду ^{137}Cs ; q_k – коефіцієнт зв'язування ^{137}Cs з компартментом; a_{i-j} – невідомі коефіцієнти моделі (вагові коефіцієнти міграції ^{137}Cs між компартментами екосистеми).

Описаних вище залежностей недостатньо для відшукування коефіцієнтів перед змінними, які описують активності компартментів. Таких коефіцієнтів значно більше, ніж компартментів, і тому решта невідомих коефіцієнтів встановлюється на основі життєвого циклу екосистеми. Співвідношення між коефіцієнтами необхідно задавати у вигляді відношень між компартментами екосистеми. Зазвичай такі співвідношення встановлюються за результатами аналізу фізичного змісту фізико-хімічних та біологічних процесів міграції ^{137}Cs у компартментах екосистеми. Таким чином, записавши залежності балансів активностей відносно невідомих коефіцієнтів, отримуємо систему алгебраїчних рівнянь, де у випадку, коли користувач визначив нелінійні залежності між коефіцієнтами системи, отримуємо систему нелінійних рівнянь; при заданні лінійних залежностей – систему лінійних алгебраїчних рівнянь.

Розглянемо основні підходи, які використані автором для встановлення співвідношень між коефіцієнтами. Так, на основі висновків про вертикальний розподіл сисних коренів сосни, у якої на глибині до 15 см знаходиться до 80 % коріння, і те, що залежність коефіцієнта поглинання від глибини має експоненціальний характер, для кожного шару ґрунту можна встановити відношення між коефіцієнтами переходу ^{137}Cs з мінерального шару до сосни [10, 12].

При розв'язку отриманої системи рівнянь доцільне застосування чисельного аналізу, оскільки порядок системи рівнянь при дослідженні екосистем із багатьма компартментами може бути великий (для випадку з 18 компартментами таких рівнянь буде 44).

Формування математичної моделі міграції ^{137}Cs у лісових екосистемах здійснюється за принципом формування компартментних моделей природних екосистем, описаним

В.Б. Георгієвським [11], і проводиться нами на основі концептуальної схеми міграції ^{137}Cs у лісовій екосистемі, в якій кожний компартмент, що входить в екосистему, описується одним рівнянням у системі звичайних диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\frac{dx_k}{dt} = \sum_{\substack{i=1, n, \\ i \neq k}} a_{i-k} \cdot l_{i-k} \cdot x_i - x_k \cdot \left(\sum_{\substack{i=1, n, \\ i \neq k}} a_{k-i} \cdot l_{k-i} + \lambda + q_k \right),$$

де l_{k-i} – коефіцієнти, взяті з матриці зв'язків між складовими екосистеми; x_i – активність відповідного компартмента екосистеми ($\text{Бк}/\text{м}^2$); λ – постійна напіврозпаду ^{137}Cs , років; q – коефіцієнт зв'язування ^{137}Cs з компартментом; a_{i-j} – коефіцієнти, отримані в результаті розв'язку системи рівнянь (вагові коефіцієнти міграції ^{137}Cs між компартментами екосистеми).

Наведену процедуру можна застосувати і для екосистем з меншою кількістю компартментів. Дана екосистема включає в себе основні компартменти фітоценозу, але при необхідності вилучення одного з компартментів зменшить розмірність матриці зв'язків, оскільки вилучаються відповідні зв'язки, що зв'язують даний компартмент з іншими. В такому випадку необхідно знову визначити вагові коефіцієнти зв'язків, для чого необхідно залучати фахівця з предметної області (фітоценолога, радіоеколога) або шукати можливі шляхи автоматизації процедури побудови математичних моделей заданням шаблонних моделей екосистем.

На даному етапі видно, що для автоматизації процедури побудови математичної моделі недостатньо використовувати систему чисельного аналізу для вирішення системи алгебраїчних рівнянь, яка в даному випадку є лінійною, а взагалі може бути і нелінійною, за умови, що фахівець з предметної області опише нелінійну складову рівнянь балансу сумарної активності ^{137}Cs у компартментах екосистеми. Використання певної програмної системи чисельного аналізу для розв'язання системи диференціальних рівнянь не є достатнім заходом для автоматизації побудови та аналізу математичної моделі, оскільки процедура формування моделі також є трудомісткою. Згідно із запропонованою методикою доцільно застосувати інформаційно-довідникову систему, що дасть можливість автоматизації процедури формування математичної моделі та її подальшого аналізу з можливістю інтерпретації отриманих результатів.

Чисельний аналіз міграції ^{137}Cs радіонуклідів в лісових екосистемах

На основі описаної вище процедури здійснюється чисельний аналіз побудованої математичної моделі. На рис. 2 представлено фрагмент сформованої математичної моделі міграції радіонуклідів у лісовій екосистемі В₃, де користувач може переглянути вагові коефіцієнти зв'язків в екосистемі і рівняння, що описують динаміку міграції радіонуклідів в екосистемі.

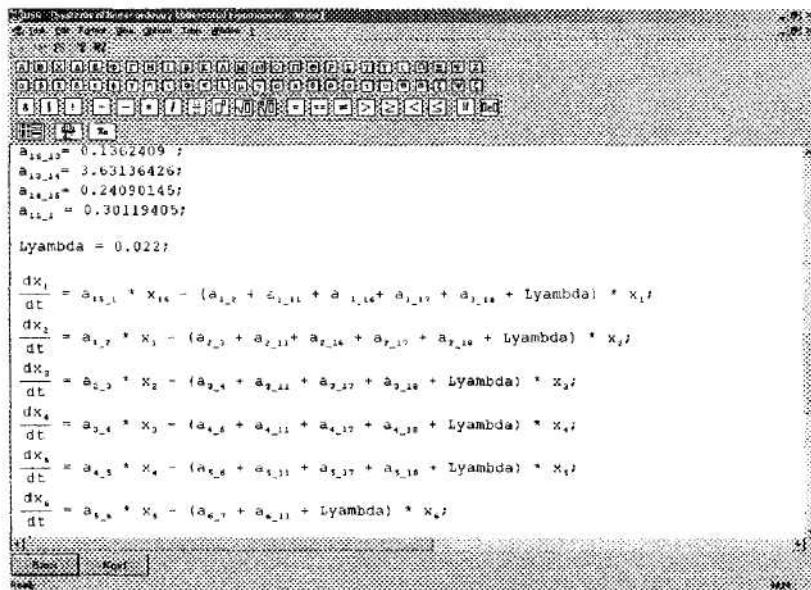


Рис. 2. Фрагмент сформованої математичної моделі міграції радіонуклідів в лісовій екосистемі В₃

Початковими умовами для дослідження математичної моделі є активність поверхневого забруднення екосистеми. В даній математичній моделі початковими даними також є вік екосистеми, на основі якого визначаються співвідношення між органами рослинного організму.

На рис. 3 представлено приклад результатів дослідження міграції радіонуклідів в складовій мінерального шару на глибині 0–2 см у табличному вигляді.

Свіжа підстилка (рис. 4) затримує невелику кількість радіонуклідів, оскільки лише зв'язний радіоцезій затримується у верхньому шарі, решта просочується у напіврозкладену та розкладену підстилку.

t	x1	x1'	Mistake
1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1.145729	0.013211	0.259542	0.000001
1.291457	0.093533	0.876376	0.000003
1.437186	0.279425	1.675154	0.000004
1.582915	0.592301	2.560008	0.000016
1.728643	1.038109	3.463783	0.000016
1.874372	1.616767	4.350771	0.000015
2.020101	2.312305	5.187718	0.000058
2.165829	3.153739	6.001227	0.000054
2.311558	4.113217	6.757927	0.000050
2.457286	5.181933	7.454675	0.000046
2.603015	6.350777	8.090388	0.000042
2.748744	7.571157	8.648715	0.000152
2.894472	8.868781	9.150703	0.000136
3.040201	10.235534	9.597688	0.000120
3.185930	11.663515	9.991309	0.000106
3.331658	13.145080	10.333406	0.000091
3.477387	14.672964	10.625958	0.000077
3.623116	16.239796	10.871034	0.000064
3.768844	17.839112	11.070768	0.000051

Рис. 3. Приклад табличного представлення результатів дослідження

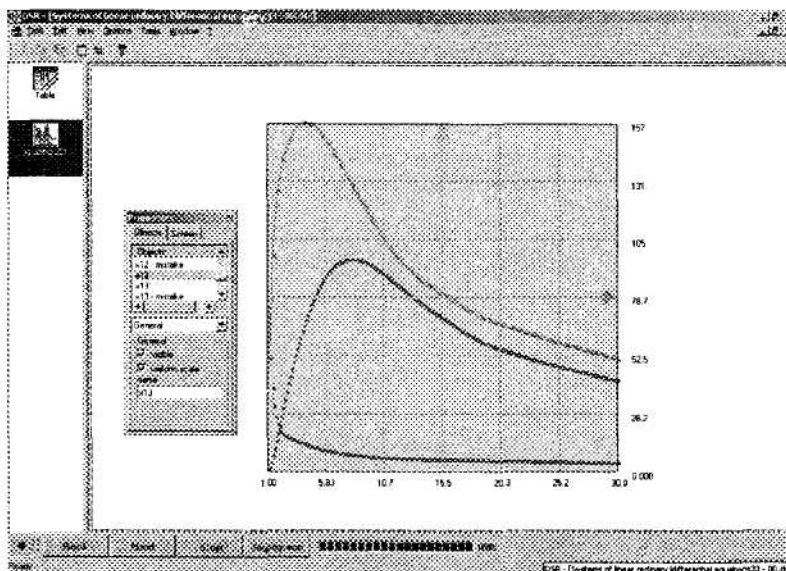


Рис. 4. Приклад графічного представлення результатів дослідження: свіжа, напіврозкладена та розкладена підстилка

Аналіз результатів моделювання

Отримані в роботі результати було порівняно з даними радіомоніторингу для Поліського регіону за період 1991–1997 рр.

Попередній аналіз даних радіомоніторингу показав, що за даними радіомоніторингу важко простежити певну тенденцію, оскільки велика плямистість забруднення території дається взнаки, в результаті чого розбіжність результатів радіомоніторингу на невеликій площі суттєва.

Наступні рисунки ілюструють графічне представлення результатів моделювання міграції радіонуклідів в окремих компартментах лісової екосистеми. Так, на рисунку 5 представлено прогноз міграції ^{137}Cs у мінеральних шарах ґрунту. Простежується чітка тенденція накопичення активності ^{137}Cs у мінеральних шарах 0–2 см та 2–4 см у 1986–1993 рр. з поступовим зменшенням у наступний період. У решти мінеральних шарів спостерігається більш пізній максимум вмісту згаданого радіонукліда; згаданий максимум настає тим пізніше, чим глибше розташований мінеральний шар. Свіжа підстилка затримує невелику кількість радіонуклідів, оскільки вміст у ній ^{137}Cs значно зменшився у порівнянні з першим післяаварійним періодом. Додатковим фактором також є те, що лише біологічно зв'язаний ^{137}Cs затримується у цьому шарі, та відбувається інтенсивне вилуговування радіонукліда, який надходить у напіврозкладену та розкладену підстилку.

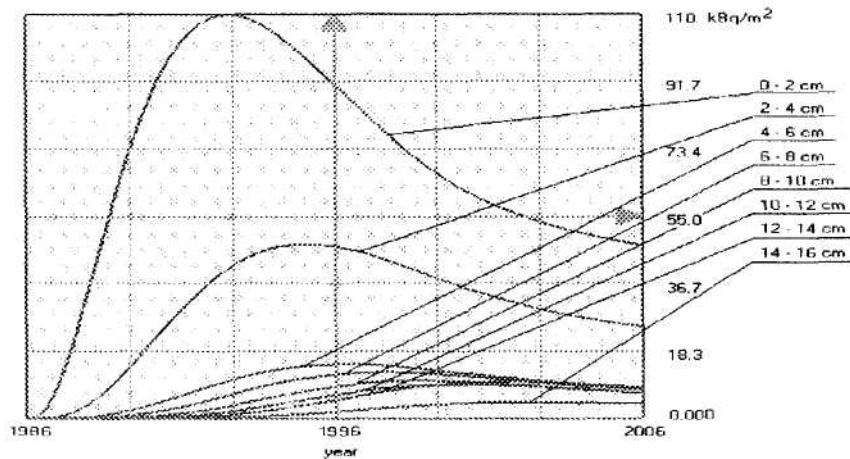


Рис. 5. Приклад графічного представлення результатів дослідження: мінеральні шари ґрунту

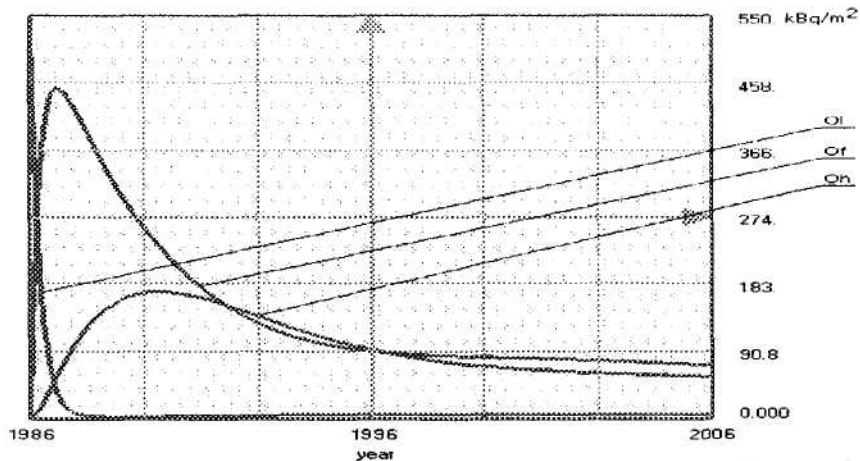


Рис. 6. Приклад графічного представлення результатів дослідження: свіжа, напіврозкладена та розкладена лісова підстилка

Аналіз накопичення ^{137}Cs грибами представлено на рис. 7, з якого можна зробити висновок про те, що польський гриб є більш інтенсивним акумулятором даного радіонукліда, максимум його радіоактивного забруднення припадає на 1991–1992 рр., після чого відбувається досить швидке зменшення вмісту ^{137}Cs у плодових тілах. Пояснюється це тим, що його міцелій займає весь шар лісової підстилки. У сирійки болотної міцелій знаходиться у шарі розкладеної підстилки та у мінеральних шарах ґрунту глибиною до 5 см, тому пік радіоактивного забруднення плодових тіл цього виду припадає на 1996 рік, після чого відбувається повільне зменшення даного показника. Особливо слід підкреслити, що авторами була проведена валідація розробленої моделі на реальних даних радіоекологічного моніторингу 2001 р. по всіх компартментах екосистеми. Виявлено, що різниця прогнозних та фактичних даних у всіх

випадках знаходилася в межах $\pm 15\%$, що є високим показником для моделювання, в той час, коли цей показник у більшості інших „лісових” моделей перевищує $\pm 25\%$. Також слід наголосити, що отримані нами тенденції зміни вмісту ^{137}Cs у компартментах лісової екосистеми аналогічні результатам, наведеним іншими дослідниками [1–5].

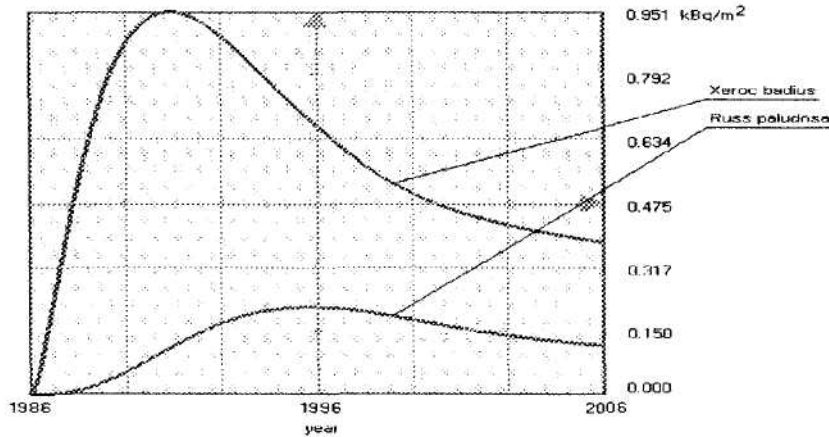


Рис. 7. Приклад графічного представлення результатів дослідження: польський гриб та сирійжка

Необхідність використання прикладного програмного забезпечення у складі інформаційної системи та програмної системи чисельного аналізу викликана потребою реалізації багатоступового підходу побудови математичної моделі [13] і використання чисельного аналізу не тільки на етапі побудови прогнозу або остаточного аналізу, але також у процесі побудови моделі для попередньої обробки даних моніторингу та отримання коефіцієнтів математичної моделі. Сутність запропонованого процесу побудови математичної моделі полягає в тому, що процес побудови є багатоступовим з погляду формування математичної моделі. Це дозволяє на кожному з етапів не тільки описувати кожен складову екосистеми за допомогою різних видів математичних структур, а також результати моделювання процесів, виділених на даному етапі, але й подавати останні як вхідні дані для моделей наступного етапу. Такий підхід значно полегшує процес побудови математичної моделі і розширює коло задач, які можна вирішувати в рамках дослідження радіоекологічних процесів екосистем.

При інтеграції інформаційної системи з пакетом чисельного аналізу основне навантаження перенесено з формування математичної моделі на інформаційну систему, а прикладна система математичного моделювання виконує чисельний аналіз на етапі дослідження задачі.

Висновки

1) Запропонована математична модель міграції радіонуклідів в лісовому фітоценозі В₃ відрізняється від аналогів відсутністю розподільчого пулу, що описує кореневе всмоктування рослинних організмів та життєдіяльність грибів. Аналіз даних процесів враховано у відповідних блоках екосистеми, що дозволяє чіткіше простежити особливості накопичення радіонуклідів складовими екосистеми. Відмова від розподільчого пулу стала можливою за рахунок виділення важливих характеристик компартментів з формалізованих описів складових екосистем.

2) Використання інформаційної системи в інтеграції з прикладним пакетом чисельного аналізу прискорює побудову математичної моделі, даючи можливість варіювати кількістю досліджуваних компартментів екосистеми.

3) Математична модель використовує невеликий набір вхідних даних, що дозволяє досліджувати території з великою мозаїчністю радіоактивного забруднення.

4) Прогноз динаміки міграції радіоцезію в компартментах лісових екосистем має прикладне значення і зокрема є ефективним заходом для визначення періодів напівочищення екосистем, визначення періодів часу, коли продукти лісу стануть придатними для використання.

5) На основі порівняння результатів математичного моделювання з даними радіомоніторингу видно, що результати математичного моделювання повторюють тенденцію

даних радіомоніторингу, при чому результати математичного моделювання потрапляють в довірчий інтервал даних радіомоніторингу.

б) Дана математична модель відкрита для нарощування компартментів і може бути легко модифікована для аналізу природних екосистем інших видів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Schell W.R., Linkov I., Myttenaere C. and Morel B. A dynamic model for evaluating radionuclide distribution in forest from nuclear accidents // Health Phys. – 1996. – Vol. 70, № 3. – P. 318–335.
2. Van Voris C., Cowan C.E., Cataldo D.A. et al. Chernobyl case study: modeling the dynamics of long-term cycling and storage of Cs-137 in forested ecosystems // Transfer of radionuclides in natural and semi-natural environments / Eds. G.Desmet, P.Nassimbeni and M.Belli. – London – New York: Elsevier applied science, 1990. – P. 61–73.
3. Shaw G., Mamikhin S., Dvornik A., Zhuchenko T. Forest model descriptions // Behaviour of radionuclides in natural and semi-natural environments / ECP-5 Final Report: European Commission EUR 16531. – Luxembourg, 1996. – P. 26–31.
4. Dvornik A. and Zhuchenko T. Phenomenologic model FORESTLIFE and prediction of radioactive contamination of forests in Belarus // Contaminated forests : recent developments in risk identification and future perspectives / Eds. I. Linkov and W.R. Schell. – NATO ASI Series 2. – Vol. 58. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. – P. 185–194.
5. Mamikhin S.V., Tikhomirov F.A., Shcheglov A.I. Dynamics of Cs-137 in the forests of 30-km zone around the Chernobyl nuclear power plant // Sci. Total Environ. – 1997. – Vol. 193. – P. 169–177.
6. Avila R., Moberg L., Hubbard L. et al. Conceptual overview of FORESTLAND – a model to interpret and predict temporal and spatial patterns of radioactively contaminated forest landscapes // Contaminated forests : recent developments in risk identification and future perspectives / Eds. I. Linkov and W.R. Schell. – NATO ASI Series 2. – Vol. 58. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. – P. 1735–184.
7. Konoplev A.V., Avila R., Bulgakov A.A. et al. Modelling of radiocaesium bioavailability in forest soils // Agraria. – Vol. 136. – Uppsala, 1998. – P. 1–13.
8. Орлов А.А., Иркиенко С.П., Калиш А.Б. Многолетняя динамика радиоактивного загрязнения компонентов биогеоценоза сосняка чернично-зеленомошного в Украинском Полесье // Междунар. конф. «Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях». – Труды. – Т. 2. – СПб: Гидрометеоздат, 2000. – С. 249–254.
9. Hillbricht-Ilkowska A. Managing ecotones for nutrients and water // Ecology International. – 1995. – № 22. – Pp. 73–93.
10. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. – М.: Наука, 1999. – 268 с.
11. Георгиевский В.Б. Экологические и дозовые модели при радиационных авариях. – К.: Наук. думка, 1994. – 236 с.
12. Основи лісової радіоекології / За ред. М.М. Калетника // Держкомлісгосп України, 1999. – 252 с.
13. Колодницький М.М., Орлов О.О., Янчук В.М., Прищепка О.Л., Калиш О.Б. Багатоетапний процес побудови математичної моделі міграції радіонуклідів в лісових екосистемах українського Полісся після аварії на Чорнобильській АЕС // Вісник ЖІТІ, 2000. – № 12 / Технічні науки. – С. 221–225.

ЯНЧУК Валентин Миколайович – доцент кафедри автоматизації і комп'ютеризованих технологій Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання в науках про навколишнє середовище;
- математичне моделювання наслідків радіоактивного забруднення навколишнього середовища;
- інформаційні системи та бази даних.

Подано 12.09.2002