

УДК 551.521

М.М. Колодницький, к.т.н., доц.
Житомирський інженерно-технологічний інститут

О.О. Орлов, к.біол.н., с.н.с.
Поліська Лісова науково-дослідницька станція

В.М. Янчук, аспір.

О.Л. Прищеп, аспір.
Житомирський інженерно-технологічний інститут

О.Б. Каліш, аспір.
Інститут ядерних досліджень НАН України

БАГАТОЕТАПНИЙ ПРОЦЕС ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МІГРАЦІЇ РАДІОНУКЛІДІВ В ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ УКРАЇНСЬКОГО ПОЛІССЯ ПІСЛЯ АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС

Розкривається суть багатоетапного процесу побудови математичної моделі для аналізу міграції радіонуклідів в лісових екосистемах у вологому суборі (В₃). Наводиться концептуальна схема міграції радіонуклідів у лісових екосистемах даного типу. Запропоновано підходи щодо побудови структури бази даних, на основі якої буде побудована інформаційна система та буде проводитись математичне моделювання міграції радіонуклідів в лісових екосистемах.

Внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС значна частина території України опинилася в зоні радіоактивного забруднення. У ситуації, що склалася, виникла нагальна потреба оцінки стану забрудненості території, визначення основних шляхів міграції радіонуклідів в екосистемах. Міграція радіонуклідів, в свою чергу, впливає на вміст радіонуклідів у продуктах харчування, на здоров'я людей, що проживають на даній території.

Нині моделювання міграції радіонуклідів в природних екосистемах має в своєму арсеналі цілий ряд розробок [1–3, 6–10, 12, 13, 16, 17], які створюють математичне підґрунтя для моделювання процесів міграції радіонуклідів за ланцюгами живлення [12, 16], розрахунку коефіцієнтів переходу радіонуклідів з ґрунту в рослини [1, 10, 18, 19, 20], комплексного опису міграції в лісових екосистемах [2, 8, 16], визначення вмісту радіонуклідів у грибах та рослинах [13, 14, 15], дослідження сезонного накопичення радіонуклідів у м'ясі тварин [7, 12] тощо. Всі ці моделі використовують різні види аналізу і описуються різними видами математичних структур [4], оскільки аналізують різні об'єкти, тобто (складові екосистем – compartments), і навіть якщо описують не окрему складову, а групу складових або всю екосистему, розробники моделей не виходять за межі одного виду аналізу або однієї математичної структури, за допомогою якої описано математичну модель.

Такий підхід, безумовно, дає результат і, крім того, ряд математичних моделей вже пройшли апробацію і певний час використовуються дослідними установами. Оскільки на даний момент математичними моделями описано цілий ряд процесів, що відбуваються в лісових екосистемах, такі, наприклад, як потік біомаси, гідрологічні цикли, біогеохімічні цикли, є можливість застосування готових моделей для проведення комплексного аналізу, який можна назвати багатоетапним процесом побудови математичної моделі.

Суть даного процесу полягає в тому, що останній є багатоетапним з точки зору 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, що виділені на даному етапі, подавати як вхідні дані для моделей наступного етапу. Такий підхід дозволить охопити цілий ряд складових екосистем, врахувати особливості процесів, що відбуваються в них, описати зв'язки між компартментами.

При використанні такого підходу можна перевіряти достовірність результатів поетапно і моделювати дані, яких не вистачає для наступних етапів (у випадку їх відсутності ці дані можна з певною мірою наближення отримати за допомогою математичної моделі на попередньому етапі).

Побудова моделей починається з етапу формалізації досліджуваного процесу, при цьому відбираються дані, необхідні для дослідження. Основними даними, що використовуються в дослідженнях міграції радіонуклідів, є дані, що отримуються на біогеоценотичних стаціонарах. Дослідження виконуються систематично, і інформація, яка збирається, постійно накопичується.

Ці дані зберігаються в таблицях, які мають певну структуру. В силу розрізненості інформації виникає необхідність зведення її у базу даних зі встановленням зв'язків між таблицями.

База даних повинна включати в себе таблиці, що описують об'єкти моделювання, тобто складові екосистеми (compartments). Крім того, вона повинна містити таблиці, що характеризують види зв'язків між складовими, описаними в таблицях, тобто фізико-хімічні процеси, середовища (наприклад, повітря, воду, особливості ґрунтових структур тощо) [5, 6, 8, 11, 12, 13]. Така база даних повинна надавати можливість модифікації даних, введення нових таблиць з новими параметрами, модифікації зв'язків між таблицями.

Описана структура бази даних дає можливість подальшої реалізації побудови інформаційної системи [11], яка буде використовуватись при побудові математичних моделей радіоекологічних процесів, що відбуваються у лісових екосистемах. Таким чином, база даних описує як кожний компартмент окремо, так і зв'язки між ними. За допомогою вибірок здійснюється відбір даних для моделі, оскільки умови вибірки формуються на етапі формалізації. Дані вибірки є вхідними параметрами моделей, при чому в системі планується організація послідовного, а точніше, поетапного застосування даних в моделях. Результати однієї вибірки після обробки будуть повертатись у базу даних, де стануть вхідними даними для іншої моделі.

Такий підхід до комплексного опису дає можливість описати кожен складову з урахуванням основних її характеристик, а різносторонній підхід до аналізу комплексу описів дає можливість розпаралелити процес аналізу. Таким чином, в одній задачі можуть застосовуватись моделі регресійних та диференціальних рівнянь, статистичні моделі тощо.

Нижче, як приклад, наводиться опис такого типу екосистем та концептуальна схема зв'язків в екосистемі (рис. 1).

Система, що моделюється, є біогеоценозом соснового лісу чорнично-зеленомошного, який сформувався на дерново-середньопідзолистих суцільних ґрунтах. Древостан складу 10С од. Б зімкнутістю 0,9–1,0 у віці 60 років має висоту 22–24 м і діаметр 20–24 см.

Підлісок негустий зімкнутістю 0,1–0,2 утворений переважно крушиною ламкою з домішкою горобини звичайної. Підріст деревних порід негустий, складається з 3–5-річної сосни звичайної та берези пухнастої. Трав'яно-чагарничковий ярус густий, рівномірний, з проективним покриттям 55–70 %. Основу його складають бореальні чагарнички порядку вересоцвітих: чорниця (40–60 %), брусниця (5–10 %), буяхи (1–3 %), верес звичайний (1–3 %). Моховий ярус суцільний, з проективним покриттям 85–95 %. У ньому співдомінують зелені мохи: плеуроцій Шребера (60–75 %) і дикранум багатоніжковий (15–20 %), рідше зустрічаються гілокомій блискучий, зозулин льон звичайний та леукобрій сизий.

Лісова підстилка потужна, завтовшки 5–7 см, складається переважно з шпильок сосни та залишків мохів. Основу її товщі утворює напіврозкладений прошарок. Гумус грубий, модер-типу.

Гумусово-елювіальний горизонт темно-сірий, потужністю 8–10 см, що поступово переходить у білястий, піщаний, елювіальний горизонт. Останній нижче замінюється щільно-піщаним, коричневим, ілювіальним горизонтом.

З метою формалізації та подальшого моделювання описана вище екосистема була розділена на 6 макроблоків. З них чотири відповідають основним ярусам рослинності: деревному, підросту та підліску, трав'яно-чагарничковому, моховому; а два, що залишилися, – лісовій підстилці та ґрунту. В першу чергу слід відмітити, що зв'язок деревинного ярусу (сосни звичайної) із ґрунтом здійснюється за допомогою ектомікоризи, представленої переважно вищими базидіальними (шапінковими) грибами. Аналогічні зв'язки характерні також для підросту та підліску. Трав'яно-чагарничковий ярус даного біогеоценозу характеризується значною специфікою, тому що всі представники вересоцвітих є облигатними мікосимбіотрофними видами. Проте, для них характерним є симбіоз із специфічною ендотрофною мікоризою вересових, утвореною мікроміцетами.

Макроблок древостану розділений на 7 компартментів, що відповідають основним тканинам та органам дерева, причому як надземної, так і підземної його частинам: шпильки (листя), пагони поточного року, гілки, деревина, кора внутрішня, кора зовнішня, коріння. На корі зовнішній формується ярус епіфітних лишайників.

Макроблок підросту та підліску складається з 5 компартментів: хвої (листя), тонких гілок, деревини, кори, коренів. Функціональними компартментами трав'яно-чагарничкового ярусу є надземна та підземна фітомаса, а мохового ярусу – жива та відмерла частини. Макроблок лісової підстилki об'єднує 3 компартменти (фракції) останньої, що відрізняються за ступенем

розкладу: свіжий опад, напіврозкладена підстилка, розкладена підстилка. В мінералізації всіх трьох частин підстилки провідна роль належить сапротрофній мікобiоті, причому як макро-, так і мікроміцетам. Слід відмітити значну роль лісової підстилки як геохімічного бар'єру на шляху вертикальної міграції ^{137}Cs в мінеральні шари ґрунту.

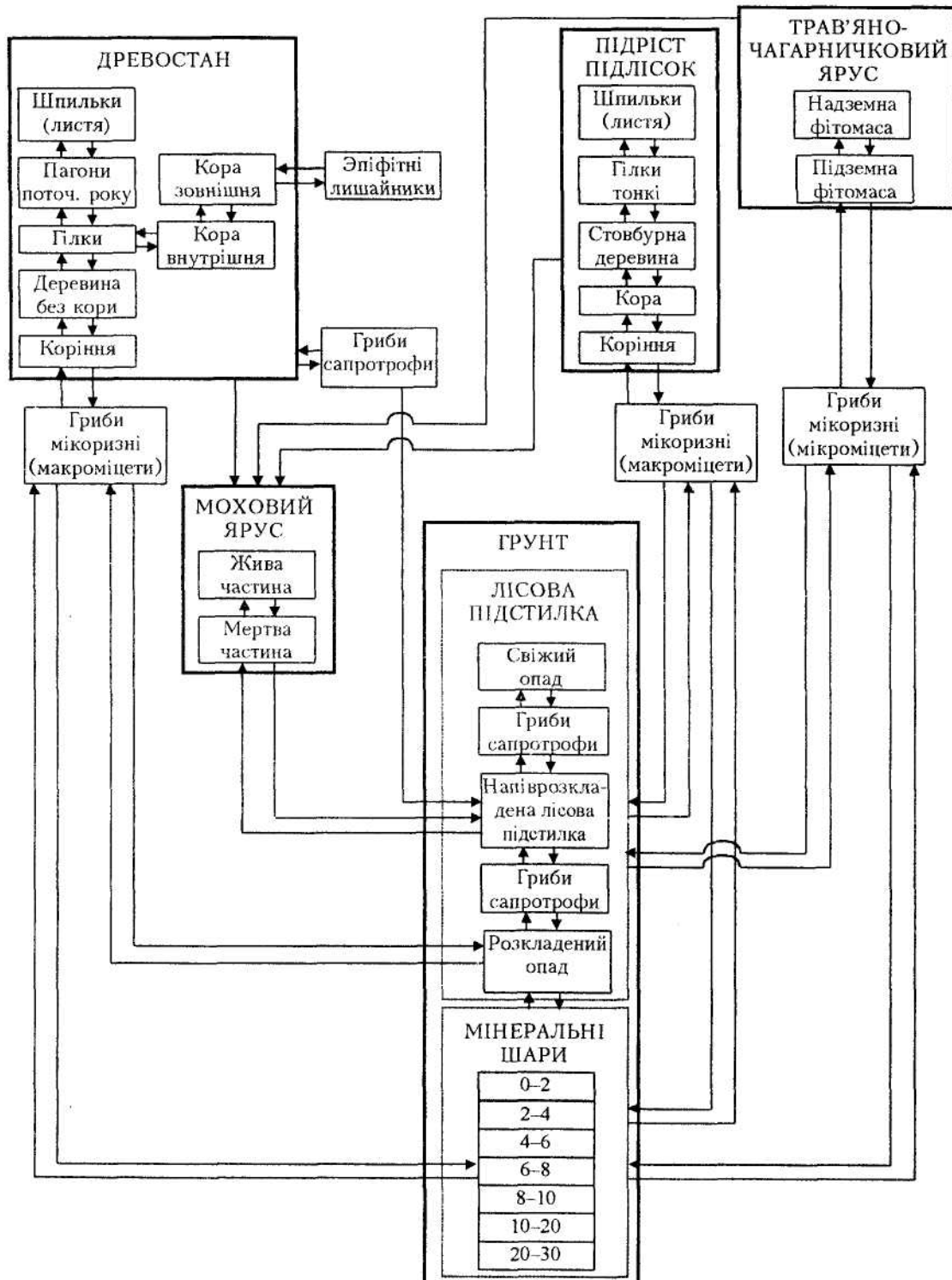


Рис. 1. Концептуальна схема в екосистемі В₃ соснового лісу чорнично-зеленомошного типу

Також слід відмітити, що мінеральне живлення рослин різних ярусів відбувається з різних горизонтів ґрунту, причому деревостан, підріст та підлісок зв'язані переважно з макроблоком мінеральних горизонтів ґрунту та суттєво меншою мірою з лісовою підстилкою, що розкладалася, а трав'яно-чагарничковий ярус навпаки – переважно з макроблоком лісової підстилки. Мінеральне живлення мохів відбувається, головним чином, за рахунок атмосферних опадів,

тому поглинання мінеральних речовин і радіонуклідів ризоїдами з ґрунту не має великого значення. Особливістю мохового ярусу є те, що мохи своїми ризоїдами та нижніми (відмерлими) частинами стебел входять безпосередньо до компартменту напіврозкладеної лісової підстилки. На поверхню ж мохового покриву надходить основна частина органічного опаду та відпаду, що формується у всіх ярусах рослинності. Останні щорічно заховуються в моховому покриві внаслідок його швидкого наростання у висоту.

В макроблоці ґрунту моделюється процес вертикальної міграції радіонуклідів та їх перерозподіл між компартментами. Крім того, також моделюється зміна біологічної доступності радіонукліду для кореневого живлення рослин. При моделюванні даного процесу необхідні наступні параметри: питома активність радіонукліду в i -му шарі ґрунту, маса i -го шару ґрунту, заданої товщини, коефіцієнти вертикальної та горизонтальної міграції радіонуклідів. Тут коефіцієнти вертикальної та горизонтальної міграції радіонуклідів є результатами застосування статистичних моделей, які були використані на попередньому етапі. Таким чином, ми бачимо зв'язок між окремими етапами моделювання в багатетапному процесі, де при описі математичних моделей на кожному з етапів можуть використовуватися різні типи математичних структур, за допомогою яких вони описуються.

На нашу думку, застосування даного підходу може дати можливість більшою мірою використати наявні радіоекологічні дані для аналізу міграції радіонуклідів в лісових екосистемах.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Апльби Л.Дж., Довелл Л., Мишра Ю.К.* и др. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля: Пер с англ. / Под ред Ф.Уорнера и Р.Харрисона. – М.: Мир, 1999. – 512 с.
2. *Дворник А.М., Жученко Т.А.* Поведение ^{137}Cs в сосновых насаждениях Белорусского Полесья: моделирование и прогноз // АНРИ, Журнал по радиационной экологии. – 1995. № 3/4. – С. 56–66.
3. *Ивченко Б.П., Мартыщенко Л.А.* Информационная экология. Часть 1. Оценка риска техногенных аварий и катастроф. Статистическая интерпретация экологического мониторинга. Моделирование и прогнозирование экологических ситуаций. – СПб.: “Нормед-Издат”, 1998. – 208 с.
4. *Колодницький М.М.* Типологія математичних моделей технічних систем. Частина 2 // Вісник ЖІТІ. – 1998. – № 7/Технічні науки. – С. 208–218.
5. *Колодницький М.М., Янчук В.М.* «Полинь» – інформаційно-довідникова система оцінки радіоактивної забрудненості населених пунктів Житомирської області після Чорнобильської катастрофи // Вісник ЖІТІ. – 1998. – № 9/Технічні науки. – С. 271–278.
6. *Колодницький М.М., Янчук В.М.* Системний аналіз задач математичного моделювання в науках про навколишнє середовище (у друці).
7. *Краснов В.П., Шелест З.М., Орлов О.О., Калетник М.М., Ірклієнко С.П., Турко В.М.* Радіоекологія козулі європейської в Центральному Поліссі України. – Житомир: Вид-во “Волинь”, 1998. – 128 с.
8. *Мамихин С.В., Меркулова Л.Н.* Компьютеризация исследований динамики радионуклидов в лесных экосистемах, загрязненных в результате Чернобыльской аварии (1986–1995 гг.) // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1996. – Т. 36, вып. 4. – С. 516–523.
9. *Свирижев Ю.М.* О математических моделях биологических сообществ и связанных с ними задачах управления и оптимизации // Математическое моделирование в биологии. – М., 1975. – С. 30–53.
10. *Чернышенко С.В.* О математическом моделировании динамической структуры биогеоценозов // Экология та ноосферология. – 1997. – Т. 3. – № 1–2. – С. 65–86.
11. *Янчук В.М.* Проблема комп'ютерної оцінки впливу катастрофи на ЧАЕС на захворюваність людини // Вісник ЖІТІ. – 1998. – № 8/Технічні науки. – С. 271–276.
12. *Avila R.* Radiocesium transfer to roe deer and moose. Modelling and experimental studies. Doctor's dissertation. – Uppsala. – 1998. – 121 p.

13. Chernobyl Digest 95–98 / Interdisciplinary Bulletin of the Chernobyl Problem information. Issue 5. – Minsk, 1999. – 257 p.
14. *Krasnov V.P., Shelest Z.M., Kurbet T.V.* ^{137}Cs contamination of mushrooms in the Ukrainian Polesse // Abstr. Of III Congress on Radiation Research “Radiobiology, Radioecology, Radiation Safety” (Moscow, 14–17 October 1997). – Pushchino, 1997. – Vol. 2. – P. 353–354.
15. *Kurbet T.V.* The regularities of ^{137}Cs accumulation by edible mushrooms in forests of the Central Polesse of the Ukraine // Abstr. I Internat. Conf. “Ecology and youth”. – Gomel, 1998. – Vol. 1, Part. 2. – P. 106.
16. *Linkov I., Schell W.R. (eds.)* Contaminated forests. Recent Developments in Risk Identification and Future Perspectives. Kluwer Academic Publishers, 1999. – PP. 151–160
17. *Malkina-Pykh. I.G.* Modeling of the dynamics in Sr-90 content in ecosystems of various geographical zones // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologia. – 1996. – V. 36, № 1. – P. 112–132.
18. *Orlov A.A.* Regularities of technogenous radionuclide accumulation and migration in forest biogeocenosis of boreal coniferous type: research progress 1996–1999 // Chernobyl Digest 95–98 / Interdisciplinary Bulletin of the Chernobyl Problem information. Issue 5. – Minsk, 1999. – PP. 18–31.
19. *Orlov A.A., Krasnov V.P.* Biological peculiarities of the cranberry (*Oxycoccus palustris* Pers.) and ecological parameters of its environment: influence on accumulation of ^{137}Cs by phytomass // J. of Radioecology. – 1998. – Vol. VI, N 1. – P. 23–29.
20. *Orlov A.A., Krasnov V.P., Shelest Z.M., Kurbet T.V.* ^{137}Cs accumulations by medicinal plants in different cenoses in Ukrainian Polesse // Abstr. III Congress on Radiation Research “Radiobiology, Radioecology, Radiation Safety” (Moscow, 14–17 October 1997). – Pushchino, 1997. – Vol. 2. – P. 364–365.

КОЛОДНИЦЬКИЙ Микола Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення обчислювальної техніки Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- інформаційні комп'ютерні технології;
- теорія математичного моделювання.

ОРЛОВ Олександр Олександрович – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, завідувач лабораторією радіаційної екології лісу Поліської лісової науково-дослідної станції.

Наукові інтереси:

- радіоекологія;
- дослідження лісових екосистем Полісся.

ЯНЧУК Валентин Миколайович – аспірант Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- інформаційні системи, бази даних;
- моделювання в радіоекології;
- інформаційні комп'ютерні технології.

ПРИЩЕПА Олександр Леонідович – аспірант Житомирського інженерно-технологічного інституту, провідний інженер-радіолог Поліської лісової науково-дослідної станції.

Наукові інтереси:

- радіологія;
- інформаційні комп'ютерні технології.

КАЛІШ Олексій Борисович – аспірант Інституту ядерних досліджень, провідний інженер-радіолог Поліської лісової науково-дослідної станції.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання екологічних процесів;
- інформаційні комп'ютерні технології.