

В.М. Янчук, доц.

Житомирський інженерно-технологічний інститут

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ МІГРАЦІЇ РАДІОНУКЛІДІВ В ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ

*Складність формування математичних моделей ускладнює їх використання фахівцями-екологами з погляду побудови самої моделі і подальшого пошуку її чисельних параметрів. Основні складнощі криються в неформалізованості процесу побудови математичної моделі. Тому і виникає безліч проблем на етапі вибору компартментів екосистеми для подальшого дослідження. У зв'язку з цим необхідно розробити процедуру формування математичних моделей процесу міграції радіонуклідів у лісових екосистемах і створити засіб для автоматизації процесу побудови математичної моделі та підбору її чисельних параметрів. У даній роботі викладені основні підходи, що використовуються для автоматизації побудови математичної моделі і пошуку коефіцієнтів моделі на базі балансових співвідношень питомих активностей радіонуклідів у компартментах та на даних радіоекологічних досліджень.*

Дослідження екологічних процесів нерозривно пов'язано з аналізом великих обсягів даних моніторингу, що вимагають систематизації та первинної обробки. Джерелами даних моніторингу є результати аналізу пробовідборів, які надходять з різних організацій і не є систематизованим в силу розрізненості досліджень, які проводяться моніторинговими організаціями. Первинна обробка даних викликана необхідністю узгодження одиниць вимірювання відповідних даних для їх подальшої аналізу та обробки, використання фактографічного матеріалу для порівняння з результатами математичного моделювання досліджуваних радіоекологічних процесів.

Процес побудови математичних моделей радіоекологічних процесів необхідно проводити за певним сценарієм, що з використанням інформаційної системи дозволяє автоматизувати цей процес і в подальшому дозволяє автоматизувати інтерпретацію отриманих результатів моделювання.

В даній статті будуть описані особливості методики автоматизації побудови математичної моделі та її реалізації в інформаційно-довідниковій системі "Полинь". Запропонована методика автоматизації, реалізована в інформаційно-довідниковій системі "Полинь", здійснює перехід від предметних понять та термінів до формалізованих описів складових екосистеми та запроваджує процедуру формування математичної моделі міграції радіонуклідів в лісових екосистемах. Автоматизація побудови математичних моделей передбачає підбір параметрів математичної моделі міграції радіонуклідів в лісових екосистемах. Завдяки запропонованій методиці стала можливою побудова математичних моделей міграції радіонуклідів в лісових екосистемах загального типу з подальшою деталізацією на конкретні види екосистем.

### **Загальна схема формування математичної моделі міграції радіонуклідів в лісових екосистемах**

При застосуванні математичного моделювання для дослідження міграції радіонуклідів в лісових екосистемах найважливішим етапом дослідження є формування математичної моделі зазначеного процесу. Початковий етап формування моделі вимагає формалізації та встановлення закономірностей зміни характеристик компартментів екосистеми. В ході формування математичної моделі компартментної екосистеми, крім математичних моделей складових, необхідно також описувати відношення між складовими системи, що часто викликає ряд проблем, пов'язаних з визначенням описів фізичних процесів. Зазвичай екологічні процеси описують фахівці з предметної області, які власноруч формують математичну модель і використовують певну програмну систему лише на етапі чисельного аналізу математичної моделі, як інструмент для автоматизації обчислень. Такий шлях є трудомістким і неефективним з точки зору використання засобів автоматизації лише на остаточному, завершальному етапі досліджень. Тому доцільно проаналізувати можливість автоматизації також і початкових етапів побудови математичних моделей для тих видів екосистем, для яких розроблені формалізовані описи і визначені відношення між компартментами екосистеми. Для цього, необхідно розробити

методику формування математичної моделі на основі формалізованих описів, що дозволить автоматизувати процес побудови та подальшого дослідження математичної моделі.

Визначення переліку компартментів, що аналізуються в лісовій екосистемі

У формалізованому описі лісову екосистему можна представити у вигляді множини підмножин характеристик:

$$F_{ji} = (G_i, T_j, S_{pf}, I),$$

де  $G$  – підмножина гігروتопів  $G = \{G_i | i = 1, 5\}$ ;  $T$  – підмножина трофотопів  $T = \{T_j | j = 1, 5\}$ ;  $S_{pf}$  – множина видової різноманітності лісової екосистеми;  $I$  – множина інтегральних характеристик, до яких можна віднести біологічну продуктивність системи. Такий опис дозволяє заданням виду едафотопу задати набори характеристик природних екосистем. Звичайно, на даному рівні деталізації не показано зв'язків між складовими екосистеми, оскільки вона представлена описом, що враховує її загальні характеристики (особливості ґрунту, гідрологічний режим, видову різноманітність  $S_p$ ). Видова різноманітність представляється у вигляді набору множин видів, що аналізуються в екосистемі. Так, для фітоценозу видова різноманітність буде представлена у вигляді:

$$S_{pf} = \{Tr, Ug, Uw, Grb, Fal, Mos, Mush, Lch\},$$

де  $Tr$  – множина видів дерев,  $Ug$  – множина видів підліску,  $Uw$  – множина видів підросту,  $Grb$  – множина видів трав'яно-чагарничкового ярусу,  $Fal$  – опад/відпад: множина відмерлих частинок органічної речовини з різних ярусів,  $Mos$  – множина видів мохового ярусу,  $Mush$  – множина видів грибів,  $Lch$  – множина видів лишайників.

Зв'язки між компартментами екосистеми розкриваються при більш детальному аналізі процесів, що відбуваються в екосистемі. Для побудови моделі міграції радіонуклідів, розглянемо життєвий цикл екосистеми з погляду антропогенного впливу на екосистему, вираженому міграцією радіонуклідів, які включились в обмінні процеси, що відбуваються в екосистемі.

Після атмосферних випадіннь радіонуклідів на надземну фітомасу – рослинний блок, представлений в екосистемі деревостаном  $Tr$ , підріст-підліском  $Ug$  та трав'янисто-чагарничковим ярусом  $Grb$ , радіонукліди перерозподілялись між даними складовими як шляхом поверхневого поглинання, так і внутрішнього перерозподілу та через кореневе всмоктування ґрунту.

Опис деревного ярусу, буде мати наступний вигляд:

$$Tr = \{Wd, Brk, Spr, Ned, Lf, Brch, Rt\},$$

де  $Wd$  – стовбур,  $Brk$  – кора,  $Spr$  – пагони,  $Ned$  – шпильки,  $Lf$  – листя,  $Brch$  – гілки,  $Rt$  – коріння.

Такий поділ на складові компартментів необхідний з точки зору дослідження внутрішніх процесів перерозподілу радіонуклідів в тілі рослини. На сьогоднішній день більшість публікацій, що описують перерозподіл радіонуклідів в органах компартментів носять характер постановки задачі досліджень, виділення наукового напрямку [1], і лише невелика їх кількість описує міграційні процеси в деревині [2] у вигляді поверхневого забруднення, тобто кронового стоку та внутрішнього – стовбурного.

Таким чином, можна сказати, що дані складові рослинного організму дерева беруть участь у потоках, що проходять крізь нього: стовбурний стік висхідний та низхідний, кроновий стік. В моделі міграції радіонуклідів в лісовій екосистемі врахований лише кроновий стік, оскільки решта процесів в літературі описані недостатньо повно, щоб можна було встановити його вплив на перерозподіл радіонуклідів в рослинному організмі.

Аналогічні процеси досліджуються в екосистемі і для підросту-підліску. Для простоти побудови і подальшого чисельного аналізу моделі підріст-підлісок включений до блоку деревостану на підставі однакового видового складу одиниць, що входять до обох ярусів. Обмінні процеси в підрості відбуваються швидше, ніж в рослинних організмах старшого віку, але щодо всмоктування з відповідних глибин ґрунту дані організми відіграють однакову роль. Глибина ґрунту, доцільна для дослідження, не перевищує 20 см [21] і дана глибина досягається і рослинами ярусу підріст-підліску і деревостану.

Трав'янисто-чагарничковий ярус  $Grb$  представлений надземною та підземною фітомасою і розглядається як суцільний блок, де не враховуються внутрішні обмінні процеси між надземною та підземною фітомасою.

Блок підстилки входить в модель у повному обсязі, але з урахуванням лише процесів вертикального переміщення радіонуклідів через вмивання водою (утворення водорозчинних форм радіонуклідів) та осідання у напіврозкладеній підстилці з часом.

Вважається, що горизонтальні процеси переміщення радіонуклідів вгору по товщі підстилки здійснюються за рахунок діяльності міцелію грибів, який формує плодове тіло, що після розкладання знову потрапляє на підстилку і в подальшому повністю розкладається. Активність радіонуклідів, що накопичились в плодородному тілі гриба, осідає в свіжій підстилці, звідки рухається вниз по профілю ґрунту.

Блок лишайників *Lch* описано для сумісності і подальшого розвитку математичної моделі в напрямку розширення досліджуваних процесів в біогеоценозі. На сьогоднішній день в літературі важко відшукати інформацію про участь лишайників в перерозподілі радіонуклідів в біогеоценозі. Також з 1986 року не проводились дослідження лишайників на радіоекологічних стаціонарах і лише в останні роки почали здійснювати пробовідбори даних компонентів екосистеми. З іншого боку, дані компартменти впливають здебільшого на міграцію радіоцезію в організмі дерева. Винос радіонуклідів з дерева здійснюється з відпадом кори, і враховується в математичній моделі введенням до розгляду процесу відпаду.

Блок ґрунту розглядається у розрізі мінеральних шарів завтовшки 20 мм. Тип ґрунту задається видом едафотопу, оскільки едафічна сітка досить чітко описує лісові екосистеми і дозволяє зосередитись як на екосистемах певного виду, так і на перехідних зонах.

Методика формування математичної моделі міграції радіонуклідів в лісових екосистемах

Перейдемо до побудови математичної моделі екосистеми, відкинувши ряд процесів, що не будуть розглядатись в моделі міграції радіонуклідів в лісовій екосистемі. Таким чином, схему, яка враховує основні процеси фітоценозу з точки зору дослідження процесів міграції <sup>137</sup>Cs можна представити у вигляді, наведеному на рис. 1. Представлений граф отримано адаптуванням концептуальної схеми взаємодії складових лісової екосистеми, за допомогою вилучення складових, які в даній математичній моделі не враховуються.

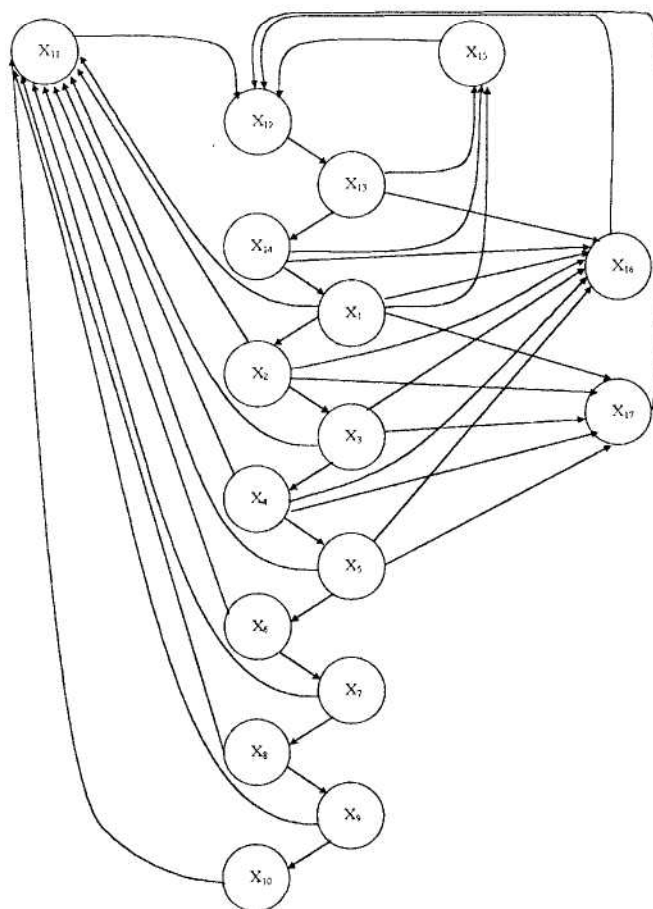


Рис. 1. Граф потоків радіонуклідів в лісовій екосистемі

На рис. 1 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 розглядуваних;  $x_{11}$  – блок деревини, представлений сукупністю органів рослин та сумарною активністю 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'єднати в один блок, оскільки сумування значень питомих активностей грибів лише спотворить картину міграції радіонуклідів в лісовій екосистемі.

На основі схеми-графу фітоценозу можна побудувати матрицю зв'язків компартментів лісової екосистеми, поставивши на перетині рядків та стовпців кількість зв'язків, якими зв'язані дані вершини (див. рис. 2).

На основі даної матриці встановлюються залежності між компартментами лісової екосистеми, які дозволяють визначити напрямки потоків радіонуклідів в екосистемі.

Оскільки функції, що описують процеси міграції радіонуклідів між компартментами екосистеми невідомі і в деяких випадках залежать від часу, а дослідження таких залежностей є складним процесом, мало вивченим на сьогоднішній день [21], в запропонованій моделі використовуватимуться постійні коефіцієнти міграції радіонуклідів.

	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>16</sub>	X <sub>17</sub>
X <sub>1</sub>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
X <sub>2</sub>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
X <sub>3</sub>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
X <sub>4</sub>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
X <sub>5</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
X <sub>6</sub>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
X <sub>7</sub>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
X <sub>8</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
X <sub>9</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
X <sub>10</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
X <sub>11</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
X <sub>12</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
X <sub>13</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
X <sub>14</sub>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
X <sub>15</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
X <sub>16</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
X <sub>17</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Рис. 2. Матриця зв'язків між компартментами екосистеми

Пошук коефіцієнтів моделі здійснюється шляхом аналізу балансу питомих активностей компартментів лісової екосистеми. Виходячи з міркування, що в досліджуваній екосистемі не здійснюється винесення радіонуклідів, баланс питомої активності на одиницю маси за певний рік буде дорівнювати балансу питомої активності на одиницю маси за наступний рік, з урахуванням річного значення радіоактивного розпаду радіонукліду. Таким чином, на основі графу потоків радіонуклідів в лісовій екосистемі (рис. 1) та на основі матриці зв'язків між компартментами екосистеми (рис. 2) можна побудувати систему рівнянь балансів питомих активностей для всіх компартментів екосистеми.

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 компартменту,  $l_{k-i}$  – 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/м<sup>2</sup>),  $t_1$  та  $t_2$  – моменти відбору проб (роки),  $\lambda$  – коефіцієнт напіврозпаду радіоцезію,  $q_k$  – коефіцієнт зв'язування радіоцезію з компартментом,  $a_{i-j}$  –

невідомі коефіцієнти моделі (вагові коефіцієнти міграції радіонуклідів між компартментами екосистеми).

Описаних вище залежностей недостатньо для відшукування коефіцієнтів перед змінними, що описують активності компартментів. Таких коефіцієнтів значно більше, ніж компартментів і тому решта невідомих коефіцієнтів встановлюються 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 протікання фізико-хімічних та біологічних процесів міграції радіонуклідів в 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.

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

В результаті вирішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь отримуємо значення коефіцієнтів, які будуть відігравати роль вагових коефіцієнтів на концептуальній схемі міграції радіонуклідів в лісових екосистемах.

Формування математичної моделі міграції радіонуклідів в лісових екосистемах здійснюється за принципом формування компартментних моделей природних екосистем, описаним в [3] і проводиться на основі концептуальної схеми міграції радіонуклідів в лісовій екосистемі, в якій кожний компартмент, що входить в екосистему описується одним рівнянням в 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  $l_{k-j}$  – коефіцієнти, взяті з матриці зв'язків між складовими екосистеми;  $x_i$  – активність відповідного компартмента екосистеми (Бк/м<sup>2</sup>),  $\lambda$  – коефіцієнт напіврозпаду радіоцезію,  $q$  – коефіцієнт зв'язування радіоцезію з компартментом,  $a_{i-j}$  – коефіцієнти, отримані в результаті розв'язку системи рівнянь (вагові коефіцієнти міграції радіонуклідів між компартментами екосистеми).

Дану 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 зменшиться розмірність матриці зв'язків, оскільки вилучаться 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 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 питомих активностей компартментів екосистеми. Використання деякої 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. Крім того, в силу мозаїчності забрудненості територій поверхневе забруднення екосистеми є неоднорідним, що вимагає від дослідника постійного задання поверхневого забруднення на момент випадіння та задання інтервалу часу, що пройшов з моменту випадіння радіоцезію на екосистему, тому для аналізу найближчих ділянок екосистеми необхідно знову формувати математичну модель та проводити її чисельний аналіз.

Згідно з запропонованою методикою, доцільно застосувати інформаційно-довідникову систему, що дасть можливість автоматизації процедури формування математичної моделі та її подальшого аналізу з можливістю інтерпретації отриманих результатів.

Обговорення результатів автоматизації

Автоматизована побудова математичної моделі міграції радіонуклідів в лісовій екосистемі стала можливою за рахунок побудови формалізованих описів компартментів лісової екосистеми, які посприяли виділенню переліку характеристик з точки зору дослідження міграції радіонуклідів в лісовій екосистемі. Побудована концептуальна схема зв'язків компартментів лісової екосистеми дала можливість встановити зв'язки між складовими екосистеми, а детальне представлення даної концептуальної схеми дозволило проаналізувати важливість кожної складової в екосистемі і посприяло організації шаблонних представлень екосистем, побудованих на основі формалізованих описів обмінних процесів в екосистемі. Шаблонні представлення фітоценозу повторюють концептуальну схему і дозволяють її легко трансформувати вилученням описів складових екосистеми. Звичайно, вилучення одного з блоків екосистеми вимагає знищення зв'язків даного елемента з іншими складовими екосистеми, але таку процедуру можна автоматизувати за рахунок використання інформаційної системи. Основою шаблонних представлень екосистеми є матриці зв'язків, приклад якої представлено на рис. 2. Зазвичай такі матриці зв'язків будують фахівці з предметної області, адже саме фахівці вирішують питання про встановлення зв'язків між компартментами екосистеми. Для зручності, в згаданій вище інформаційній системі розроблено ряд шаблонів матриць зв'язків для лісових фітоценозів, що базуються на концептуальній схемі лісового фітоценозу. Для збереження відкритості системи передбачена можливість введення або вилучення зв'язків між складовими екосистеми. При побудові матриці і видаленні користувачем компартменту автоматично видаляються з матриці зв'язки даного компартменту з іншим. У випадку, коли користувач власноруч встановлював зв'язки між складовими екосистеми і допустив помилку, що в результаті призвело до відсутності зв'язків між складовими екосистеми, що не дає можливість сформувати відношення між ваговими коефіцієнтами перерозподілу радіонуклідів в екосистемі.

До шаблонних матриць зв'язків між складовими екосистеми включено види-індикатори екосистем, оскільки в природних екосистемах види-індикатори обов'язково присутні, в той час як решта видів можуть бути відсутні. В таких випадках перевіряється наявність даних вимірювань або наявність довідникових даних для виду рослинного організму, що вводиться додатково в систему. При введенні нового виду в фітоценоз система вимагає від користувача задання довідникових даних про даний вид рослинного організму і передбачає попередню наявність даних про складові екосистеми в базі даних інформаційної системи. Так, в базі даних присутня інформація про види-індикатори лісової екосистеми, на основі якої робиться висновок про значимість даного виду в екосистемі.

Матриця зв'язків дозволяє побудувати ту частину СЛАР, яка описує зв'язки компартментів екосистеми. Для решти зв'язків в інформаційній системі передбачено встановлення додаткових зв'язків, для коефіцієнтів поглинання радіоцезію з мінеральних шарів та підстилки чорницями, грибами, сосною. Розмірність матриці зв'язків визначається з кількості компартментів, що включені в модель досліджуваного лісового фітоценозу.

Через мозаїчність забруднення території радіонуклідами навіть на невеликій ділянці значення активностей компартментів суттєво відрізняються. Перед використанням таких даних моніторингу, необхідно провести їх попередню обробку, оскільки розбіжність даних може сягати 50%. Такі дані важко використовувати для визначення коефіцієнтів міграції  $^{137}\text{Cs}$ .

Після проведеної попередньої обробки дані використовуються для розв'язку системи рівнянь, що описує баланс активностей радіонуклідів між сусідніми роками. В результаті чисельного розв'язку системи рівнянь, отримуються вагові коефіцієнти міграції  $^{137}\text{Cs}$  між компартментами, які підставляються в систему диференційних рівнянь, сформовану вище.

Система лінійних диференційних рівнянь вирішується також за допомогою програмної системи чисельного аналізу DSR Open Lab 1.0, після чого, в інформаційній системі проводиться інтерпретація отриманих результатів та їх порівняння з даними моніторингу.

Необхідність використання прикладного програмного забезпечення у складі інформаційної системи та програмної системи чисельного аналізу викликана потребою реалізації багатоступного підходу побудови математичної моделі і використання чисельного аналізу не тільки на етапі побудови прогнозу або остаточного аналізу, а й у процесі побудови моделі для попередньої обробки даних моніторингу та отримання коефіцієнтів математичної моделі. 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 етапу дослідження задачі.

#### **Висновки**

Розроблена схема автоматизованої побудови математичної моделі міграції  $^{137}\text{Cs}$  в лісових екосистемах дозволяє будувати математичні моделі процесу міграції радіонуклідів в лісових екосистемах та досліджувати екосистеми з різною кількістю компартментів. Побудована математична модель міграції радіонуклідів дозволяє провести прогноз перерозподілу радіонуклідів між компартментами лісової екосистеми, використовуючи лише дані про поверхневе забруднення екосистеми. Автоматизація побудови математичної моделі дозволяє проводити дослідження вертикальної міграції радіонуклідів в штучних екосистемах, сприяє простеженню характеру перерозподілу радіонуклідів в екосистемі при вилученні компартментів з екосистеми. Інтеграція інформаційної системи з пакетом чисельного аналізу дозволяє спростити процес побудови математичної моделі і проводити автоматизований підбір параметрів математичної моделі, порівнювати результати моделювання з даними моніторингу.

#### **ЛІТЕРАТУРА:**

1. *Anna Hillbricht-Ilkowska*. Managing ecotones for nutrients and water // Ecology International. – № 22. – 1995. – Pp. 73–93.
2. *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.
3. *Георгиевский В.Б.* Экологические и дозовые модели при радиационных авариях. – К.: Наук. думка, 1994. – 236 с.

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 3.09.2002