

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 519.226

І.О. Загірська, Д.К. Левін, П.І. Бідюк

### СЦЕНАРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕДАЧІ РАДІОНУКЛІДІВ З ҐРУНТУ В РОСЛИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИНАМІЧНОЇ МЕРЕЖІ БАЙЄСА

The study is aimed at estimating and forecasting the transfer coefficient of radionuclides from soil to agricultural plants based on the real data collected in the areas affected by the Chernobyl disaster. The model was developed using dynamic Bayesian network, which is an element of novelty, since the use of this tool for radio-ecological modelling was not previously carried out. The factors affecting the radionuclide transfer coefficient were analyzed, and the dependencies transfer level change were identified, depending on the humidity, acidity, soil type, depth of the root system, the content of  $K^+$  and  $Ca^{2+}$ . Junction tree algorithm was used for inference, as the network consists both of continuous and discrete nodes. The results obtained demonstrate high accuracy in accordance with general criteria that justifies the use of dynamic Bayesian network to solve this problem. Also the possibility of this approach usage while solving problems of the same class in general was considered. The model allows creating long-term scenarios to identify the possible ways of agriculture development over the areas affected by the Chernobyl disaster and similar anthropogenic disasters.

**Keywords:** radionuclide contamination; dynamic Bayesian network; probabilistic inference.

#### Вступ

Унаслідок аварії на ЧАЕС, що сталася в 1986 р., були уражені значні площі родючих земель на території України, Росії та Білорусії [1]. Таким чином, була втрачена велика кількість сільськогосподарських угідь. 28 років потому дедалі більшої важливості набуває задача рекультивувати земель, оскільки в процесах міграції радіонуклідів установилась певна динамічна рівновага. Це дає змогу зробити прогноз, що існуючий стан мало зміниться протягом найближчих десятиліть [2]. Основний фактор ризику полягає в тому, що сільськогосподарська продукція, одержана з рекультивованих територій, має відповідати стандартам якості та бути безпечною для життя і здоров'я людини.

Процес зараження рослин відбувається таким чином. Основними радіонуклідами, що накопичуються у рослинах, є цезій і стронцій. Рослини, які вирощуються на заражених ґрунтах, засвоюють радіонукліди та накопичують їх у своїй біомасі. Причиною цього явища є подібність фізико-хімічних властивостей цезію ( $^{137}\text{Cs}$ ) до калію (K), а стронцію ( $^{90}\text{Sr}$ ) – до кальцію (Ca) [3]. Калій та кальцій є найбільш важливими для життєдіяльності організмів елементами, незамінними для забезпечення нормального здорового росту та функціонування клітин. Інші радіонукліди (плутоній, європій, уран тощо) не є аналогами важливих для життєдіяльності рослин хімічних елементів, що визначає їх низькі рівні накопичення в рослинах.

Актуальність дослідження цього процесу полягає в тому, що на сьогодні надходження радіонуклідів через ланцюги живлення стало

визначальною ланкою в радіаційному забрудненні людського організму, зокрема в його внутрішньому опроміненні [4]. Радіаційне зараження людського організму може відбуватися прямо та опосередковано, а саме через безпосереднє споживання рослин у першому випадку та споживання продуктів тваринництва у другому. Наслідками внутрішнього опромінення є низка захворювань серцево-судинної, нервової та респіраторної систем організму людини, різні види онкологічних захворювань, а також генетичні мутації, з яких у першому поколінні проявляються лише 10% [5]. Отже, проблема аналізу безпеки харчових продуктів та можливості їх вирощування на певній території є надзвичайно актуальною.

Для аналізу безпечності сільськогосподарських культур, вирощуваних на рекультивованих територіях, для організму людини розроблено математичну модель на основі динамічної мережі Байєса, особливості побудови та результати використання якої розглядаються у статті.

#### Постановка задачі

Метою роботи є: аналіз факторів, що впливають на передачу радіонуклідів у рослини; виявлення закономірностей стосовно рівня передачі радіонуклідів; створення ймовірнісно-статистичної моделі у формі динамічної мережі Байєса для оцінювання та прогнозування передачі радіонуклідів із ґрунту в рослини на основі фактичних даних. Це необхідно для подальшого визначення того, чи є безпечним вирощування рослин деякого типу на певній ділянці ураженої території.

Мета роботи передбачає розв'язання таких задач:

- аналіз факторів, що впливають на передачу радіонуклідів у рослини;
- побудова моделі цього екологічного процесу у вигляді динамічної мережі Байєса;
- аналіз якості побудованої моделі та формування висновків щодо можливості застосування цього математичного апарату до розв'язання задач такого класу;
- побудова дерева сценаріїв для задачі моделювання рівня передачі радіонуклідів із ґрунту в сільськогосподарські рослини.

### Аналіз стану проблеми

Протягом часу, що минув після Чорнобильської катастрофи, дослідники з України та зарубіжних країн приділяють значну увагу проблемі радіоекологічного стану рослин та вивченню особливостей накопичення ними радіоактивних елементів із ґрунту, зокрема з метою рекультивативної сільськогосподарських угідь та перешкоджання внутрішньому опроміненню організму людини через ланцюги живлення. Значну увагу привертає проблема оцінювання рівня передачі радіонуклідів з ґрунту в сільськогосподарські рослини. Автори досліджень розглядають як загальні принципи передачі радіонуклідів у теоретичних [6] та експериментальних [7] аспектах, так і їх залежність від різних факторів. Зокрема, найбільш широко представлені дослідження з класифікації типів ґрунту та їх впливу на радіаційне зараження рослин. У праці [8] за цим принципом наводиться класифікація ґрунтів України, у [9] – Бразилії, у [10] – Росії. Дослідження [11] наводить висновки щодо впливу кислотності ґрунту на величину зараження рослин, а дослідження [12] – сезонні зміни цього явища на прикладі зараженості фітомаси чорниці. В [13] подано розгорнутий аналіз усіх факторів впливу на величину передачі радіонуклідів у рослини і класифікацію внутрішніх та зовнішніх факторів впливу, а також характер дії цих факторів.

Окрему увагу дослідники приділяють визначенню рівня зараження рослин у контексті впливу на організм людини. Близько 25 % усіх надходжень радіоактивного цезію в організм людей, які проживають на забруднених територіях, зумовлене вживанням у їжу забруднених продуктів, серед яких чільне місце, з огляду на специфіку харчування населення регіону, посідають гриби та ягоди [14]. Внесок дикорослих

ягід і грибів у внутрішнє опромінення становить до 75–80 % від дози внутрішнього опромінення населення радіоактивно забруднених територій через продукти харчування.

Наразі процеси міграції радіонуклідів досягли стану динамічної рівноваги. Таким чином, є підстави зробити прогноз, що протягом досить тривалого часу, а саме кількох десятиріч, стан змінюватися не буде або буде змінюватися незначно [6]. Це означає, що 70–90 % радіонуклідів будуть і надалі знаходитись у верхньому (5–10 см) шарі ґрунту [12].

### Розробка моделі передачі радіонуклідів у рослини на основі динамічної мережі Байєса

Байєсівське моделювання та формування висновків – це популярний інструмент, можливості якого аналізуються та використовуються багатьма дослідниками, зокрема в [15]. Основними галузями застосування є технічна і медична діагностика, системи підтримки прийняття рішень у різних галузях досліджень, системи менеджменту ризиків у банківській сфері та страхуванні тощо. Фундаментальне дослідження цього математичного апарату виконав К. Мерфі у [16]. В свою чергу застосування мереж Байєса до розв'язання задач екологічного моніторингу є можливим завдяки універсальним характеристикам моделей такого типу, але воно ще не досить поширене. Крім того, попри досить широке представлення у дослідженнях з біологічної тематики проблеми передачі радіонуклідів у рослини роботи з математичного моделювання цього процесу широко не велися та є елементом наукової новизни представлених результатів дослідження.

**Опис даних для побудови моделі.** До складу зразків входили рослини 215 найменувань, які були розподілені на 9 груп за принципом їх споживання та використання: бобові (горох, квасоля, соя та ін.), гриби (білий гриб, польський гриб, підберезовик, підосиковик, опеньок, лисичка та ін.), зернові культури (озима і яра пшениця, овес, жито, ячмінь, гречка та ін.), коренеплоди (картопля, морква, буряк та ін.), овочі (капуста, кабачки, огірки та ін.), олійні культури (соняшник), трави (мітлиця, тимофіївка, стоколос, костриця, папороть та ін.), харчові трави, що включають лікарські та пряноароматичні рослини (кріп, петрушка, аніс, салат, шпинат), ягоди (чорниця, брусниця, журавлина та ін.).

Накопичення радіонукліда в певному виді рослин залежить від низки факторів. Їх поділяють на дві групи за відношенням до рослинного організму: внутрішні (притаманні конкретному виду) та зовнішні (екосистемні). До внутрішніх факторів належать: систематичне положення; утворення симбіозу з мікоризою грибів; потреба у  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  та інших катіонах; глибина розміщення кореневої системи у ґрунті; час, необхідний для досягання; частина рослини, що використовується. До зовнішніх факторів належать такі: тип ґрунту; мінералогічний та гранулометричний склад ґрунту, його багатство; вологість; кислотність (рН); вміст органічної речовини та гумусу; вміст обмінних  $K^+$  і  $Ca^{2+}$ ; погодні умови під час вегетаційного періоду.

У загальному випадку врахування внутрішніх факторів можна звести до врахування єдиного фактора – систематичного положення та виду рослин, оскільки саме цей фактор однозначно визначає всі інші фактори цієї групи. Зовнішні фактори визначають можливість реалізації різних сценаріїв провадження сільськогосподарської діяльності на певній ділянці, тому потребують диверсифікованого урахування в моделі.

**Опис параметрів моделі.** Основні фактори впливу на коефіцієнт передачі радіонуклідів вибрано як параметри динамічної байєсівської моделі. Детальний опис параметрів впливу подається, зокрема, в [13]. Наведемо деякі висновки з приводу врахування цих факторів, отриманих із використанням експертів і аналізу кореляцій. Ця інформація використовується при побудові моделі як апіорна: систематичне положення, вологість, тип і композиція ґрунту, вміст органічної речовини та гумусу, кислотність (рН), вміст калію, вміст кальцію і гранулометрична композиція.

**Погодні умови під час вегетаційного періоду.** Погодні умови виливають на рівень передачі радіонуклідів тим, що вони можуть змінювати значення інших характеристик, таких як вологість, час, необхідний для досягання, тощо. Їх можна розглядати як випадкове збурення моделі, керувати яким неможливо. Прогнозною змінною є фактор передачі радіонуклідів (TF – transfer factor), що визначається як відношення зараженості фітомаси рослин (Бк/кг) до зараженості ґрунту (кБк/м<sup>2</sup>). У таблиці подана кореляційна матриця параметрів моделі.

### Динамічні мережі Байєса як інструмент моделювання

Мережі Байєса (байєсівські мережі – БМ) і динамічні мережі Байєса (ДБМ) – інструменти ймовірнісного моделювання, які широко застосовують до розв'язання широкого спектра задач [15]. Використання ДБМ дає можливість узагальнити процес виявлення та встановити ступінь наявних зв'язків між змінними, що, на перший погляд, не мають між собою нічого спільного. У вигляді ДБМ можна представити ієрархічну марковську модель, що значно полегшує процеси навчання та формування висновку (отримання остаточного результату). Формування точного ймовірнісного висновку із використанням алгоритму зв'язаних дерев дає можливість використовувати згладжування і виконувати ці операції за час  $O(T)$ , на відміну від значення  $O(T^3)$  у загальному випадку.

ДБМ – розширення простих (статичних) байєсівських мереж для моделювання розподілів ймовірностей на множині випадкових змінних  $Z_1, Z_2, \dots$ . Як правило, змінні розбиваються на трійки  $Z_t = (U_t, X_t, Y_t)$ , що позначають множину змінних вхідного, прихованого та вихідного шарів моделі у просторі станів [16]. Розглядається модель стохастичного процесу з дискретним часом, тобто індекс  $t$  зростає з появою кожного нового спостереження. Термін “динамічний” у цьому випадку означає також і те, що моделюється динамічна система, а не лише сам факт, що вибірка даних змінюється з часом.

За означенням, ДБМ – це пара  $(B_1, B_{\rightarrow})$ , де  $B_1$  – БМ, що визначає апіорну ймовірність  $P(Z_1)$ , а  $B_{\rightarrow}$  – двошарова БМ, що визначає  $P(Z_t | Z_{t-1})$  за допомогою спрямованого ациклічного графа таким чином:

$$P(Z_t | Z_{t-1}) = \prod_{i=1}^N P(Z_t^i | Pa(Z_t^i)), \quad (1)$$

де  $Z_t^i$  –  $i$ -й вузол у момент часу  $t$ , що може бути компонентою  $X_t, Y_t$  або  $U_t$ , а  $Pa(Z_t^i)$  – батьки  $Z_t^i$  на графі. Вузли першого шару двошарової БМ не мають жодних параметрів, що з ними асоціюються, але кожен вузол другого шару має зв'язаний розподіл умовної ймовірності, що визначають значення  $P(Z_t^i | Pa(Z_t^i))$

**Таблиця.** Кореляційна матриця параметрів моделі

Фактори впливу	Вид	Вологість	Тип ґрунту	Гумус	Кислотність	Са	К <sub>2</sub> О	Композиція	ТФ
Вид	1	0,122349661	-0,019587335	0,00081873	-0,056719382	-0,034163079	-0,057787621	-0,105266333	-0,090198428
Вологість	0,122349661	1	0,064127194	-0,039475407	-0,076440668	-0,103962524	-0,167148343	-0,169672769	-0,100636682
Тип ґрунту	-0,019587335	0,064127194	1	-0,260950806	-0,040734481	-0,295119383	-0,226791967	-0,112320827	0,018870911
Гумус	0,00081873	-0,039475407	-0,260950806	1	-0,059736446	0,333766273	0,159736252	0,092580391	0,20529436
Кислотність	-0,056719382	-0,076440668	-0,040734481	-0,059736446	1	0,190383353	0,34816938	0,126505355	0,063227758
Са	-0,034163079	-0,103962524	-0,295119383	0,333766273	0,190383353	1	0,345337303	0,256925962	0,001186987
К <sub>2</sub> О	-0,057787621	-0,167148343	-0,226791967	0,159736252	0,34816938	0,345337303	1	0,114446664	0,021384545
Композиція	-0,105266333	-0,169672769	-0,112320827	0,092580391	0,126505355	0,256925962	0,114446664	1	0,029888044
ТФ	-0,090198428	-0,100636682	0,018870911	0,20529436	0,063227758	0,001186987	0,021384545	0,029888044	1

для всіх  $t > 1$ . Батьки вершини  $Pa(Z_t^i)$  можуть бути або в тому самому, або в попередньому часовому шарі. Втім, це суто загальноприйняте спрощення: не існує строгих математичних обмежень стосовно того, що батьківські вершини знаходяться не далі, ніж у сусідньому шарі і не можуть знаходитися, скажімо, через один шар. Дуги між шарами спрямовуються зліва направо, що позначає хід часу. Якщо існує дуга від  $Z_{t-1}^i$  до  $Z_t^i$ , то ця вершина називається стаєю. Дуги в межах одного шару є умовними, оскільки в цілому ДБМ є спрямованим ациклічним графом. У межах одного часового шару, як виняток, дозволяється використання неспрямованих дуг, що позначають сильні кореляції або обмеження. У такому випадку ДБМ називають динамічним ланцюговим графом.

Надалі будемо припускати, що параметри розподілу умовних імовірностей інваріантні в часі, тобто модель є часово гомогенною. Якщо параметри можуть змінюватися, їх можна додати до простору станів та розглядати як випадкові змінні. З іншого боку, якщо існує лише скінченна множина можливих значень параметрів, то можна додати приховану змінну, яка вибиратиме параметр для подальшого застосування.

Семантика ДБМ передбачає "розповсюдження" двох шарової БМ на  $T$  часових шарів. Результуючий розподіл записується таким чином:

$$P(Z_{1:T}) = \prod_{t=1}^T \prod_{i=1}^N P(Z_t^i | Pa(Z_t^i)) \quad (2)$$

Якщо дані не вводяться в режимі реального часу, то ймовірнісний висновок найпростіше

сформуванню розподілом мережі на два шари. Формування імовірнісного висновку відбувається статично (на кожному шарі окремо) з метою подальшого злиття. Якщо множини даних мають змінну довжину, то слід виконати формування висновку на найдовшій множині, а потім відсікти надлишкові значення.

**Побудова мережі.** Топологія побудованої мережі показана на рис. 1.

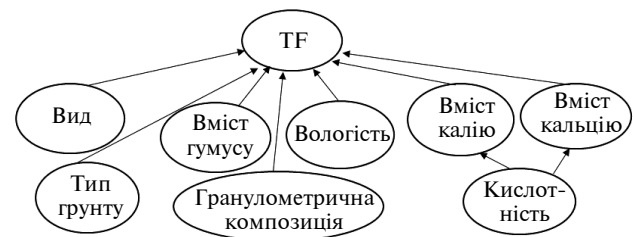


Рис. 1. Топологія ДБМ

Навчання мережі виконано на вибірці розміром 5700 значень, а тестування – на вибірці розміром 570 значень за всіма 80 часовими діапазонами. Оскільки всі вузли прихованого шару дискретні, вузол TF – неперервний, то для формування висновку слід використовувати алгоритм зв'язаних дерев, а топологія будується експертним шляхом. Один часовий діапазон відповідає одному місяцю. Графіки на рис. 2 відображають похибки на навчальній вибірці – логарифмоване середньоквадратичне відхилення ( $\log\text{SSE}$ ) та стандартне абсолютне відхилення (MAPE).

Графіки на рис. 3 показують відхилення результатів, одержаних за допомогою ДБМ, від реальної вибірки на прикладі одного набору із навчальної вибірки даних.

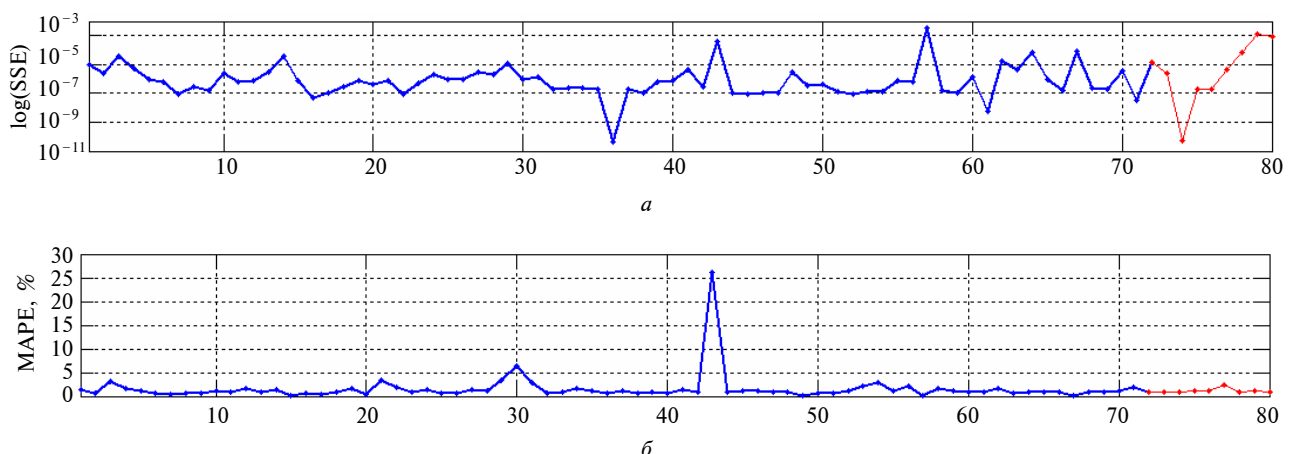


Рис. 2. Ілюстрація похибок тестової вибірки: а –  $\log\text{SSE}$ ; б – MAPE

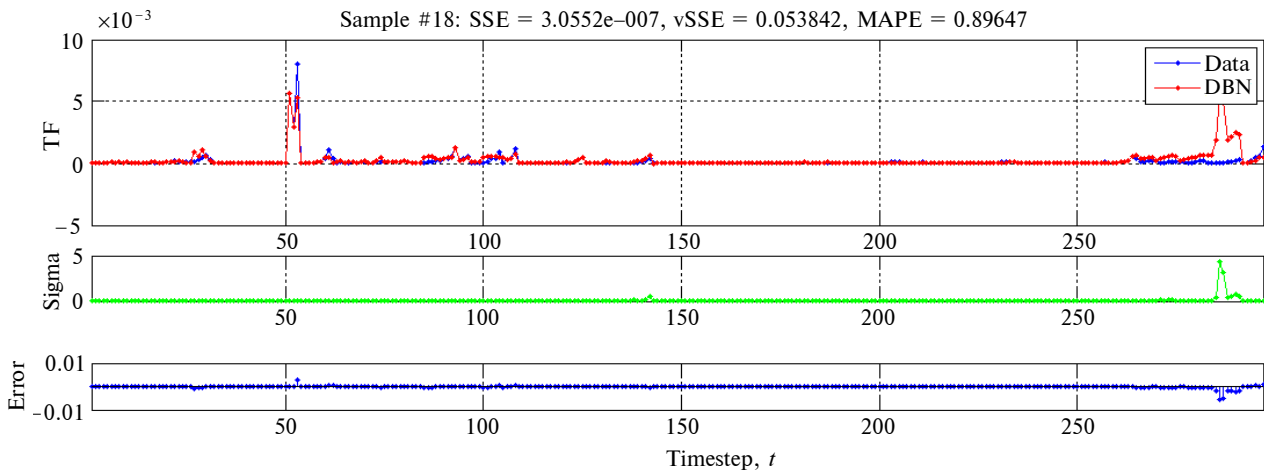


Рис. 3. Відхилення результатів, одержаних за допомогою ДБМ, від реальної вибірки на прикладі одного набору із навчальної вибірки даних

Модель демонструє високі показники якості за основними критеріями оцінки. Модель адекватно відображає наявний причинно-наслідковий зв'язок між вибраними змінними. Похибки є незначними: MAPE не перевищує 5% на всіх вимірах, крім двох, а  $\log(\text{SSE})$  нижчий за  $10^{-3}$ . Відхилення, показані на рис. 3, близькі до нуля. Таким чином, модель придатна для побудови сценаріїв, спрямованих на прогнозування зараження радіонуклідами.

#### Побудова сценаріїв із використанням результатів моделювання

Аналіз сценаріїв (сценарний аналіз) – метод прогнозування, який полягає у поділі всієї сукупності можливих подій на кілька груп та у визначенні логічної послідовності наслідків для кожної групи подій. Він застосовується у випадках, коли ймовірність виникнення різних подій майже однакова та існує необхідність заздалегідь обрати стратегію дій у рамках кожного сценарію. Сценарій – це можлива множина подій, що визначає розвиток тих чи інших факторів, які впливають на результат діяльності. Існують різні підходи до роботи із сценаріями, звідки виникають відмінності у типах самих сценаріїв та методах їх побудови. Сценарії можуть бути візуального, проектного, маршрутного й альтернативного типів [17, 18]. Альтернативний сценарій – порівняння варіантів із використанням багатьох сценаріїв візуального, проектного та маршрутного типів. Він використовується для створення нових знань щодо альтернативних станів.

Альтернативні сценарії мають на меті розширення знань щодо майбутнього в умовах невизначеності завдяки дослідженню не одного, а багатьох можливих варіантів розвитку подій. За допомогою цього підходу невизначеність неможливо виключити повністю, але можна обмежити її через детальну розробку якомога більшої кількості можливих впливів. Альтернативний метод сценарного моделювання ґрунтується на елементах візуального, проектного та маршрутного методів. Основна відмінність від інших методів та, що сценарії на базі альтернатив розглядають майбутнє як невідоме. Ризик при цьому є важливим чинником впливу на прийняття рішень в теперішньому часі. Для того щоб показати можливі варіанти розвитку подій від впливом ризиків, розробляється множина сценаріїв [19].

Розробка альтернативних сценаріїв потребує найбільше часу, трудових затрат і навичок, оскільки вимагає глибокого аналізу проблеми. Для побудови такого сценарію слід визначити основні невизначеності та фактори впливу в умовах процесу, що моделюється (природні умови, коливання цін на ринку, конкурентна ситуація, політичні рішення тощо). По кожному фактору впливу слід визначити ступінь важливості та рівень деталізації. Різні фактори впливу можуть мати різні рівні деталізації в рамках одного сценарію залежно від важливості певного фактора для процесу. Основоположні фактори впливу стають ключовими трендами сценарію. Для кожного чинника невизначеності можна змоделювати подальший набір сценаріїв, формуючи таким чином дерево сценаріїв із набором можливих значень. Ці набори

будуть визначальними при розгляді ключових невизначеностей, для яких важливий порівняльний аналіз, як, наприклад, для ризиків. При розробці альтернативних сценаріїв слід розглядати як бажані, так і небажані, але можливі варіанти.

Виконаємо поетапну розробку сценарію для задачі трансферу радіонуклідів у сільськогосподарські рослини.

*Визначення рамок процесу.* Перш за все необхідно визначити часові межі та обсяг задач, що підлягають аналізу. Оскільки моделювання здійснюється для задачі сільськогосподарського характеру, доцільно обрати період тривалістю в один рік (переважна більшість рослин, що розглядаються, є однорічними). Крім того, стан радіоактивного зараження досяг динамічної рівноваги, а отже, довгостроковий сценарій не буде відрізнятися від короткострокового.

*Визначення зацікавлених сторін.* Необхідно визначити, на яких осіб, на які процеси та явища буде впливати процес, що моделюється; які чинники впливають на процес; хто може бути зацікавленим у вихідному результаті процесу тощо. У процесі передачі радіонуклідів зацікавленими сторонами виступають виробники сільськогосподарської продукції, уряд та кінцеві споживачі продукції.

*Визначення основних трендів.* Після визначення переліку основних задач на першому етапі настає черга виділення зовнішніх та внутрішніх трендів, що впливають або будуть впливати на ці задачі. Для задачі, що розглядається, найбільш очевидним розподілом трендів буде розподіл за групами рослин, які можуть вирощуватися на певній території. Таким чином, враховуючи особливості кожної ділянки ґрунту, що проходить експертизу на придатність до вирощування сільськогосподарських рослин, можна буде визначити можливий рівень передачі радіонуклідів. Отже, для цієї задачі кількість трендів дорівнює дев'яти.

*Встановлення факторів невизначеності.* Оскільки задача безпосередньо пов'язана із природними явищами, основним фактором невизначеності є погодні умови під час періоду вегетації рослин, а також підтримання стану динамічної рівноваги у процесах міграції радіонуклідів.

*Створення початкових груп.* Для створення початкових груп виділимо основні тренди і фактори невизначеності та перетнемо їх області впливу. У перетині варіювання груп рослин, погодних факторів та стабільних процесів міг-

рації можемо одержати як початкову групу можливість визначення можливого рівня передачі радіонуклідів у рослини з метою прийняття правильних рішень і мінімізації такого потрапляння.

*Розробка сценаріїв навчання.* Первинні сценарії задають майбутні обмеження, що в свою чергу можуть бути нелогічними, неконсистентними чи недоречними. Загальна кількість можливих сценаріїв у дереві сценаріїв, тобто кількість усіх можливих наборів значень факторів впливу, становить 62208. Але експертним шляхом можна виділити стратегічно цінні групи, оскільки, скажімо, не всі групи рослин ростуть на всіх типах ґрунту, за умов певної вологості тощо. Для цієї задачі на цьому етапі слід розглядати конкретні набори вихідних даних для певних ділянок території, ураженої внаслідок ЧАЕС.

*Розробка кількісних моделей.* Оскільки побудова сценаріїв ґрунтується на реальних даних із заданими числовими показниками по кожному параметру, то, використовуючи ДБМ на основі зв'язного дерева, отримуємо кількісну модель для кожного із сценаріїв.

*Перехід до сценаріїв прийняття рішень.* Критеріїв життєздатності сценаріїв можна виділити кілька: 1) доречність: сценарії мають прямо перетинатися із задачами та обов'язками користувачів, регламентними послідовностями дій зацікавлених сторін та типовими реалізаціями трендів; 2) консистентність; 3) архетипність: сценарії повинні більше описувати різні варіанти розвитку подій у майбутньому, аніж можливі варіації однієї і тієї ж реалізації; 4) збалансованість: кожен сценарій в ідеалі має описувати збалансований стан, у якому система може існувати протягом певного відрізка часу.



Рис. 4. Визначення логічних блоків для побудови сценарію

У ході реалізації такої послідовності кроків генерується сценарій, який покриває широкий спектр можливих варіантів розвитку подій та висвітлює перспективи, що перебувають у про-

Чорниця	Лисички	Цукровий буряк	Петрушка	Озиме жито	Картопля	Помідори
Вологість 61,36 %	Вологість 20 %	Вологість 57,25 %	Вологість 14 %	Вологість 14 %	Вологість 16 %	Вологість 80,46 %
Тип ґрунту 3	Тип ґрунту 3	Тип ґрунту 2	Тип ґрунту 2	Тип ґрунту 2	Тип ґрунту 2	Тип ґрунту 3
Гумус 1,74 %	Гумус 3,6 %	Гумус 5,6 %	Гумус 1,3 %	Гумус 5,9 %	Гумус 5,6 %	Гумус 1,4 %
pH 4,3	pH 3,4	pH 5,3	pH 6,3	pH 5,4	pH 5,3	pH 5,6
Ca 2,7	Ca 1,26	Ca 28,5	Ca 11,2	Ca 22,5	Ca 28,5	Ca 7,0
K <sub>2</sub> O 3,7	K <sub>2</sub> O 4,84	K <sub>2</sub> O 17,2	K <sub>2</sub> O 7,02	K <sub>2</sub> O 14,4	K <sub>2</sub> O 17,2	K <sub>2</sub> O 7,8
Дрібні фракції 8,7 %	Дрібні фракції 10,2 %	Дрібні фракції 45,0 %	Дрібні фракції 33,5 %	Дрібні фракції 42,0 %	Дрібні фракції 45,0 %	Дрібні фракції 5,8 %
TF 18.757	TF 8.506	TF 0.741	TF 0.3	TF 0.038	TF 0.23	TF 2.2

Рис. 5. Дерево сценаріїв для задачі моделювання передачі радіонуклідів із ґрунту в сільськогосподарські рослини

тистоянні між собою. При цьому враховуються взаємозв'язки та внутрішня логіка кожного із варіантів. Логічні блоки для побудови сценарію показано на рис. 4.

Для задачі моделювання передачі радіонуклідів із ґрунту в сільськогосподарські рослини одержуємо дерево сценаріїв такого вигляду, як показано на рис. 5.

### Висновки

Розроблено модель у формі динамічної мережі Байеса для оцінювання і прогнозування рівня передачі радіонуклідів із ґрунту в сільськогосподарські рослини. Перевагами такої моделі є коректне врахування причинно-наслідкових зв'язків між змінними процесу розповсюдження радіонуклідів, а також представлення динаміки цього процесу в зручній для аналізу та прогнозування формі. При побудові моделі розв'язано такі задачі.

1. Проаналізовано фактори, що впливають на передачу радіонуклідів у рослини, і при цьому виявлено такі закономірності: рівень передачі знижується при глибшому заляганні кореневої системи рослин, нижчій вологості, на родючих ґрунтах із низьким вмістом дрібних фракцій, пониженою кислотністю та високим вмістом K<sup>+</sup> і Ca<sup>2+</sup>. Рослини, що відповідають цим вимогам, можна вирощувати в ураженій зоні з меншим ризиком їх зараження радіонуклідами.

2. Виконано моделювання екологічного процесу передачі радіонуклідів у рослини за допомогою динамічної мережі Байеса. Отримана модель характеризується високою адекватністю процесу. Так, середня абсолютна похибка у процентах не перевищує 5 % практично на всіх спостереженнях, а log(SSE) не перевищує значення 10<sup>-3</sup>.

3. Проаналізована придатність побудованої моделі для розв'язання задачі екологічного мо-



ніторингу і на її основі побудовано дерево сценаріїв для розв'язання задачі моделювання передачі радіонуклідів із ґрунту в сільськогосподарські рослини. На основі отриманих результатів можна приймати рішення стосовно можливостей використання різних культур для засівання площ, забруднених радіонуклідами.

Іншими перевагами застосування байєсівського підходу є такі: він забезпечує високий рівень узагальнення, що дає змогу комбінувати параметри різної природи; динамічна мережа

дає можливість аналізувати взаємні впливи між змінними в одному часовому шарі та між ними, вертикально, що є особливо важливим для моделювання процесів, пов'язаних із моніторингом навколишнього середовища.

Все сказане вище дає можливість стверджувати, що подальше використання динамічних мереж Байєса для розв'язання задач, пов'язаних із моделюванням екологічних процесів, є перспективним методом вирішення проблем такого роду.

### Список літератури

1. *M. de Cort*, Atlas on the caesium deposition across Europe after the Chernobyl accident, Brussels, Belgium & Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1998.
2. *V.A. Hrabovskyy*, "Monitoring of radionuclide contamination of plants in the western part of Volyn Polissya (Ukraine) during 1994–2007", *Radioprotection*, vol. 44, is. 5, pp. 639–645, 2009.
3. *Environmental protection in Ukraine 1994–1995*, Ukraine, Kyiv: Rayevsky publishing, 1997, 95 p.
4. *V.G. Baryakhtar*, Chernobyl disaster. Ukraine, Kyiv: Naukova dumka, 1995, 560 p.
5. *L. Ciuffo*, "137Cs and 40K soil-to-plant transfer Process in Semi-natural: Grassland. Assessment of its Impact on Human Food Chain", *J. Radiation Res.*, vol. 44, is. 3, pp. 277–283, 2003.
6. *B.S. Priester*, "Radionuclide migration in the soils and transfer of them to plants in Chernobyl accident area", *Soil Sci.*, vol. 10, pp. 51–60, 1990.
7. *M.M. Rahman*, "Transfer of radiocaesium from soil to plant by field experiment", *J. Biolog. Sci.*, vol. 7, is. 4, pp. 673–676, 2007.
8. *B.S. Priester et al.*, "The Classification of Ukrainian soil systems on the basis of transfer factors of radionuclides from soil to reference plants", in Proc. Final research coordination meeting organized by the Joint FAO/IAEA Programme of Nuclear Techniques in Food and Agriculture and held in Chania "Classification of soil systems on the basis of transfer factors of radionuclides from soil to reference plants", Crete, 2003, pp. 153–178.
9. *J. Handl*, "Accumulation of (137)Cs in Brazilian soils and its transfer to plants under different climatic conditions", *J. Environ. Radioactivity*, vol. 99, is. 2, pp. 271–287, 2008.
10. *N. Sanzharova*, "The classification of Russian soil systems on the basis of transfer factors of radionuclides from soil to reference plants", in Proc. Final research coordination meeting organized by the Joint FAO/IAEA Programme of Nuclear Techniques in Food and Agriculture and held in Chania "Classification of soil systems on the basis of transfer factors of radionuclides from soil to reference plants", Crete, 2003, pp. 139–144.
11. *R. Djingova*, "Influence of soil acidity on the transfer of caesium 137 and other radionuclides from soil to reference plants", *Ibid*, pp. 51–58.
12. *O.O. Orlov*, "Peculiarities of the season dynamics of <sup>137</sup>Cs accumulation by the phytomass of blackberry (*Vaccinium myrtillus* L.) and cowberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.)", *Naukovi visti UkrDLTU*, vol. 10.2, pp. 34–43, 2000.
13. *N. Zarubina*, "Peculiarities of accumulation of gamma-radiation radionuclides by the macromycetes on the territory of the alienation zone and the "southern trace" after Chernobyl disaster": Ph.D thesis, KNU, Kyiv, Ukraine, 2002, 20 p.
14. *V.P. Krasnov*, Radioecology of forests of Ukrainian Polissya. Ukraine, Zhytomyr: Volyn, 1998, 112 p.
15. *K.A. Murphy*. (2007). Brief Introduction to Graphical Models and Bayesian Networks [Online]. Available: <http://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Bayes/bayes.html/>
16. *M.Z. Zgurovskiy et al.*, "System methodics of designing BN", *Naukovi visti NTUU "KPI"*, no. 4, pp. 47–61, 2007 (in Ukrainian).
17. *E. Wollenberg et al.*, Anticipation change: scenarios as a tool for adaptive forest management: a guide. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research, 2000, 36 p.
18. *D. Mercer*, "Scenarios made easy", *Long Range Planning*, vol. 28, no. 4, pp. 81–86, 1995.
19. *P.J.H. Schoemaker*, "Multiple Scenario Development: its conceptual and behavioral foundation", *Strategic Management J.*, vol. 14, no. 3, pp. 193–213, 1993.