

ОЦІНКА АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛІ МІГРАЦІЇ ^{137}Cs У ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ УКРАЇНСЬКОГО ПОЛІССЯ

А. М. Ковальчук¹, В. Г. Левицький¹, І. І. Самолюк¹, В. М. Янчук¹, О. О. Орлов²

¹ Житомирський державний технологічний університет, Житомир

² Поліський філіал науково-дослідного інституту лісового господарства та агролісомеліорації, Житомир

Наведено математичну модель міграції ^{137}Cs в лісовій екосистемі В₃ типу та результати дослідження адекватності побудованої моделі. Розглянуто процес створення, параметризації, чисельного аналізу моделі та критерії, за якими було проведено аналіз адекватності моделі. Описано основні засади автоматизованої процедури дослідження адекватності побудованої моделі, що дає змогу оцінити придатність моделі до застосування в області лісокористування.

Постановка проблеми. Унаслідок Чорнобильської катастрофи значна частина території українського Полісся, навіть далеко за межами зони відчуження ЧАЕС, була забруднена техногенними радіонуклідами. Актуальною проблемою є визначення та прогнозування доз внутрішнього опромінення, які отримає населення даних регіонів унаслідок споживання лісових продуктів із забруднених територій. Також існує необхідність у виробленні науково обґрунтованих рекомендацій щодо лісокористування в умовах радіоактивного забруднення. Дані проблеми вирішуються моніторинговими службами шляхом дослідження стану забрудненості середовища. Моніторинг охоплює спостереження за фізичними, хімічними та біологічними показниками та реакцію біологічних систем на антропогенний вплив.

При комплексному вивченні лісових екосистем недостатньо лише визначити інтегральні характеристики забруднення, необхідно також проводити дослідження, які виходять за рамки елементарної обробки даних моніторингу і потребують застосування системного аналізу для дослідження міграції радіонуклідів у навколишньому середовищі.

Такий підхід, у свою чергу, дає змогу за допомогою математичного моделювання дослідити основні закономірності міграції радіонуклідів і, крім отримання функціональних залежностей, які на сьогоднішній день ще уточнюються, дозволяє побудувати довготривалий прогноз динаміки міграції радіонуклідів у лісових екосистемах.

Ураховуючи те, що Поліський регіон є зоною конденсаційних випадінь ^{137}Cs , авторами було побудовано математичну модель міграції ^{137}Cs в лісовій екосистемі, яка є біогеоценозом соснового лісу чорнично-зеленомошного, сформованого на дерново-середньо-підзолистих супіщаних ґрунтах [1 - 6]. Математичне моделювання екосистеми потребує виконання багатьох етапів різнопланових досліджень, одним з яких є обов'язкове дослідження адекватності моделі, що дозволяє дати відповідь на запитання, наскільки дана модель придатна для вирішення поставлених цілей.

Мета та задачі роботи. Метою роботи є дослідження адекватності побудованої моделі міграції ^{137}Cs в лісовій екосистемі.

Наукова новизна роботи. Розроблено автоматизовану процедуру дослідження адекватності побудованої моделі міграції ^{137}Cs в лісовій екосистемі, що дає змогу оцінити придатність моделі до застосування в області лісокористування та санітарії.

Аналіз досліджень і публікацій. На сьогоднішній день існує досить широкий спектр математичних моделей у радіоекології та програмних засобів, в яких вони реалізовані. Серед моделей міграції ^{137}Cs можна виділити, наприклад, FORESTPATH, RADFORET, RIFE, FORESTLIFE, ECORAD, FORESTLAND, REC-MODEL [7 - 10] тощо. Перелік найвідоміших моделей наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Моделі міграції радіонуклідів в лісових екосистемах

Назва моделі	Розробник моделі
RIFE1	Дж. Шо, Центр аналітичних досліджень навколишнього середовища. Королівський коледж, Центр технологій навколишнього середовища, Великобританія
FORESTLAND	Р. Авіла, Шведський інститут радіаційного захисту, Швеція С. Фесенко, С. Спірідонов, Всеросійський науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіоекології та агроєкології, Російська Федерація
FOA	Р. Бергман, Дослідницький центр національної оборони, Швеція
FORESTLIFE	О. Дворнік, Т. Жученко, Інститут лісу, НАН Білорусі, Білорусь
FORESTPATH	І. Лінков, Menzie-Cura & Associates, Inc., США
ECORAD-C	С. Маміхін, Московський державний університет, Російська Федерація
FINNFOOD	А. Рантаваара, Організація радіаційної та ядерної безпеки, Фінляндія
RODOS	Ф. Калмон, Інститут ядерної безпеки та захисту, Франція
IAEA FORM Model	М. Фріссел, Нідерланди
FORWASTE	О. Конопльов, О. Булгаков, Наукове об'єднання "Тайфун", Обнінськ, Російська Федерація

Усі ці моделі відрізняються рівнем складності, враховують різну кількість компартментів, описуються різними типами рівнянь. Порівняння даних моделей за рядом ознак та запропонованої моделі (колонка № 11) наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Зведений порівняльний аналіз моделей міграції радіонуклідів у лісових екосистемах

Ознака для порівняння	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Древостан	+	+	+	+	+	+/-	-	-	+	+	+
- кількість складових підсистем	2	3	-	-	-	-	-	-	-	6	5
Моховий ярус	+/-	-	+	-	+/-	+	-	+	-	-	+
- кількість складових підсистем	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Гриби	+/-	+	+	+	+/-	+/-	+	+	+/-	-	+
- кількість складових підсистем	-	-	-	4	-	-	5	4	-	-	4
Трав'яно-чагарничковий ярус	+/-	+	+	+	+/-	+/-	+	+	+/-	-	+
- кількість складових підсистем	-	-	-	3	-	-	3	1	-	-	2
Підлісок	+/-	+	-	-	+/-	+/-	-	-	+/-	-	+/-
Лісова підстилка	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	+
- кількість складових підсистем	1	+	-	3	3	-	-	-	-	-	3
Мінеральні шари ґрунту	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
- кількість складових підсистем	2	18	-	15	3	2	-	-	2	>2	10
Явне врахування нелінійної природи процесів у системі	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Динамічна модель	+	+	+	+	+	+	-	+	+/-	-	+

Примітка: "+" – модель враховує ознаку; "-" – модель не враховує ознаку; "+/-" – модель частково враховує ознаку.

За результатами порівняння можна зробити висновок про те, що представлена в роботі модель є однією з найповніших за кількістю макроблоків, на які розділено екологічну систему, що моделюється, та враховує найбільшу кількість складових кожного макроблока. Одним із принципових моментів, що відрізняє запропоновану модель від уже розроблених є

врахування мохового ярусу, який є потужним природним накопичувачем ^{137}Cs , та використання нелінійних залежностей для коефіцієнтів міграції ^{137}Cs між деякими складовими екосистемами.

Темі дослідження адекватності математичних моделей присвячено багато праць в області теорії систем. Особливості методики дослідження адекватності математичних моделей екологічних систем висвітлено в ряді робіт, серед яких [11–13]. Розглянемо детальніше побудовану авторами модель та методику дослідження її адекватності.

Процес побудови моделі. Процес моделювання міграції ^{137}Cs розділено на декілька етапів, кожен з яких є послідовним та завершеним кроком у формуванні моделі. Процедура формування моделі включає такі кроки:

- побудова концептуальної схеми моделі;
- вибір та обробка даних радіоекологічного моніторингу;
- визначення співвідношень для знаходження невідомих коефіцієнтів міграції ^{137}Cs за даними моніторингу;
- ідентифікація параметрів звичайних диференціальних рівнянь (ЗДР) зміни коефіцієнтів міграції ^{137}Cs ;
- формування систем ЗДР математичної моделі;
- чисельний аналіз та представлення результатів моделювання.

Викладена схема є зручною за умови використання на кожному кроці предметно-орієнтованих інструментів створення та аналізу моделі. Також багатоетапний підхід до побудови математичних моделей лісових екосистем дає змогу детальніше вивчити внутрішні процеси, що відбуваються в екосистемі й впливають на перерозподіл радіонуклідів у ній.

За результатами аналізу складу лісової екосистеми В₃ типу було виділено сім макроблоків, які повинні бути відображені в структурі моделі: деревостан, підлісок, моховий ярус, трав'яно-чагарничковий ярус, гриби, лісова підстилка, мінеральні шари ґрунту. Макроблоки поділяються на більш дрібні складові, необхідні з точки зору дослідження внутрішніх процесів перерозподілу радіонуклідів у тілі рослини для прогнозування вмісту ^{137}Cs в конкретній її частині. В якості критерію деталізації використано біологічний поділ рослин на складові та необхідність прогнозування вмісту ^{137}Cs в конкретній частині рослини з господарської точки зору. Отриману загальну концептуальну схему моделі міграції ^{137}Cs представлено на рис. 1.

На основі опису процесів міграції ^{137}Cs та отриманих для кожного компартменту лісової екосистеми схем міграції ^{137}Cs за принципом формування компартментних моделей природних екосистем формується система лінійних ЗДР зі змінними коефіцієнтами. Кожний компартмент, що входить до складу екосистеми, описується одним рівнянням виду

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

де l_{ki} – коефіцієнти, взяті з матриці зв'язків між складовими екосистемами; x_i – активність, нормована на одиницю площі для відповідного компартменту екосистеми, Бк/м²; λ – коефіцієнт напіврозпаду радіоцезію, 1/рік; q – коефіцієнт зв'язування радіоцезію з компартментом, 1/рік; $a_{ij}(t)$ – вагові коефіцієнти міграції ^{137}Cs між компартментами екосистеми, 1/рік.

Параметризація моделі. Пошук коефіцієнтів моделі $a_{ij}(t)$ 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 радіонукліда. Враховуючи специфіку процедури моніторингу кількості ^{137}Cs для кожного компартменту екосистеми, було зроблено перехід від вмісту активності на одиницю маси (кБк/кг) до вмісту активності на одиницю площі (кБк/м²) з урахуванням середніх значень врожайності компартментів на одиницю площі. Похибка вимірювання

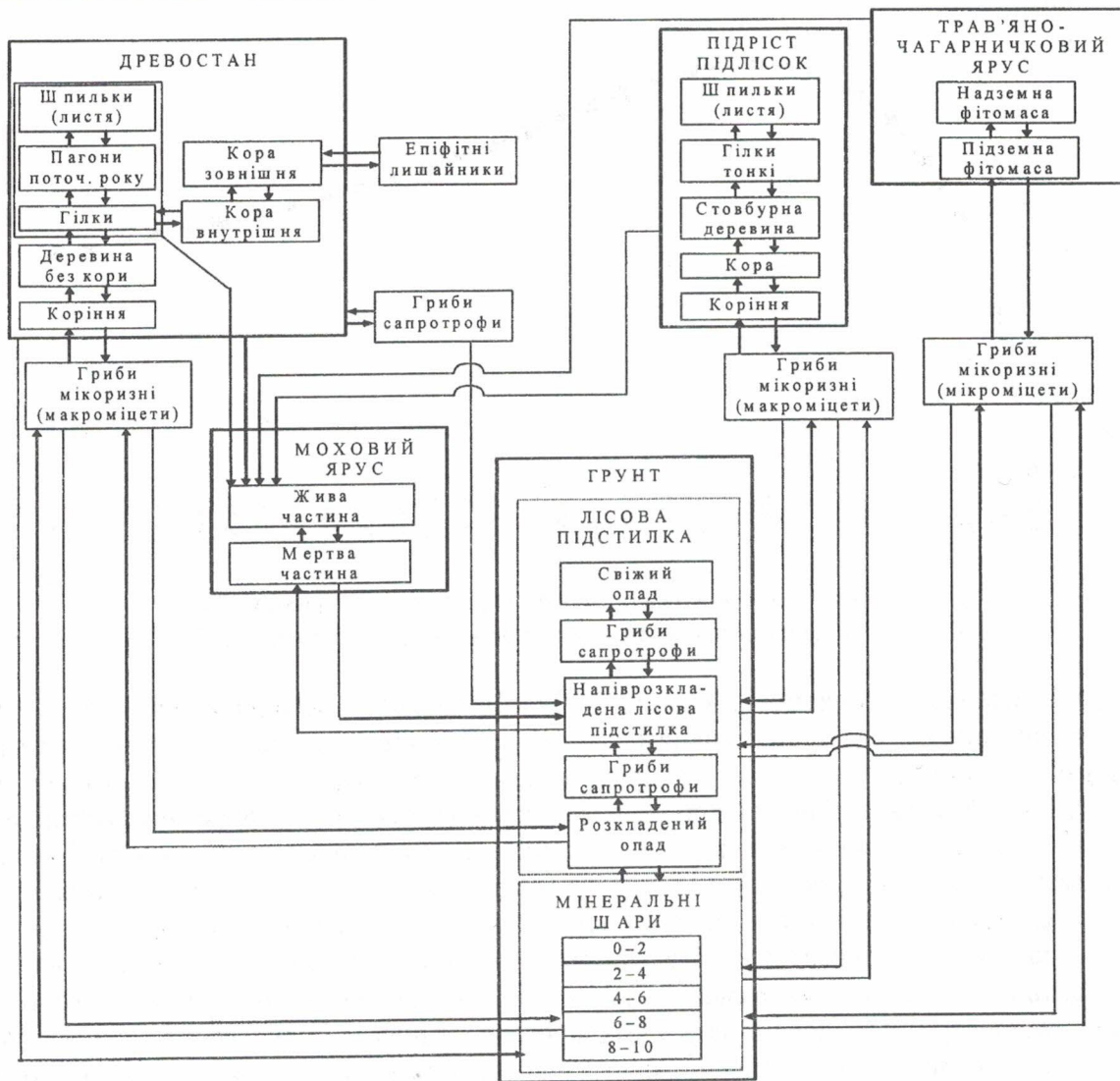


Рис. 1. Концептуальна схема моделі міграції ^{137}Cs в лісовій екосистемі В₃ типу.

значення активності нормована на одиницю маси для компартментів екосистеми, що моделюються, складає від 10 до 15 % [14 - 15].

Для кожного компартменту можна записати рівняння балансу питомих активностей, однак кількість таких рівнянь недостатня для відшукування всіх коефіцієнтів міграції ^{137}Cs , оскільки їх значно більше, ніж компартментів. Решта співвідношень для визначення коефіцієнтів міграції встановлюється на основі аналізу життєвого циклу екосистеми. Знайдені співвідношення та дані радіоекологічного моніторингу для двох послідовних років дають змогу скласти систему алгебраїчних рівнянь, з якої визначаються значення коефіцієнтів міграції протягом відповідного періоду. За наявності даних моніторингу протягом декількох років складається та розв'язується послідовність описаних вище систем алгебраїчних рівнянь, з яких визначаються залежності $a_{ij}(t)$, що описують зміну коефіцієнтів моделі з часом. За залежностями $a_{ij}(t)$ виконується ідентифікація параметрів відповідних ЗДР зміни коефіцієнтів міграції з часом. Отримані ЗДР динаміки коефіцієнтів міграції доповнюють систему ЗДР динаміки активностей радіоцезію в компартментах екосистеми, що дозволяє повністю завершити побудову моделі.

Чисельний аналіз побудованої моделі. За результатами чисельного аналізу побудованої моделі було отримано прогноз міграції ^{137}Cs між компартментами лісової екосистеми типу В₃ до 2015 р. Приклад результатів моделювання для компартменту ягід чорниці наведено на рис. 2. Чисельний аналіз моделі проводився зі значенням для початкової нормованої цільності забруднення на одиницю площі, що дорівнює 560 кБк/м^2 .

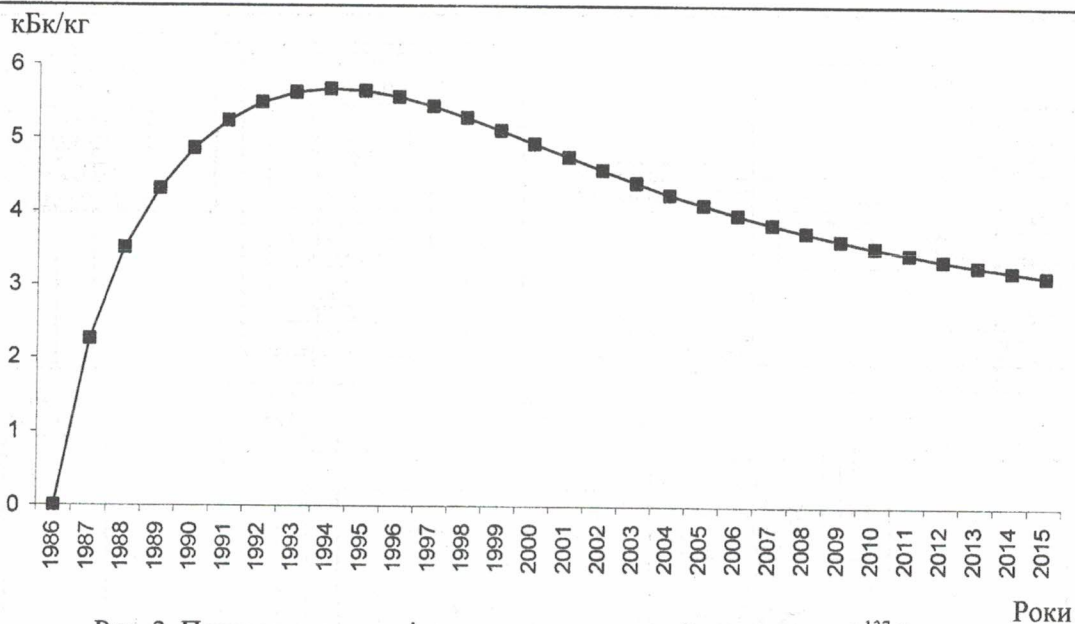


Рис. 2. Приклад результатів моделювання динаміки активності ^{137}Cs , нормованої на одиницю маси для компартменту “ягоди чорниці”.

Дослідження адекватності моделі. Побудова та аналіз математичної моделі є не тільки багатоетапним, але й ітеративним процесом. Важливим етапом на кожній ітерації моделювання є оцінка якості моделі, її придатності для розв’язання задач дослідження, на основі якої приймається рішення про необхідність подальшого калібрування моделі або відповідності моделі встановленим вимогам. Одним з визначальних показників якості моделі є її адекватність, під якою розуміється ступінь відповідності моделі цілям дослідження. У процесі дослідження адекватності можна окремо виділити етапи валідації даних, дослідження операційної та концептуальної адекватності моделі. Валідація даних необхідна для підтвердження відповідності отриманих даних моніторингу обраному критерію якості та повинна демонструвати коректність інтерпретації даних. Дослідження операційної адекватності має прагматичну спрямованість і виконується для оцінки, наскільки якісно модель імітує поведінку реальної системи, безвідносно до механізмів, застосованих при цьому. Дослідження концептуальної адекватності базується на аналізі науково обґрунтованих пояснень взаємозв’язків між компонентами, відображених у моделі, та обґрунтуванні спрощень поведінки моделі порівняно з реальною системою. Темі обґрунтування теорій та припущень, що лежать в основі розробленої моделі міграції радіонуклідів у лісовій екосистемі, присвячено ряд інших робіт, пов’язаних з даною [8]. Ця ж робота присвячена оцінці операційної адекватності моделі міграції ^{137}Cs в лісних екосистемах.

Оцінка операційної адекватності моделі міграції ^{137}Cs в лісових екосистемах проводиться шляхом якісного та кількісного порівняння даних спостережень та даних, отриманих у результаті чисельного аналізу математичної моделі. При цьому використовується методика, відома під назвою “розщеплення даних” [11]. Згаданий підхід полягає в розділенні накопичених історичних даних спостережень на дві частини, перша з яких використовується для побудови моделі, а друга – для тестування відповідності поведінки побудованої моделі реальній системі. У даному випадку набір даних спостережень з 1991 по 2002 р. було розбито на інтервали 1991 - 1997 рр. і 1998 - 2002 рр., перший з яких використовувався для параметризації моделі, а другий – для проведення перевірки адекватності математичної моделі.

Із списку процедур, наведеного в роботі [12], для оцінки адекватності моделі міграції ^{137}Cs в лісових екосистемах використовувались як кількісні, так і якісні методи.

Відомо, що характер відмінностей між даними спостережень та обчисленими даними впливають на величину оцінки суттєво по-іншому для різних критеріїв якості. Тому для

більш повного аналізу представленої моделі операційна валідація проводилась із залученням наступних п'яти критеріїв з різними характеристиками.

1. Нормалізована середньо-квадратична похибка (*normalized root mean square error*)

$$\text{NRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}}}{\bar{O}} \quad (2)$$

2. Індекс погодженості (*index of agreement*)

$$\text{IoA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

3. Альтернативний індекс погодженості (*alternative index of agreement*)

$$\text{AIoA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \quad (4)$$

4. Нормалізована середня абсолютна похибка (*normalized mean absolute error*)

$$\text{NMAE} = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{N \cdot \bar{O}} \quad (5)$$

5. Ефективність моделювання (*modeling efficiency*)

$$\text{ME} = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

Тут P_i та O_i – прогнозовані дані та дані спостереження відповідно для i -го року з інтервалу спостереження; N – кількість років на інтервалі спостереження; \bar{P} та \bar{O} – середні значення прогнозованих даних та даних спостереження для інтервалу спостереження.

Приклад графіків, за якими проводиться якісна оцінка відповідності результатів моделювання даним моніторингу для компартменту ягід чорниці наведено на рис. 3.

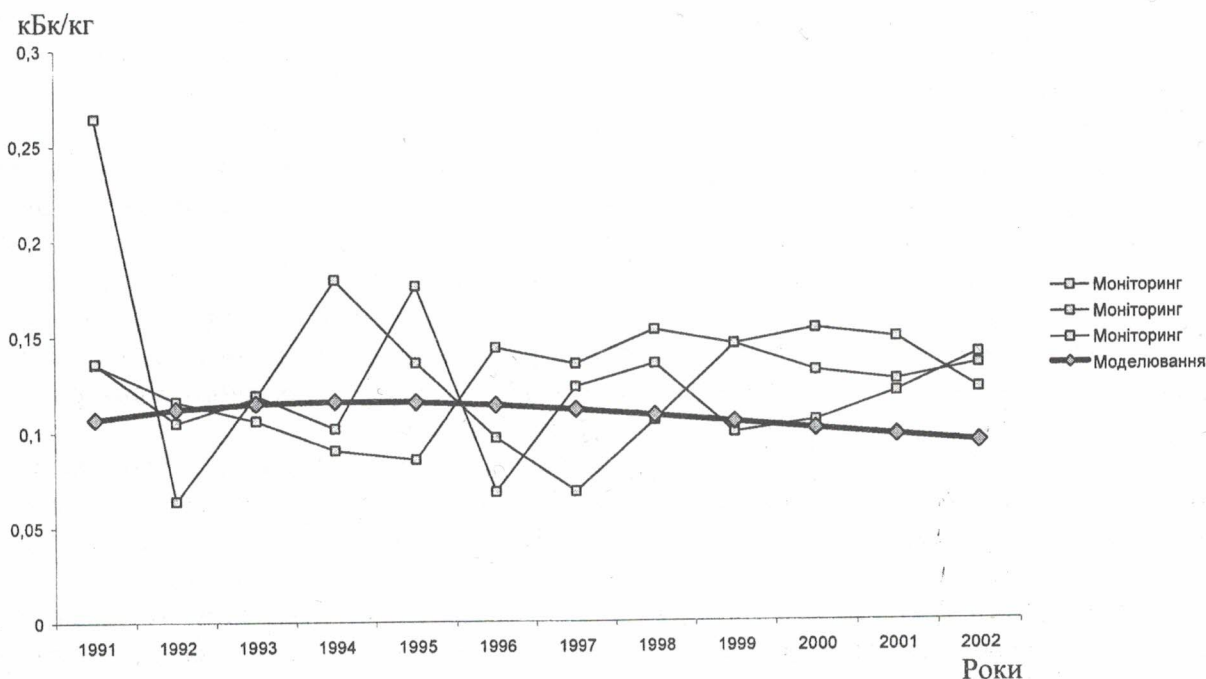


Рис. 3. Графіки візуальної оцінки результатів моделювання для компартменту “ягоди чорниці”.

NRMSE, ІоА, АІоА та NMAE порівнюють дані прогнозу та спостережень на індивідуальному рівні, для кожної окремої точки вимірювань на відміну від таких інтегральних показників, як середня похибка, відносна систематична похибка тощо. Вимірювання відмінностей даних для NRMSE, ІоА та ME відбувається в квадратичному сенсі, що викликає досить високу чутливість оцінки до викидів (тобто модельованих значень, що різко відрізняються на фоні відповідних спостережень). При цьому ME оцінює характер відмінностей між даними прогнозу та спостережень по відношенню до обраного критерію (так званий критеріальний рівень порівняння), співставляючи дані прогнозу та спостережень із середнім значенням спостережень. Усі згадані критерії якості оцінюють динамічні властивості прогнозованих даних, не згладжуючи їх, та є безрозмірними величинами. Порівняльну характеристику використаних критеріїв якості зведено в табл. 3.

Таблиця 3. Критерії для кількісної оцінки адекватності моделі міграції ¹³⁷Cs в лісових екосистемах

Критерій	Рівень порівняння	Міра відмінностей	Діапазон значень	Значення для слабкого (або взагалі відсутнього) погодження даних	Значення для досконалого погодження даних	Компенсація від'ємних та додатних значень відмінностей
NRMSE	індивідуальний	квадратична	[0; +∞)	>>0	0	ні
ІоА	індивідуальний	квадратична	[0; 1]	0	1	ні
АІоА	індивідуальний	абсолютна	[0; 1]	0	1	ні
NMAE	індивідуальний	абсолютна	[0; +∞)	>>0	0	ні
ME	критеріальний	квадратична	(-∞; 1]	<<1	1	ні

При роботі над моделлю досліднику доводиться працювати з великими об'ємами інформації, упорядковувати та обробляти дані моніторингу по кожному з компартментів. Тому серед задач, що розв'язувались авторами в рамках дослідження міграції ¹³⁷Cs була й задача полегшення роботи дослідника та економії часу шляхом автоматизації процесу побудови та дослідження моделі міграції ¹³⁷Cs в лісовій екосистемі. Результатом розв'язання даної задачі була розробка програмного засобу автоматизації побудови та аналізу моделі міграції ¹³⁷Cs в лісовій екосистемі "Druadan" [3 - 6].

Програмний засіб "Druadan" дозволяє автоматизувати процес моделювання на кожному з етапів, у тому числі й оцінку адекватності моделі. Результати обчислення кількісних показників адекватності для кожного з розглянутих компартментів критеріїв якості, обраних для кількісної оцінки адекватності моделі міграції ¹³⁷Cs в лісових екосистемах, наведено в табл. 4. За наведеними в таблиці результатами можна кількісно оцінити ступінь адекватності моделювання по кожному з компартментів за обраними критеріями якості. З таблиці видно, що значення обраних критеріїв для більшості компартментів екосистеми близькі до значень, які відповідають досконалому погодженню результатів моделювання та даних моніторингу. Серед причин значного відхилення отриманих показників від значень досконалого погодження даних по деяким з компартментів можна виділити неможливість отримати досить точні дані радіоекологічного моніторингу й, відповідно, достатньо точно відкалібрувати параметри моделі.

Керуючись отриманими результатами, можна спланувати подальшу роботу з калібрування моделі. Також крім оцінки адекватності моделі по кожному компартменту бажано мати єдиний показник, що характеризує адекватність моделі. У подальшому автори планують роботу в напрямку визначення показників оцінки адекватності моделі в цілому.

Висновки. Результати проведеної оцінки адекватності демонструють здатність побудованої моделі імітувати динаміку міграції ¹³⁷Cs між компартментами лісової екосистеми. Результати кількісної оцінки адекватності показали близькість отриманих результатів

Таблиця 4. Результати кількісної оцінки адекватності моделі міграції ^{137}Cs в лісових екосистемах

Назва компартменту	NRMSE	IoA	AIoA	NMAE	ME
Підстилка (свіжий опад)	0,102	0,959	0,873	0,051	0,764
Підстилка (напіврозкладена)	0,023	0,999	0,971	0,019	0,997
Підстилка (розкладена)	0,045	0,857	0,514	0,043	0,435
Грунт 0 – 2 см	0,021	0,968	0,789	0,021	0,873
Грунт 2 – 4 см	0,069	0,897	0,610	0,066	0,447
Грунт 4 – 6 см	0,154	0,938	0,711	0,147	0,765
Грунт 6 – 8 см	0,182	0,936	0,710	0,174	0,765
Грунт 8 – 10 см	0,064	0,984	0,866	0,058	0,941
Грунт 10 – 12 см	0,096	0,908	0,706	0,082	0,680
Russ paludosa	0,022	0,996	0,953	0,014	0,986
Xerocomus badius	0,077	0,905	0,770	0,051	0,725
Boletus edulis	0,023	0,973	0,893	0,013	0,904
Canth cibarius	0,078	0,993	0,917	0,063	0,974
Кора зовнішня	0,046	0,996	0,943	0,034	0,984
Деревина	0,054	0,987	0,874	0,050	0,951
Щорічні побіги	0,156	0,947	0,744	0,156	0,783
Щорічні голки	0,048	0,986	0,864	0,047	0,942
Кора внутрішня	0,139	0,822	0,543	0,119	-0,418
Мох (жива частина)	0,013	1	0,982	0,012	0,999
Мох (мертва частина)	0,025	0,972	0,815	0,023	0,882
Чорниці – ягоди	0,156	0,519	0,614	0,065	0,054
Чорниці – надземна фітомаса	0,045	0,996	0,953	0,030	0,987

моделювання до даних моніторингу. Підводячи підсумки аналізу моделі, можна стверджувати, що мета побудови моделі була досягнута й побудована модель міграції ^{137}Cs в лісових екосистемах придатна до застосування при обґрунтуванні заходів щодо лісокористування на забруднених територіях та прогнозування доз внутрішнього опромінення населення внаслідок вживання продуктів лісу із забруднених територій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kovalchuk Andriy, Krasnov Volodymyr, Levitsky Vyacheslav et al. Application of the prediction of ecosystem contamination for the exposure dose calculation in post-catastrophe period: Scientific Reports // Journal of the University of Applied Sciences Mittweida. - 2004. - P. 17 - 20.
2. Орлов О.О., Янчук В.М., Ковальчук А.М. та ін. Використання прогнозного математичного моделювання для оцінки доз внутрішнього опромінення населення від харчових продуктів лісу // Матеріали міжнар. конф. "Антропогенно-змінене середовище України: ризики для здоров'я населення та екологічних систем". Київ, 23 - 25 березня, 2003 р. - Спец. вип. журн. "Екологічний вісник". - С. 119 - 141.
3. Орлов О.О., Ковальчук А.М., Левицький В.Г., Янчук В.М. Автоматизація моделювання міграції ^{137}Cs у хвойних лісах українського Полісся // Матеріали III з'їзду з радіаційних досліджень (радіобіологія і радіоекологія). Київ, 21 - 25 травня 2003. - К., 2003. - С. 235.
4. Ковальчук А.М., Левицький В.Г., Самолюк І.І., Янчук В.М. Автоматизація формування математичних моделей міграції радіонуклідів в лісових екосистемах // Вісник ЖІТІ. - 2002. - Спец. вип. ІКТ 2002. - С. 112 - 118.
5. Kovalchuk Andriy, Levitsky Vyacheslav, Orlov Oleksandr et al. DRUADAN - the modeling software for assessment the contamination of boreal forest ecosystems by ^{137}Cs : Scientific Reports // Journal of the University of Applied Sciences Mittweida - 2004. - P. 30 - 33.
6. Ковальчук А.М., Левицький В.Г., Самолюк І.І., Янчук В.М. Розробка програмного забезпечення для оцінки забруднення ^{137}Cs лісових екосистем // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. - 2004. - № 4(31). - С. 158 - 164.

7. *Shaw G., Venter F. A., Avila R., et al.* Modelling the Migration and Accumulation of Radionuclides in Forest Ecosystems, IAEA. Report of the Forest Working Group of BIOMASS Theme 3, August 2002. - IAEA-BIOMASS-1. - 127 p.
8. *Yanchuk V., Kolodnytsky M., Kovalchuk A., et al.* Methods and tools of mathematical modeling of radionuclides migration in natural ecosystems: Vol 1, 2. - Zhytomyr: ZIET, 2002.
9. *Shell W.R., Linkov I., Belenkaja E.* Radiation dose from Chernobyl forests: Assessment using FORESTPATH model // Proc. of the 1-st international conference (Minsk, Belarus, 18 - 22 March, 1996). - Luxembourg, 1996. - P. 217 - 220.
10. *Slavik O., Fulajtar E., Müller H., Pröhl G.* Model for food chain transfer and dose assessment in areas of the Slovak Republic // Radiation and Environmental Biophysics. - 2001. - Vol. 40, issue 1. - P. 59 - 67.
11. *Power M.* The predictive validation of ecological and environmental models // Ecol. Model. - 1993. - Vol. 68. - P. 33 - 50.
12. *Edward J. Rykiel, Jr.* Testing ecological models: the meaning of validation // Ecol. Model. - 1996. - Vol. 90. - P. 229 - 244.
13. *Janssen P.H.M., Heuberger P.S.C.* Calibration of process-oriented models // Ecol. Model. - 1995. - Vol. 83. - P. 55 - 66.
14. *Орлов А.А., Калиш А.Б.* Оценка биологической составляющей эффективного экологического периода полураспада мохового покрова от ^{137}Cs // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2001. - № 3 (5). - С. 162 - 170.
15. *Орлов О.О., Ірклієнко С.П., Коткова Т.М., Долгілевич М.Й.* Вплив агрохімічних властивостей ґрунту на мобільність ^{137}Cs у ландшафті "ґрунт - чорниця" // Вісник аграрної науки. - 2001. - № 5. - С. 60 - 66.

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ МИГРАЦИИ ^{137}Cs В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ УКРАИНСКОГО ПОЛЕСЬЯ

А. М. Ковальчук, В. Г. Левицкий, И. И. Самолюк, В. Н. Янчук, А. А. Орлов

Представлены математическая модель миграции ^{137}Cs в лесной экосистеме B_3 типа и результаты исследования адекватности построенной модели. Рассмотрен процесс создания, параметризации, численного анализа модели и критерии, по которым был проведен анализ адекватности модели. Описаны основные положения автоматизированной процедуры исследования адекватности построенной модели, которая дает возможность оценить пригодность модели к использованию в области лесопользования.

THE INVESTIGATION OF THE ADEQUATENESS OF THE MATHEMATICAL MODEL OF ^{137}Cs MIGRATION IN FOREST ECOSYSTEMS OF UKRAINIAN POLISSYA

A. M. Kovalchuk, V. G. Levitsky, I. I. Samolyuk, V. M. Yanchuk, A. A. Orlov

The mathematical model of ^{137}Cs migration in forest ecosystem of B_3 type is given. The results of the model adequacy analysis are described. The process of parameterization, numerical analysis and criteria is taking into account, while analyzing the model adequacy has been considered. The main aspects of the automation procedure of the mathematical model adequacy investigation are explained. It gives the possibility of the model application in forestry.

Надійшла до редакції 16.03.05,
після доопрацювання – 14.06.05.