



У разі перевищення цього параметра може пригнічуватися та/або зменшуватися ріст біоти.

Фактор радіємності визначається як частка радіонуклідного забруднення, що здатна накопичуватися в тій чи іншій частині/компоненті екосистеми, без порушення її структури.

Експериментальними та теоретичними дослідженнями встановлено, що чим вищий параметр радіємності біоти в екосистемі, тим вищий рівень благополуччя та надійності біоти в ній.

Результати досліджень рослинних екосистем свідчать, що здатність біоти накопичувати та утримувати радіонуклідний трасер, аналог мінерального елемента живлення рослин калію, показує стійкість та надійність біоти цієї екосистеми.

Зниження показника радіємності біоти в рослинній екосистемі під впливом хімічних полутантів та у разі гамма-опромінення рослин відображає зниження благополуччя біоти та надійність екосистеми.

Параметр радіємності може виступати як міра надійності кожного елемента екосистеми, а також екосистеми в цілому. Чим вищий фактор радіємності та/або ймовірність утримування трасера в кожному елементі екосистеми, тим вища надійність елементів екосистеми. Використовуючи ці параметри надійності елементів екосистеми, знаючи структуру конкретної екосистеми, можна адекватно оцінювати надійність цієї екосистеми через її здатність забезпечувати розподіл та перерозподіл трасера, що показує її стійкий стан [3].

У разі використання параметрів швидкостей обміну радіонуклідами між камерами ( $\alpha_{ij}$ ,  $\alpha_{ji}$ ) можна оцінювати надійність компонента екосистеми як елемента системи транспорту радіонуклідів камерами за формулою

$$P_i = \frac{\sum \alpha_{ij}}{\sum \alpha_{ij} + \sum \alpha_{ji}}, \quad (1)$$

де  $P_i$  – надійність  $i$ -го елемента екосистеми;

$\sum \alpha_{ji}$  – сума швидкостей переходу радіонуклідів у спряжені камери;

$\sum \alpha_{ij}$  – сума швидкостей переходу радіонуклідів у камеру  $i$  зі спряжених камер, із яких радіонукліди надходять в камеру.

Надійність камери оцінюємо через  $P_i$ , надійність  $i$ -го елемента екосистеми, за його здатність утримувати радіонукліди, що потрапили в екосистему. Знаючи структуру забезпечення надійності транспорту радіонуклідів від компонентів екосистеми до людини, на основі теорії надійності можна оцінювати надійність усієї системи транспорту радіонуклідів до людини.

### Моделювання надійності агроекосистеми

Для оцінювання надійності транспорту радіонуклідів в агроекосистемі с. Галузія застосуємо розроблений підхід [1; 2].

Основні блоки транспорту радіонуклідів в агроекосистемі, що досліджується, наведено в роботі [1].

Головними дозоутворюючими компонентами агроекосистеми, є чотири пасовища, що функціонують як паралельна система.

Згідно з теорією надійності [3] загальну надійність екосистеми як системи транспорту радіонуклідів від пасовища до людини можна подати у вигляді суми параметрів надійності блоків-пасовищ, які складають екосистему.

Камерну модель цієї агроекосистеми доцільно подати у вигляді структури, що наведено в роботі [1].

Транспортний потік радіонуклідів від кожного пасовища до популяції населення утворює строго послідовну систему: ґрунт – трава – корова – молоко – м'ясо – люди.

Надійність такої послідовної екосистеми можна подати у вигляді добутку параметрів надійності радіонуклідів-блоків, що складають транспортний потік.

Оцінювання надійності кожного з блоків розрахуємо за формулою (1).

На основі досліджень, за результатами спостережень та розрахунків отримано оцінки швидкостей переходу між камерами агроєкосистеми, що досліджується (табл. 1).

Надійність компонентів екосистеми оцінено формулою (1). Знаючи послідовний характер зв'язку окремих компонентів агроєкосистеми з популяцією населення, проведемо оцінювання надійності агроєкосистеми як системи транспорту радіонуклідів від пасовищ до населення.

Результати розрахунків надійності агроєкосистеми без участі можливих контрзаходів, за середніх швидкостей переходу радіонуклідів між камерами моделі агроєкосистеми с. Галузія наведено в табл. 2.

Коефіцієнт дезактивації  $K_d$  показує, в скільки разів буде знижена доза після застосування певного контрзаходу.

Цей підхід можна застосувати для оцінювання ефективності різноманітних контрзаходів.

Таблиця 1

Параметри швидкостей переходу для різних складових агроєкосистеми с. Галузія

Параметр швидкості переходу	Мінімальне значення	Середнє значення	Максимальне значення	Опис переходу
Пасовище 1				
a <sub>12</sub>	0,02	0,06	0,1	Ґрунт – рослини
a <sub>23</sub>	0,18	0,38	0,58	Трава – корова
a <sub>34</sub>	0,08	0,13	0,18	Корова – молоко
a <sub>35</sub>	0,32	0,52	0,72	Корова – м'ясо
a <sub>36</sub>	0,6	0,36	0,1	Корова – відходи
a <sub>47</sub>	0,2	0,22	0,36	Молоко – діти
a <sub>48</sub>	0,1	0,15	0,2	Молоко – пенсіонери
a <sub>49</sub>	0,3	0,47	0,47	Молоко – робітники
a <sub>410</sub>	0,5	0,1	0,0	Молоко – вивіз
a <sub>57</sub>	0,00	0,005	0,009	М'ясо – діти
a <sub>58</sub>	0,001	0,004	0,007	М'ясо – пенсіонери
a <sub>59</sub>	0,008	0,013	0,018	М'ясо – робітники
a <sub>510</sub>	0,58	0,978	0,98	М'ясо – вивіз
Пасовище 2				
b <sub>12</sub>	0,02	0,05	0,08	Ґрунт – рослини
b <sub>23</sub>	0,2	0,3	0,4	Трава – корова
b <sub>34</sub>	0,04	0,12	0,2	Корова – молоко
b <sub>35</sub>	0,16	0,48	0,8	Корова – м'ясо
b <sub>36</sub>	0,8	0,4	0,2	Корова – відходи
b <sub>47</sub>	0,14	0,24	0,34	Молоко – діти
b <sub>48</sub>	0,04	0,12	0,2	Молоко – пенсіонери
b <sub>49</sub>	0,24	0,37	0,5	Молоко – робітники
b <sub>410</sub>	0,54	0,27	0,0	Молоко – вивіз
b <sub>57</sub>	0,001	0,003	0,005	М'ясо – діти
b <sub>58</sub>	0,00	0,004	0,008	М'ясо – пенсіонери
b <sub>59</sub>	0,03	0,06	0,09	М'ясо – робітники
b <sub>510</sub>	1,0	0,98	0,5	М'ясо – вивіз

Закінчення табл. 1

Параметр швидкості переходу	Мінімальне значення	Середнє значення	Максимальне значення	Опис переходу
Пасовище 3				
c <sub>12</sub>	0,12	0,2	0,28	Ґрунт – рослини
c <sub>23</sub>	0,1	0,15	0,2	Трава – корова
c <sub>34</sub>	0,01	0,02	0,05	Корова – молоко
c <sub>35</sub>	0,02	0,08	0,3	Корова – м'ясо
c <sub>36</sub>	0,97	0,9	0,65	Корова – відходи
c <sub>47</sub>	0,04	0,14	0,24	Молоко – діти
c <sub>48</sub>	0,04	0,08	0,12	Молоко – пенсіонери
c <sub>49</sub>	0,11	0,23	0,35	Молоко – робітники
c <sub>410</sub>	0,4	0,52	0,64	Молоко – вивіз
c <sub>57</sub>	0,1	0,16	0,22	М'ясо – діти
c <sub>58</sub>	0,08	0,13	0,18	М'ясо – пенсіонери
c <sub>59</sub>	0,2	0,4	0,6	М'ясо – робітники
c <sub>510</sub>	0,57	0,31	0,06	М'ясо – вивіз
Пасовище 4				
d <sub>12</sub>	0,04	0,1	0,16	Ґрунт – рослини
d <sub>23</sub>	0,1	0,23	0,36	Трава – корова
d <sub>34</sub>	0,06	0,11	0,16	Корова – молоко
d <sub>35</sub>	0,24	0,44	0,64	Корова – м'ясо
d <sub>36</sub>	0,7	0,45	0,2	Корова – відходи
d <sub>47</sub>	0,15	0,25	0,35	Молоко – діти
d <sub>48</sub>	0,07	0,12	0,17	Молоко – пенсіонери
d <sub>49</sub>	0,1	0,25	0,4	Молоко – робітники
d <sub>410</sub>	0,58	0,38	0,18	Молоко – вивіз
d <sub>57</sub>	0,02	0,06	0,1	М'ясо – діти
d <sub>58</sub>	0,01	0,04	0,07	М'ясо – пенсіонери
d <sub>59</sub>	0,02	0,12	0,22	М'ясо – робітники
d <sub>510</sub>	0,95	0,78	0,61	М'ясо – вивіз
Ліс				
l <sub>12</sub>	0,00007	0,00034	0,0006	Ґрунт – деревина
l <sub>13</sub>	0,003	0,009	0,015	Ґрунт – ягоди
l <sub>14</sub>	0,01	0,02	0,03	Ґрунт – гриби
l <sub>25</sub>	0,02	0,07	0,12	Ягоди – діти
l <sub>26</sub>	0,01	0,05	0,09	Гриби – діти
l <sub>27</sub>	0,1	0,25	0,4	Деревина – пенсіонери
l <sub>28</sub>	0,6	0,75	0,9	Деревина – робітники
l <sub>35</sub>	0,1	0,2	0,3	Ягоди – діти
l <sub>36</sub>	0,7	0,8	0,9	Ягоди – пенсіонери
l <sub>46</sub>	0,05	0,1	0,15	Гриби – пенсіонери
l <sub>47</sub>	0,01	0,015	0,02	Гриби – робітники
Город				
g <sub>12</sub>	0,005	0,01	0,015	Продукція – діти
g <sub>51</sub>	0,1	0,2	0,3	Продукція – пенсіонери
g <sub>23</sub>	0,4	0,6	0,8	Продукція – робітники
g <sub>24</sub>	0,2	0,4	0,6	Продукція – вивіз

Таблиця 2

**Оцінка надійності агроєкосистеми та ефективності застосування контрзаходів  
в агроєкосистемі шляхом оцінки надійності доставки радіонуклідів Cs<sup>137</sup>  
від чотирьох основних пасовищ**

Контрзахід на пасовищі	К <sub>д</sub> (1)	Пасовище	Запас радіонуклідів Кі	Надійність транспорту радіонуклідів			Перехід радіонуклідів Кі	Сумарний перехід радіонуклідів Кі на пасовищах, колективна доза та К <sub>д</sub> (2)	К <sub>д</sub> (3) за надійності
				по молоку	по м'ясу	загального			
Не застосовувався	1	1	0,0056	0,03	0,022	0,052	0,0008	0,0022 1,6 люд.Зв К <sub>д</sub> = 1	1
		2	0,0169	0,025	0,019	0,044	0,0007		
		3	0,0003	0,029	0,027	0,056	0,0004		
		4	0,0011	0,041	0,033	0,074	0,0008		
Добрива	2	1	0,0056	0,015	0,011	0,026	0,00015	0,013 0,96 люд.Зв К <sub>д</sub> = 1,7	$\frac{0,0022}{0,0013} = 1,74$
		2	0,0169	0,013	0,009	0,022	0,00037		
		3	0,0003	0,021	0,020	0,041	0,00026		
		4	0,0011	0,025	0,019	0,044	0,00048		
Сіянка	3	1	0,0056	0,0106	0,0079	0,0185	0,0001	0,008 0,6 люд.Зв К <sub>д</sub> = 2,7	2,75
		2	0,0169	0,008	0,006	0,014	0,0002		
		3	0,0003	0,017	0,016	0,033	0,0002		
		4	0,0011	0,017	0,013	0,030	0,0003		
Збір дернини (3–5 см)	10	1	0,0056	0,0033	0,0024	0,0057	0,00003	0,000032 0,024 люд.Зв К <sub>д</sub> = 66,7	69
		2	0,0169	0,0029	0,0022	0,0051	0,00009		
		3	0,0003	0,0069	0,0065	0,0134	0,00008		
		4	0,0011	0,0061	0,0047	0,0108	0,000012		
Феррацинові болуси	4	1	0,0056	0,014	0,013	0,027	0,0002	0,0012 0,88 люд.Зв К <sub>д</sub> = 1,8	1,8
		2	0,0169	0,013	0,012	0,025	0,0004		
		3	0,0003	0,0104	0,0102	0,0206	0,0001		
		4	0,0011	0,023	0,022	0,045	0,0005		
Феррацинові фільтри (молоко)	5	1	0,0056	0,012	0,02	0,032	0,00012	0,00065 0,5 люд.Зв К <sub>д</sub> = 3,2	3,4
		2	0,0169	0,011	0,0174	0,028	0,00047		
		3	0,0003	0,010	0,024	0,034	0,00001		
		4	0,0011	0,0126	0,0293	0,045	0,00005		
Добрива + збір дернини + болуси	80	1	0,00056	0,015	0,01	0,025	0,000014	0,000024 0,016 люд.Зв К <sub>д</sub> = 100	91,7
		2	0,00169	0,0025	0,0017	0,0042	0,0000071		
		3	0,00003	0,01	0,009	0,019	0,00000057		
		4	0,00011	0,014	0,009	0,023	0,0000025		

**Примітка.** К<sub>д</sub> (1) – за літературними даними; К<sub>д</sub> (2) – за колективною дозою; К<sub>д</sub> (3) – за розрахунком надійності після застосування контрзаходу.

### Аналіз отриманих результатів

Дані розрахунків надійності транспорту радіонуклідів чотирма пасовищами спочатку при формуванні дози за рахунок споживання молока, пізніше – за рахунок споживання яловичини наведено у табл. 2.

Величину переходу радіонуклідів  $Cs^{137}$  до всіх груп населення та коефіцієнта дозової ціни  $Cs^{137}$  в  $2 \cdot 10^{-8}$  Зв/Бк можна використовувати для розрахунку колективної дози [4; 5; 6].

Отримана оцінка колективної дози становить близько 1,6 люд.Зв/р.

Оцінка середньої величини індивідуальної дози опромінення людей становить близько 1,1 мЗв/р. (за норми – 1 мЗв/р.).

При цьому добавки до колективної дози за рахунок використання продукції лісу становить 0,34 люд.Зв, а продукції городу – 0,2 люд.Зв/р. Сумарна колективна доза становить близько 2,14 люд.Зв/р, а індивідуальна доза опромінення для кожного мешканця села становить 1,4 мЗв/р.

Для цієї агроєкосистеми можна застосувати різноманітні контрзаходи. Розрахункові дані щодо можливих контрзаходів для зниження колективних доз населення с. Галузія наведено у табл. 2. Із можливих контрзаходів [4; 5; 6] запропонуємо лише деякі.

Після аварії на Чорнобильській АЕС найчастіше застосовують контрзахід, який передбачає внесення підвищених норм добрив. При цьому коефіцієнт дезактивації  $K_d = 2$ . Це означає, що у процесі вирощування продукції рослинництва на підвищених нормах добрив доза, що очікується, може знизитись у два рази. У табл. 2 наведено дані розрахунку значень  $K_d$  за величиною зниження колективної дози у разі використання цього контрзаходу.

Надходження радіонуклідів в продукти харчування людей знижується в 1,74 рази. Тобто  $K_d$  за величиною економії колективної дози для цілого села за рахунок використання чотирьох пасовищ становить 1,74.

Після аварії на Чорнобильській АЕС використовують такий контрзахід, як сіянка. Дике пасовище засівають культурними травами. На цих територіях спостерігаються висоці врожаї з нижчими значеннями коефіцієнтів накопичення  $K_H$  в системі ґрунт–трава. У цьому випадку значення  $K_d = 3$ . Системними розрахунками методами теорії надійності по всіх пасовищах  $K_d = 2,75$ . Це прийнятне значення коефіцієнта дезактивації  $K_d$ .

Ефективним методом дезактивації може також бути і видалення з пасовища верхнього шару дернини за допомогою спеціальної машини TURF CUTTER [6].

Застосування цього контрзаходу в 30-кілометровій зоні на території Білорусі та України призвело до зниження забруднення молока і м'яса у корів у 10 разів. За параметрами надійності після зняття дернини коефіцієнт дезактивації  $K_d$  може сягати 69. Запропонований контрзахід трудомісткий та достатньо дорогий.

У Рівненській області як контрзаходи апробовані такі заходи, як введення в шлунок корови ферацинових болюсів ( $K_d = 4$ ), а також сепарацію отриманого від корів молока через спеціальні фільтри просякненні ферацином ( $K_d = 5$ ).

Молоко є основним дозоутворюючим продуктом харчування, особливо у мешканців сільської місцевості Ферацин володіє вибірковою здатністю зв'язувати цезій і знижувати його вміст у молоці.

Детальніший розрахунок за моделлю надійності дозволив провести всебічне оцінювання ефективності цих контрзаходів. За результатами таких системних розрахунків коефіцієнт дезактивації  $K_d$  для ферацинових болюсів дорівнює 1,8, а ферацинових фільтрів – 2. Локальна ефективність контрзаходу ще не гарантує загальної системної ефективності для всієї агроєкосистеми

Передбачалося, що комбінація контрзаходів буде ефективнішою, ніж будь-який контрзахід, що окремо застосовується.

Розрахунок використання декількох контрзаходів (добрива, зняття дернини та полюси) показав, що колективна доза для села знизилася в 92 рази.

В умовах відносно малих рівнів радіонуклідного забруднення використання комбінованої системи контрзаходів недоцільно.

Подібні комбінації можуть бути корисними для інтенсивно забруднених радіонуклідами регіонів України та Білорусі.

### Висновки

1. Агроєкосистема є джерелом транспорту радіонуклідів з оточуючого середовища до людини.

Чим більше фактор радіємності цієї агроєкосистеми, тим вона надійніша.

2. Знаючи швидкості міграції, розподілу та перерозподілу радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  у компонентах агроєкосистеми, а також величину переходу цезію до всіх груп населення, можна розрахувати величину надійності цієї агроєкосистеми та оцінити внесок різних складових агроєкосистеми у формування дозових навантажень на населення.

3. Залежно від кількості радіонуклідів, що випали на територію, можна застосовувати різноманітні контрзаходи, ефективність яких залежить від багатьох факторів, наприклад, типу ґрунтів, вологості, кількості опадів та ін.

4. Запропонований метод надійності можна застосувати для оцінювання рівня забруднення та переходу інших полютантів в екосистемах інших типів.

### Література

1. *Моделювання радіоекологічних процесів методом камерних моделей на прикладі села у Волинській області* / І.В. Матвєєва, В.Р. Заїтов, Ю.О. Кутлахмедов та ін. // Вісник НАУ. – 2005. – № 3. – С. 173–176.

2. *Порівняння радіоекологічних процесів на прикладі сіл, забруднених Cs-137 та Sr-90, оцінених за методом камерних моделей* / І.В. Матвєєва, Ю.О. Кутлахмедов, В.М. Ісаєнко та ін. // Ядерна фізика та енергетика. – К.: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2006. – № 2(18) – С. 93–98.

3. *Theory of Reliability in Radiation Ecology* / Yuriy A. Kutlakhmedov, Iryna V. Matveeva, Anastasiya G. Salivon, Victor V. Rodyna // *Proceedings of International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management*. – Israel, 2010. – 275 с.

4. *Медиико-биологические последствия Чернобыльской катастрофы: отдалённые радиоэкологические и радиобиологические проблемы и анализ эффективности контрмер по защите био- и экосистем от последствий Чернобыльской катастрофы: в 2 ч.* / под ред. Ю.А. Кутлахмедова, В.П. Зотова – К.: МЕДЭКОЛ, 2000. – 293 с.

5. *Методология систематизации и адаптации моделирующей прогнозно-аналитической системы для создания мер по снижению негативных эффектов для экосистем и населения* / под общ. ред. В.П. Зотова и Ю.А. Кутлахмедова. – К.: МЕДЭКОЛ-МНИЦ Био-Экосистем, 2003. – 216 с.

6. *Проблемы и перспективы фитодеконтаминации и фитомикробной ремедиации почв, загрязненных радионуклидами* / Ю.А. Кутлахмедов, Н.В. Зезина, А.Н. Михеев и др. // *Экотехнология и ресурсосбережение*. – 2004. – № 1. – С. 49–50.

Стаття надійшла до редакції 03.02.2011.