

## РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ ЛОКАЛЬНОЙ АГРОЭКОСИСТЕМЫ

Отримані нами результати з оцінки розподілу та перерозподілу радіонуклідів в агроєкосистемі (на прикладі с. Галузія, Волинська область) показали помітну динаміку формування дозових навантажень на людей. У роботі радіоємність визначається як здатність компонентів і екосистеми в цілому утримувати радіонукліди й тим самим знижувати їх надходження до жителів села. Збір натурних даних у селі проводився впродовж 7 років експедиційних досліджень. Дані цих експедицій покладені в основу розрахунків. Реальні дані з Галузії показали, що рівні забруднення молока, основного дозоутворювального компоненту з цезію-137, сягали 800-1000 Бк/л, що і призводило до перевищення доз до 3-5 мЗв/рік для групи жителів цього села (дані ЛВЛ вимірів). І таких сіл на Волині, Рівненщині достатньо багато. Тому актуальність оцінок надійності транспорту радіонуклідів в агроєкосистемах до людини, розрахована нами через введені поканики коефіцієнтів радіоємності, достатньо обґрунтована.

**Ключові слова:** транспорт радіонуклідів, надійність агроєкосистеми, радіоємність агроєкосистеми.

Полученные нами результаты по оценке распределения и перераспределения радионуклидов в агроэкоecosистеме (на примере с. Галузия, Волынская область) показали заметную динамику формирования дозовых нагрузок на людей. В данной работе радиоемкость определяется как способность компонентов и экосистемы в целом, удерживать радионуклиды и тем самым снижать их поступление к жителям села. Сбор натурных данных по данному селу проводился в течении 7 лет экспедиционных исследований. Данные этих экспедиций положены в основу наших расчетов. Реальные данные по Галузии показали, что уровни загрязнения молока, основного дозообразующего компонента за по цезию-137, достигали 800-1000 Бк/л, что и приводило к превышению доз до 3-5 мЗв/год для ряда жителей этого села (данные СИЧ измерений). И таких сел на Волини, Ровенщине достаточно много. Поэтому актуальность оценок надежности транспорта радионуклидов в агроэкоecosистемах к человеку, рассчитываемых нами через вводимые показатели коэффициентов радиоемкости, достаточно обоснована.

**Ключевые слова:** транспорт радионуклидов, надежность агроэкоecosистемы, радиоемкость агроэкоecosистемы.

Agroecosystem is an important source of radionuclides transport. Larger coefficient of radiocapacity for investigated agroecosystem, higher its reliability in the sense of minimization of radionuclides supply to human being. On the basis of migration velocity, distribution and redistribution of the radionuclide – tracer –  $^{137}\text{Cs}$  in agroecosystem's components it is possible to calculate the parameter of agroecosystem reliability and estimate introduction of different agroecosystem's components into doze formation for population. Depending on quantity of radionuclides felt on the territory it is possible to apply different defensive countermeasures which efficiency is determined by a series of factors.

Application of models and reliability theory for investigation of ecological processes in different types of ecosystems is useful because allows to estimate main characteristics and main properties of ecosystems by observing behavior of tracer – radionuclide  $^{137}\text{Cs}$ .

**Key words:** radionuclides transport, reliability of agroecosystem, radiocapacity of agroecosystem.

**Постановка проблеми.** Агроєкосистема являється важним джерелом транспорту радіонуклідів. Чим більше коефіцієнт радіоємності (визначається в роботі, як ймовірність утримання радіонуклідів в кожному компоненті і в екосистемі в цілому даної

досліджуваної агроєкосистеми), тим вище її надійність в плані мінімізації поступлення радіонуклідів к людині.

Основою є швидкості міграції, розподілу і перерозподілу радіонукліда-трассера –  $^{137}\text{Cs}$  в

компонентах агроэкосистеми, можна розрахувати параметр надійності досліджуваної агроекосистеми та оцінити вклад різних компонентів агроекосистеми в формування дози для населення. В залежності від кількості радіонуклідів, випавших на територію, можна застосовувати різні захисні контрмери, ефективність яких залежить від ряду факторів.

Застосування моделей та теорія надійності для дослідження екологічних процесів в різних типах екосистем є корисною, так як дозволяє оцінити основні характеристики та основні властивості екосистем шляхом спостереження поведінки трасера-радіонукліда  $^{137}\text{Cs}$ .

Отже для оцінки та прогнозу таких процесів нами запропоновано використовувати моделі та теорію надійності. Для цього агроекосистема розглядається як система транспорту радіонуклідів від ґрунту до людини. Нами запропоновано кількісні методи оцінки надійності окремих елементів агроекосистеми та агроекосистеми в цілому. Цей метод та моделі дозволили по-новому поглянути на проблему екологічної безпеки людини та розглянути проблеми застосування захисних контрмер.

Дослідження радіоекологічних процесів в агроекосистемах особливо важливі для оцінки та прогнозу їх екологічної безпеки для населення, особливо при формуванні дозових навантажень. Крім раніше використаного нами методу камерних моделей, вважаємо необхідним розробити підходи до більш загальної оцінки надійності та стійкості агроекосистеми. Розмова йде про аналіз агроекосистеми, як системи транспорту радіонуклідів від ґрунту до людини, засобах та методах модифікації даних процесів.

**Методика досліджень.** Ця робота базується на експедиційних та літературних даних про потоки та характеристики міграції радіонуклідів в екосистемі с. Галузія. По 7-річним експедиційним даним розраховані швидкості переносу радіонуклідів між камерами блок-схеми та до людей. Швидкість тут визначається як частка запасу радіонуклідів переносима з камери в камеру за один рік. Використовуваний в роботі метод математичного моделювання та метод камерних моделей базується на цих початкових даних.

**Моделювання та аналіз отриманих результатів.** Розроблені нами моделі та теорія радіоефективності екосистем дозволяють ввести адекватний параметр – фактор радіоефективності – для визначення стану біоти екосистеми [1; 2; 3].

Радіоефективність – ліміт радіонуклідного забруднення біоти екосистеми, при якому не відслідковуються зміни її функціонування. При перевищенні даного ліміту можна спостерігати угнетення і/або зниження росту біоти. Фактор радіоефективності визначається як частка радіонуклідного забруднення, спроможного накопичуватися в тій чи іншій частині (компоненті) екосистеми, без порушення її структури.

Експериментальними та теоретичними дослідженнями встановлено, що чим вище параметр радіоефективності біоти, тим вище рівень благополуччя

та надійності біоти в екосистемі. В частині, в дослідженнях з рослинними екосистемами показано, що здатність біоти накопичувати та утримувати радіонуклідний трасер  $^{137}\text{Cs}$ , аналог мінерального елемента харчування рослин калію, відображає стійкість та надійність біоти даної екосистеми [1; 2; 3; 4]. Встановлено, що зниження показателя радіоефективності біоти в рослинній екосистемі при гамма-облученні та при впливі хімічних поллютантів рослин чітко відображає зниження благополуччя біоти та надійності екосистеми.

Виходячи з проведених теоретичних досліджень, можна вважати, що, використовуючи параметри швидкостей обміну радіонуклідів між камерами ( $\alpha_{ij}$  та  $\alpha_{ji}$ ) можна оцінювати надійність компонента екосистеми, як елемента системи транспорту радіонуклідів по камерам, використовуючи формулу:

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

де  $P_i$  – надійність  $i$ -го елемента екосистеми, як утримувача трасера (радіонукліда),  $\alpha_{ij}$  – сума швидкостей переходу радіонуклідів в сопряженні з нею камери,  $\alpha_{ji}$  – сума швидкостей переходу радіонуклідів в камеру  $i$  з сопряжених з нею камер, від яких радіонукліди поступають в цю камеру, надійність цього процесу ми оцінюємо через  $P_i$  [7; 8].

Таким чином, виходячи з задачі даної роботи, оцінюємо надійність  $i$ -го елемента екосистеми по його здатності утримувати потрапляючі в нього радіонукліди. Далі, знаючи надійнісну схему, структуру забезпечення надійності транспорту радіонуклідів від компонентів екосистеми до людини, на основі моделі надійності можна оцінювати надійність всієї системи транспорту радіонуклідів від екосистеми до населення [8].

**Моделювання агроекосистеми методами теорії надійності. Отримані результати та аналіз.** Основні блоки транспорту радіонуклідів в досліджуваній агроекосистемі с. Галузія [5; 6] представлені на рис. 1.

Нами встановлено, що основними дозобутворюючими компонентами даної агроекосистеми є 4 пастбища. Ці пастбища функціонують, в надійному сенсі, як паралельна система. Згідно теорії надійності [2] загальна надійність даної агроекосистеми, як системи транспорту радіонуклідів від пастбищ до людей, може бути представлена в вигляді сумми параметрів надійності складових блоків-пастбищ.

Камерну модель даної агроекосистеми ми описали в вигляді блок-схеми. Встановлено, що транспортний потік радіонуклідів від кожного пастбища до населення утворює чітку послідовну систему: ґрунт  $\rightarrow$  трава  $\rightarrow$  корова  $\rightarrow$  молоко  $\rightarrow$  м'ясо  $\rightarrow$  люди. На основі експедиційних досліджень, по результатам спостережень та розрахунків, нами отримані оцінки швидкостей переходу між камерами досліджуваної агроекосистеми. В таблиці 1 показані дані розрахунку параметрів переходу радіонуклідів між камерами агроекосистеми села Галузія на прикладі першого пастбища.

Таблица 1

## Параметры скоростей перехода радионуклидов между камерами агроэкосистемы с. Галузия

Параметр	Минимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение	Описание перехода
Пастбище 1				
a <sub>12</sub>	0,02	0,06	0,1	почва – растения на пастбище
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 – мясо
a <sub>36</sub>	0,6	0,36	0,1	корова – отходы
a <sub>47</sub>	0,2	0,22	0,36	молоко – дети
a <sub>48</sub>	0,1	0,15	0,2	молоко – пенсионеры
a <sub>49</sub>	0,3	0,47	0,47	молоко – рабочие
a <sub>410</sub>	0,5	0,1	0,0	молоко – вывоз
a <sub>57</sub>	0,00	0,005	0,009	мясо – дети
a <sub>58</sub>	0,001	0,004	0,007	мясо – пенсионеры
a <sub>59</sub>	0,008	0,013	0,018	мясо – рабочие
a <sub>510</sub>	0,58	0,978	0,98	мясо – вывоз
a <sub>24</sub>	0,2	0,4	0,6	продукция огорода – вывоз

Аналогичные расчеты проведены и для остальных пастбищ, а также для огорода и леса.

Данные таблицы 1 позволяют провести оценки надежности компонентов экосистемы по предложенной формуле (1) и, зная последовательный характер связи отдельных компонентов агроэкосистемы с популяцией населения, провести оценку надежности данной агроэкосистемы как системы транспорта радионуклидов от пастбищ к населению.

Получая сельскохозяйственную продукцию с загрязненных территорий, пищевыми цепями радионуклиды попадают в организм человека, формируя, таким образом, дозовую нагрузку. Поэтому для снижения отрицательного влияния радионуклидов на популяцию людей на загрязненных территориях возникает необходимость применения защитных контрмер.

Нами проведена оценка надежности исследуемой агроэкосистемы (на примере с. Галузия) без применения контрмер и оценка эффективности использования разных контрмер путем оценки поступления радионуклидов <sup>137</sup>Cs от пастбищ при средних скоростях перехода радионуклидов между камерами модели.

В агроэкосистемах целесообразно применять различные контрмеры. В таблице 2 представлены расчетные данные по ряду возможных контрмер для снижения коллективных доз для населения с. Галузия. Из возможных контрмер [4; 5; 6] мы выбрали только некоторые. По имеющимся в с. Галузия и в литературе данным рассчитаны данные о запасе радионуклидов на каждом из пастбищ. Затем по натурным данным об уровнях загрязнения молока, мяса, овощей и продуктов леса (грибы, ягоды), оцениваем вероятности удержания радионуклидов каждой из камер блок-схемы, а по ним (по формуле 1) рассчитываем надежность транспорта радионуклидов к населению. Это позволяет оценить переход (К<sub>и</sub>) активности к людям. Зная объем перехода радионуклидов к людям, через дозовый коэффициент, оценить ожидаемую коллективную дозу для населения (чел. Зв). Для сравнения вводим К<sub>д</sub> (1) – известный коэффициент дезактивации после применения контрмер. Для ситуации без применения контрмер

полагаем К<sub>д</sub> = 1. В качестве контрмер используем широко известные контрмеры. Внесение повышенных вдвое норма удобрений, которые позволяют снизить индивидуальные дозы облучения до 2 раз. При этом анализируя изменения по всем пастбищам, на основе анализа надежности общего транспорта радионуклидов к людям, показано, что в целом коллективная доза может быть снижена в 1,74 раза. Использование сеянки (так в Галузии называют коренное улучшение пастбища), за счет высева культурных трав с относительно более низкими коэффициентами накопления (чем для диких трав). Известно из литературы и из натурных данных, что при использовании такой сеянки можно до 3 раз снизить поступление радионуклидов в кормовые травы (К<sub>д</sub> (1) = 3). Если же использовать такое коренное улучшение всех пастбищ в селе, то можно ожидать снижения коллективной дозы до 2,75 раза (К<sub>д</sub> (2) = 2,75). Применение феррациновых болосов и феррациновых фильтров было реализовано в с. Галузии на избранной группе коров, что реально позволяло снизить загрязнение молока до 4-5 раз (К<sub>д</sub> (1). Если бы эта контрмера была применена для всех коров села, то данная контрмера могла бы позволить снизить коллективную дозу до 1,8 раз. Удаление верхнего слоя дернины специальной машиной – TURF CUTTER, по данным наших натурных исследований могло до 10 раз снижать уровень загрязнения молока и мяса (К<sub>д</sub> (1) = 10), а К<sub>д</sub> (2) – по коллективной дозе – до 60 раз.

В первом блоке таблицы представлены данные по расчетам надежности транспорта радионуклидов по пастбищам: сначала при ситуации формирования дозы за счет использования молока, а потом – за счет употребления говядины.

По этим данным были рассчитаны величины перехода радионуклидов <sup>137</sup>Cs ко всем группам населения. Эту величину можно использовать для расчета коллективной дозы, используя величины дозового коэффициента для <sup>137</sup>Cs ( $2 \cdot 10^{-8}$  Зв/Бк) [4; 5; 6]. Полученная оценка коллективной дозы составляет около 1,6 чел. Зв в год. При этом оценка средней величины индивидуальной дозы облучения людей составляет около 1,1 мЗв/год (при норме – 1 мЗв/год).

Таблиця 2

**Оценка надежности агроэкосистемы без применения контрмер и оценка эффективности использования разных контрмер путем оценки надежности поступления радионуклидов Cs<sup>137</sup> от основных пастбищ при средних скоростях перехода радионуклидов между камерами модели**

Контрмера	К <sub>д</sub> (1)	№ пастбища	Запас р/н, Ки	Надежность общего транспорта р/н	Переход р/н (Ки)	Суммарный переход р/н (Ки) по пастбищам, коллективная доза и К <sub>д</sub>	К <sub>д</sub> (2) по надежности
Контрмеры не применялись	1	1	0,0056	0,052	0,0008	0,0022 (1,6 чел. Зв) К <sub>д</sub> = 1	1
		2	0,0169	0,044	0,0007		
		3	0,0003	0,056	0,0004		
		4	0,0011	0,074	0,0008		
Удобрения	2	1	0,0056	0,026	0,00015	0,013 (0,96 чел. Зв) К <sub>д</sub> = 1,7	0,0022/ 0,0013 = 1,74
		2	0,0169	0,022	0,00037		
		3	0,0003	0,041	0,00026		
		4	0,0011	0,044	0,00048		
Сеянка	3	1	0,0056	0,0185	0,0001	0,008 (0,6 чел. Зв) К <sub>д</sub> = 2,7	2,75
		2	0,0169	0,014	0,0002		
		3	0,0003	0,033	0,0002		
		4	0,0011	0,030	0,0003		
Уборка дернины (3-5 см)	10	1	0,0056	0,0057	0,00003	0,000032 (0,024 чел. Зв) К <sub>д</sub> = 66,7	69
		2	0,0169	0,0051	0,00009		
		3	0,0003	0,0134	0,00008		
		4	0,0011	0,0108	0,00012		
Феррациновые болосы	4	1	0,0056	0,027	0,0002	0,0012 (0,88 чел. Зв) К <sub>д</sub> = 1,8	1,8
		2	0,0169	0,025	0,0004		
		3	0,0003	0,0206	0,0001		
		4	0,0011	0,045	0,0005		
Феррациновые фильтры (для молока)	5	1	0,0056	0,0497	0,0003	0,0021 (1,6 чел. Зв) К <sub>д</sub> = 1	1,05
		2	0,0169	0,0426	0,0007		
		3	0,0003	0,05	0,0003		
		4	0,0011	0,0709	0,0008		
Огород						0,2 чел. Зв	

При этом оценки добавки к коллективной дозы за счет использования лесной продукции составляют 0,34 чел. Зв/год, а продукции огорода – 0,2 чел. Зв/год. Тогда суммарная коллективная доза составляет около 2,14 чел. Зв/год, а индивидуальная доза облучения для каждого жителя данного села может составить 1,4 мЗв/год.

Контрмера, чаще всего используемая после аварии на Чернобыльской АЭС, – внесение повышенных норм удобрений. При этом коэффициент дезактивации (К<sub>д</sub>) составляет около 2 единиц. Это означает, что при выращивании продукции растениеводства при повышенных нормах удобрений ожидаемая индивидуальная доза может быть снижена в 2 раза.

Расчет показал, что применяя повышенные нормы удобрений, наблюдается снижение поступления радионуклидов в продукты питания людей в 1,74 раза. То есть, получено, что К<sub>д</sub> по величине экономии коллективной дозы для всего села за счет использования 4-х пастбищ составляет 1,74.

После аварии на ЧАЭС также была использована такая контрмера, как «сеянка», когда дикие пастбища засевают культурными травами.

Системные расчеты методами теории надежности (при этом экосистема рассматривается как надежностная, параллельная система из четырех пастбищ) составили по всем пастбищам значения К<sub>д</sub> = 2,75. Это приемлемые значения коэффициента дезактивации.

Эффективным методом дезактивации может быть и удаление на пастбищах верхнего слоя дернины с помощью специальной машины TURF CUTTER.

Применение данной контрмеры в 30-км зоне на территории Беларуси и Украины показало резкое, более чем в 10 раз, снижение загрязнения молока и мяса от коров, которых выпасали на обработанном таким образом пастбище. Расчеты показали, что после использования снятия дернины К<sub>д</sub> может составить 69 единиц. Следует отметить, что данная контрмера трудоемка и достаточно дорогая.

В Ровенской области в качестве контрмер были апробированы такие методы, как введение в желудок коровы феррациновых болосов (К<sub>д</sub> = 4), а также сепарацию полученного от коров молока через специальные фильтры, которые обработаны феррацином (К<sub>д</sub> = 5). Как известно, молоко является основным дозообразующим продуктом питания, особенно у жителей сельской местности. Феррацин имеет избирательную способность связывать цезий и, тем самым, снижать его содержание в молоке.

Более детальный расчет на основе предложенной модели надежности позволил провести всестороннюю оценку эффективности данных контрмер. Показано, что по результатам таких системных расчетов К<sub>д</sub> для феррациновых болосов составил около 1,8 единиц, а феррациновых фильтров 1,05. Это показывает, что локальная эффективность контрмеры еще не гарантирует общей системной эффективности для всей агроэкосистемы.

Для полноты картины на основе предложенного метода мы рассмотрели вариант совместного использования нескольких контрмер: внесение удобрений, снятия дернины и применения болосов. Считалось, что комбинация контрмер окажется заметно эффективнее каждой отдельно примененной

контрмеры. Расчет показал, что комбинированное использование контрмер может позволить заметно, до 90 раз, снизить коллективную дозу для данного села. Ясно, что в условиях относительно малых уровней радионуклидного загрязнения использования комбинированной системы контрмер нереально. В то же время, подобные комбинации могут быть полезными для других интенсивно загрязненных радионуклидами регионов Украины и Беларуси.

#### **Заключение и выводы**

1. Агрэкосистема является важным источником для последующего транспорта радионуклидов из окружающей среды к человеку. Чем больше фактор радиоемкости данной агрэкосистемы, тем она более надежна в понимании надежности поступления радионуклидов к популяции людей. В контексте данной статьи радиоемкость компонентов экосистемы – ее способность удерживать попавшие в них радионуклиды, позволяет минимизировать поток радионуклидов от агрэкосистемы к людям, о есть

снизить надежность транспорта радионуклидов цезия к людям, и тем самым уменьшить дозовые нагрузки.

2. Опираясь на натурные и литературные данные по скоростям миграции, распределения и перераспределения радионуклидов-трассеров  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах агрэкосистемы, а также по величине перехода цезия ко всем группам населения, можно рассчитывать величину надежности транспорта радионуклидов от данной агрэкосистемы к людям и оценить вклад разных составляющих агрэкосистемы в формирование дозовых нагрузок на население.

3. Описанный в статье подход к анализу транспорта радионуклидов от локальной агрэкосистемы к людям позволяет провести расчет эффективности использования различных типов контрмер для снижения дозовых нагрузок, даже не проводя их в реальности. В модели контрмера вводится через снижение скоростей перехода радионуклидов между камерами.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Агре А. Л. О распределении радиоактивных загрязнений в медленно обмениваемом водоеме / А. Л. Агре, В. И. Корогодина // Мед. радиология. – 1960. – № 1. – С. 67–73.
2. Kutlakhmedov Yu. A. Theory of Reliability in Radiation Ecology in Proceedings of International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management / Yu. A. Kutlakhmedov, I. V. Matveeva I. V. and other. – Israel, 2010. – 275 p.
3. Kutlakhmedov Yu. A. Radiocapacity of Ecosystems / Yu. A. Kutlakhmedov, V. I. Korogodin, V. Yu. Kutlakhmedova-Vyshnyakova // J. Radioecol. – 1997. – № 5 (1). – P. 25–35.
4. Кутлахмедов Ю. А. Основы радиэкологии / Ю. А. Кутлахмедов, В. И. Корогодина, В. К. Кольтовер. – К. : Выща шк. – 2003. – 319 с.
5. Кутлахмедов Ю. А. Моделирование радиэкологических процессов методом камерных моделей на примере села в Волынской области / Ю. А. Кутлахмедов, И. В. Матвеева, В. Р. Заитов // Вісник Національного авіаційного університету. – 2005. – № 3. – С. 173–176.
6. Кутлахмедов Ю. А. Особенности радиэкологических процессов в селе Тернопольской области, оцененных по методу камерных моделей / Ю. А. Кутлахмедов, И. В. Матвеева, В. Н. Исаенко // Вісник Національного авіаційного університету. – 2006. – № 2. – С. 126–128.
7. Кутлахмедов Ю. А. Теория и модели радиоемкости в современной радиэкологии / Ю. А. Кутлахмедов, В. И. Корогодина, В. В. Родина, И. В. Матвеева, В. П. Петрусенко, А. Г. Саливон, А. Н. Леншина // Международная конференция «Радиэкология: итоги, современной состояние и перспективы» : сб. материалов. – Москва, 2008. – С. 177–193.
8. Кутлахмедов Ю. А. Надежность экологических систем / Ю. А. Кутлахмедов, И. В. Матвеева, В. В. Родина. – Saarbrücken : Palmarium academic publishing, 2013. – 318 с.

**Рецензенты:** Лапшин Ю. С., д. т. н., профессор;  
Гроза В. А., к. физ.-мат. н., доцент.

© Матвеева І. В., 2014

*Дата надходження статті до редколегії 06.03.2014 р.*

**МАТВЄЄВА Ірина Валеріївна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології Інституту екологічної безпеки Національного Авіаційного університету, м. Київ.

**Коло наукових інтересів:** екологія, техногенна екологічна безпека, надійність екологічних систем.