

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ТРАНСПОРТА РАДИОНУКЛИДОВ В ЛОКАЛЬНОЙ АГРОЭКОСИСТЕМЕ

В статье с позиций теории и моделей радиоемкости и надежности рассмотрены типовая локальная агроэкосистема, загрязненная радионуклидами после Чернобыльской аварии. Показана возможность оценки агроэкосистемы, как системы транспорта радионуклидов от почвы к человеку и оптимизации выбора контрмер.

Ключевые слова: радиоемкость и надежность экосистем, агроэкосистема, радионуклиды

У статті з позицій теорії та моделей радіоемності і надійності розглянута типова локальна агроекосистема, забруднена радіонуклідами після Чорнобильської аварії. Показана можливість оцінки агроекосистеми, як системи транспорту радіонуклідів від ґрунту до людей та оптимізації вибору контрзаходів.

Ключові слова: радіоемність та надійність екосистем, агроекосистема, радіонукліди.

In report from positions of the theory both models of radiocapacity and reliability are considered typical local of agroecosystem, polluted by radionuclides after Chernjbyl accident. The opportunity of an estimation of reliability agroecosystem, as systems of transport radionuclides from ground to the man and optimization of a choice of countermeasures is shown.

Key words: radicapacity and reliability of ecosystems, agroecosystem, radionulides.

Полученные нами результаты по оценке распределения и перераспределения радионуклидов в агроэкосистеме (на примере с. Галузия, Волинская область) показали заметную динамику формирования дозовых нагрузок на людей. Для оценки и прогноза таких процессов нами предложено использовать модели и теорию надежности. Для этого агроэкосистема рассматривается как система транспорта радионуклидов от почвы к человеку. Нами предложены количественные методы оценки надежности отдельных элементов агроэкосистемы и агроэкосистемы в целом. Данный метод и модели позволили по-новому взглянуть на проблему экологической безопасности человека и рассмотреть проблемы применения защитных контрмер.

Исследования радиозкологических процессов в агроэкосистемах особенно важны для оценки и прогноза их экологической безопасности для населения, особенно при формировании дозовых нагрузок. Кроме использованного нами раньше метода камерных моделей, считаем необходимым разработать подходы к более общей оценки надежности и устойчивости агроэкосистемы. Речь идет об анализе агроэкосистемы, как системы транспорта радионуклидов от ОС к человеку, средствах и методах модификации данных процессов.

Наша задача применить эффективный анализ к агроэкосистеме, как системе транспорта радионуклидов от ОС к человеку, используя теорию и модели надежности. Реализация данной задачи позволит значительно расширить круг средств теоретической

радиоэкологии и может существенно дополнить существующий метод камерных моделей.

Разработанные нами модели и теория радиоемкости экосистем позволит ввести адекватный параметр – фактор радиоемкости – для определения состояния биоты экосистемы [1].

Радиоемкость – лимит радионуклидного загрязнения биоты экосистемы, при котором не наблюдаются серьезные изменения ее функционирования. При превышении данного лимита могут наблюдаться угнетение и/или подавление роста биоты. Фактор радиоемкости определяется как часть радионуклидного загрязнения, способного накапливаться в той или иной части (компоненте) экосистемы, без нарушения ее структуры. Экспериментальными и теоретическими исследованиями установлено, что чем выше параметр радиоемкости биоты в экосистеме, тем выше уровень благополучия и надежности биоты в ней. В частности, в исследованиях с растительными экосистемами показано, что способность биоты накапливать и удерживать радионуклидный трассер ^{137}Cs , аналог минерального элемента питания растений калия, отображает устойчивость и надежность биоты данной экосистемы. Установлено, что снижение показателя радиоемкости биоты в растительной экосистеме при влиянии химических поллютантов и при гамма-облучении растений, четко отображает снижение благополучия биоты и надежности экосистемы.

Таким образом, можно утверждать, что параметр радиоемкости способен выступать в качестве меры надежности каждого элемента экосистемы, а также экосистемы в целом. Чем выше фактор радиоемкости, и/или вероятность удержания трассера в каждом из элементов экосистемы, тем выше надежность составляющих элементов экосистемы. Используя эти параметры надежности элементов экосистемы, и зная структуру конкретной экосистемы, мы имеем возможность адекватно оценивать надежность всей экосистемы через ее способность обеспечивать распределение и перераспределение трассера, которые отображают ее устойчивое состояние [1].

Исходя из проведенных теоретических исследований, можно считать, что, используя параметры скоростей обмена радионуклидов между камерами (α_{ij} и α_{ji}), можно оценивать надежность компонента экосистемы, как элемента системы транспорта радионуклидов по камерам по формуле:

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

где P_i – надежность i -того элемента экосистемы, как удерживателя трассера (радионуклида), $\Sigma \alpha_{ij}$ – сумма скоростей перехода радионуклидов в сопряженные с ней камеры, $\Sigma \alpha_{ji}$ – сумма скоростей перехода радионуклидов в камеру i из сопряженных с ней камер, от которых радионуклиды поступают в данную камеру, надежность этого процесса мы оцениваем через P_i .

Таким образом, мы оцениваем надежность i -того элемента экосистемы по его способности удерживать радионуклиды, которые попадают в него. Далее, зная надежность схему – структуру обеспечения надежности транспорта радионуклидов от компонентов экосистемы к человеку, на основе модели надежности можно оценить надежность всей системы транспорта радионуклидов от экосистемы к людям.

Моделирование агроэкосистемы методами теории надежности. Применим разработанный подход к оценке надежности транспорта радионуклидов для агроэкосистемы с. Галузия [1; 2].

Основные блоки транспорта радионуклидов в исследованной агроэкосистеме, получены [1; 2].

Нами установлено, что основными дозообразующими компонентами данной агроэкосистемы, являются 4 основных пастбища. Эти пастбища функционируют, в надежность смысле, как параллельная система. Согласно теории надежности [1] общая надежность данной агроэкосистемы, как системы транспорта радионуклидов от пастбищ к людям, может быть представлена в виде суммы параметров надежности составляющих блоков-пастбищ.

Камерную модель данной агроэкосистемы, возможно представить в виде соответствующей структуры. Установлено, что транспортный поток радионуклидов от каждого пастбища (пастбища) образуют параллельную систему, поставки радионуклидов к популяции населения, образует четко последовательную систему: почва-трава-корова-молоко-мясо-люди. Надежность такой последовательной экосистемы может быть представлена в виде произведения параметров надежности составляющих блоков, которые образуют транспортный поток радионуклидов. Оценка надежности каждого из блоков может быть рассчитана с помощью формулы (1).

На основе наших экспедиционных исследований, по результатами наблюдений и расчетов нами получены оценки скоростей перехода между камерами исследованной агроэкосистемы.

Данные таблицы 1 позволяют провести оценки надежности компонентов экосистемы по предложенной нами 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. Для простоты мы ограничимся расчетом надежности исследуемой агроэкосистемы при средних значениях параметров скоростей. Результаты расчетов представлены в таблице 1. Показанный тут подход может быть применен для оценки эффективности разного типа контрмер, которые представлены в таблице 2.

Для анализа используем результаты расчетов, которые показаны в таблице 1. В первом блоке таблицы представлены данные по расчетам надежности транспорта радионуклидов по 4-х пастбищам: сначала при ситуации формирования дозы за счет использования молока, а потом – за счет употребления говядины.

По этим данным были просчитаны величины перехода радионуклидов Cs^{137} ко всем группам населения. Эту величину можно использовать для расчета коллективной дозы, используя величины коэффициентов дозовых цен для Cs^{137} [4; 5; 6] (2 10-8 Зв/Бк). 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).

При этом оценки добавки к коллективной дозы за счет использования продуктов лес (0,34 чел.Зв/год) и 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.

В данной агроэкосистеме могут быть задействованы разные контрмеры. В табл. 6.3 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.

Контрмера, которая чаще используется после аварии на Чернобыльской АЭС, – внесения повышенных норм удобрений. При этом K_d составляет около 2 единиц.

Это означает, что при выращивании продукции растениеводства на повышенных нормах удобрений ожидаемая индивидуальная доза может быть снижена в 2 раза. В таблице 1. представлены данные расчета значений K_d по величине снижения дозы при использовании этой контрмеры. Расчет показал, что при этом наблюдается снижение поступления радионуклидов в продукты питания людей в 1,74 раза. То есть получено, что K_d по величине экономии коллективной дозы для всего села за счет использования 4-х пастбищ составляет 1,74.

После аварии на ЧАЭС также был использован такая контрмера, как сеянка, когда дикие пастбища засевают культурными травами. При этом на данных территориях наблюдаются более высокие урожаи с

Оценка надежности агроэкосистемы без участия контрмер и оценка эффективности применения разных контрмер в агроэкосистеме (на примере с. Галузия) путем оценки надежности поступления радионуклидов Cs¹³⁷ от 4-х основных пастбищ (при средних скоростях перехода радионуклидов между камерами модели)

Контр-меры	K _д * (1)	№ пастбища	Запас р/н, Ки	Надежность транспорта р/н (по молоку)	Надежность транспорта р/н (по мясу)	Надежность общего транспорта р/н	Переход р/н (Ки)	Суммарный переход р/н (Ки) по пастбищам, коллективная доза и K _д	K _д (2) по надежности
Контрмеры не применялись	1	1	0,0056	0,03	0,022	0,052	0,0008	0,0022 (1,6 Чел. Зв) K _д = 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		
Удобрения	2	1	0,0056	0,015	0,011	0,026	0,00015	0,013 (0,96 люд-Зв) K _д = 1,7	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		
Сеянка	3	1	0,0056	0,0106	0,0079	0,0185	0,0001	0,008 (0,6 люд-Зв) K _д = 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		
Уборка дернины (3-5 см)	10	1	0,0056	0,0033	0,0024	0,0057	0,00003	0,000032 (0,024 люд-Зв) K _д = 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		
Феррациновые болосы	4	1	0,0056	0,014	0,013	0,027	0,0002	0,0012(0,88 люд-Зв) K _д = 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		
Феррациновые Фильтры (для молока)	5	1	0,0056	0,0297	0,02	0,0497	0,0003	0,0021 (1,6 чел-Зв) K _д = 1	1,05
		2	0,0169	0,0252	0,0174	0,0426	0,0007		
		3	0,0003	0,026	0,024	0,05	0,0003		
		4	0,0011	0,0416	0,0293	0,0709	0,0008		
Удобрения + уборка дернины + болосы	2 x 10 x 4	1	0,00056	0,015	0,01	0,025	0,000014	0,000024(0,016 люд-Зв) K _д = 100	91,7
		2	0,00169	0,0025	0,0017	0,0042	0,0000071		
		3	0,00003	0,01	0,009	0,019	0,0000057		
		4	0,00011	0,014	0,009	0,023	0,0000025		
Лес: грибы и ягоды							0,34 чел.Зв		
Огород							0,2 чел.Зв		

* K_д – коэффициент дезактивации, показывает во сколько раз может быть снижена доза облучения людей после применения конкретной контрмеры

наиболее низкими значениями коэффициентов накопления (K_н) в системе почва-трава. В этом случае значения K_д могут быть более 3. Системные расчеты методами теории надежности (при этом экосистема рассматривается как надежностная параллельная система из четырех пастбищ) составили по всем пастбищам значения K_д = 2,75. Это приемлемые значения K_д. 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 у коров, которых выпасают на обработанном таким образом пастбище. Расчеты показали, что по параметрам надежности K_д после использования снятия дернины, по величине K_д 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 (K_д = 4), а также сепарацию полученного от коров молока через специальные фильтры, которые обработаны феррацином (K_д = 5). Феррацин имеет избирательную способность связывать цезий и, тем самым, снижать его содержание в молоке, которое, как известно, является основным

дозообразующим продуктом питания, особенно у жителей сельской местности.

Более детальный расчет на основе предложенной модели надежности позволил провести всестороннюю оценку эффективности данных контрмер. Показано, что по результатам таких системных расчетов K_д 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 использования ряда 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 69 раз, снизить коллективную дозу для данного села.

Ясно, что в условиях относительно малых уровней радионуклидного загрязнения использования такой комбинированной системы контрмер не реально. В то же время подобные комбинации могут быть полезными для других интенсивно загрязненных радионуклидами регионов Украины и Беларуси.

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 Національного авіаційного університету. – 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. Національна Академія Наук України, Інститут ядерних досліджень. – Київ. – 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. Медико-биологические последствия Чернобыльской катастрофы: отдаленные радиозоологические 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. д.б.н., проф. В. П. Зотова и д.б.н., проф. Ю. А. Кутлахмедова. – Киев : 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. 49–53.

Рецензенти: **Ковтуненко О. В.**, д.мед.н., професор;
Іванкова В. С., д.мед.н., професор.

© Матвєєва І. В., 2012

Дата надходження статті до редколегії 25.12.2012 р.

МАТВЄЄВА І. В. – к.т.н., доцент, Національний авіаційний університет, факультет екологічної безпеки, м. Київ, Україна.

Коло наукових інтересів: математичні моделі переносу радіонуклідів між компонентами екосистем, радіємність екосистем.