

специально для каждого объекта в зависимости от его условий. Разница между рабочим и допустимым сбросом должна быть основанием для материального поощрения, которое выплачивается всем работникам объекта. Это будет способствовать улучшению культуры труда, которая в настоящее время является ведущим фактором, определяющим радиационное состояние сбросных вод.

Применение описанной трехуровневой схемы нормирования сбросов (а также выбросов) позволяет стимулировать улучшение радиационной обстановки при разумных затратах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свирижев Ю.М. Математические модели водных экосистем. М., изд. АН СССР, 1984. 70 с.
2. Рамел Ф. Основы прикладной экологии. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 544 с.
3. Демешек Л.Ю. Эколого-экономические системы. Модели, информация, эксперимент. Новосибирск: Наука, 1987. 212 с.
4. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Имитационные модели динамики экосистем в условиях антропогенного воздействия ТЭС и АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1990. 184 с.
5. Чернинский С.Н., Буштуева К.А., Красовский Г.Н. и др. Состояние и перспективы развития теории и практики гигиенического нормирования в области коммунальной гигиены. — В кн.: Гигиенические аспекты охраны окружающей среды. М., изд. МЗ РСФСР, 1974.
6. Акулов К.И., Буштуева К.А. Коммунальная гигиена. М.: Медицина, 1986. 606 с.
7. Шандала М.Г., Звиняцковский Я.И. Окружающая среда и здоровье населения. Киев, Здоровье, 1988. 152 с.
8. Кононович А.Л. К вопросу нормирования сбросов радиоактивных веществ во внешнюю среду. — В кн.: Биоиндикация и биомониторинг. М.: Наука, 1991, с. 45—54.
9. Ковалев Е.Е. Концепция приемлемого риска и проблема безопасности населения. — В сб.: Экология АЭС. М., изд. Ядерного общества, 1992, с. 7—16.
10. Ковалев Е.Е. Радиационный риск на Земле и в космосе. М.: Атомиздат, 1978.
11. Health and Safety Executive. The tolerability of risk from NPS. Health and Safety Commission, London, U.K., 1987.
12. Сивинцев Ю.В. Фоновое облучение человеческого организма. М.: Атомиздат, 1960.
13. Principles for Limiting Exposure of the Public to Natural Sources of Radiation. ICRP Publication 39. Oxford—New York—Paris: Pergamon Press, 1985.
14. Publication 60. Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. Oxford—New York—Frankfurt—Sydney—Tokio: Pergamon Press, 1990.
15. Кривошук Д.А., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А. Биоиндикация и экологическое нормирование. — В кн.: Влияние промышленных предприятий на окружающую среду. М., 1978, с. 18—27.
16. Карповский И.П. Охрана природы. Справочник. М.: Химия, 1980. 376 с.
17. Шульберг Р. Биоиндикация загрязнения наземных экосистем. М.: Мир, 1988. 350 с.
18. Кононович А.Л. Экологическое нормирование допустимых концентраций радиоактивных веществ. — Экология, 1992, № 6, с. 72—74.
19. Кононович А.Л., Хамьянов Л.П. Радиационная емкость объектов внешней среды. — В сб.: Атомные электростанции, вып. 9. М.: Энергоатомиздат, 1987, с. 171—174.

Поступила в Редакцию 18.01.94

УДК 577:539.12.04+581:539.12.04

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Яцало Б.И. (ВНИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии)

Применение в практике сельскохозяйственного производства контрольных уровней, разделяющих продукцию на «чистую» (уровень загрязнения ниже контрольного) и «грязную» (выше контрольного) с последующими различиями в их использовании, требует специального анализа стратегии защитных мероприятий (контрмер) [1].

Применяемые в радиологических исследованиях и оценках методы, основанные исключительно на средних значениях рассматриваемых переменных и параметров,

не всегда являются адекватными классу решаемых с их помощью задач ввиду значительной неоднородности структуры радиоактивного загрязнения территории и существенной вариабельности параметров. При таком подходе может получиться, например, что по оценкам произведенная в хозяйстве или регионе продукция чистая, в то время как в действительности ее значимая часть может быть загрязнена выше контрольного уровня.

Настоящая работа является частью проводимых исследований по применению вероятностных методов в радиоэкологии [2]. Необходимо отметить, что идея использования вероятностных методов в радиологии не является новой (см., например, работы [3, 4]), однако рассматриваемые в статье вопросы обсуждаются впервые. Ниже будут рассмотрены характеристики сельскохозяйственной продукции до и после введения контрмер. В частности, будет показано, что применение контрмер в условиях существенной неоднородности радиоактивного загрязнения (территории, продукции) может привести к нетривиальным результатам и в том числе увеличению коллективной дозы внутреннего облучения населения ввиду различий в использовании чистой и грязной продукции.

Обозначим через ξ уровень радиоактивного загрязнения данным радионуклидом рассматриваемого продукта на исследуемой территории, Бк/кг, Бк/л. Величина ξ характеризуется законом распределения $F(x) = \text{Prob}(\xi < x)$; $\varphi(x) = F'(x)$ — плотность распределения ξ ; θ — контрольный уровень загрязнения для данного продукта (и радионуклида), Бк/кг, Бк/л; $d_{1,2}$ — доля чистой и грязной продукции соответственно; C — среднее загрязнение всей произведенной продукции; $C_{1,2}$ — среднее загрязнение чистой и грязной продукции соответственно; $A_{1,2}$ — содержание радионуклидов в чистой и грязной продукции (нормированное на единицу всей произведенной продукции). Величину ξ можно интерпретировать как случайную при проведении оценок и/или распределенную при учете пространственно-временных неоднородностей в загрязнении продукции (практическая трактовка ξ на соответствующем вероятностном пространстве (Ω, U, P) здесь не рассматривается). Согласно введенным обозначениям

$$\begin{aligned} d_1 &= F(\theta) = \int_0^{\theta} \varphi(x) dx; \\ C_1 &= \int_0^{\theta} x \varphi(x) dx / d_1; \quad C_2 = \int_{\theta}^{\infty} x \varphi(x) dx / d_2; \\ A_i &= C_i d_i, \quad i = 1, 2; \quad C = A_1 + A_2 = \int_0^{\infty} x \varphi(x) dx. \end{aligned} \quad (1)$$

Использование контрмер в сельском хозяйстве приводит к уменьшению радиоактивного загрязнения продукции в целом. Загрязнение ξ_c данного продукта после проведения соответствующей контрмеры (на всей исследуемой территории) можно представить в виде

$$\xi_c(f) = \xi_1^c = \xi/f, \quad (2)$$

где f — эффективность контрмеры. В общем случае величина f также характеризуется своим законом распределения, параметры которого могут зависеть от многих факторов, однако для целей настоящего исследования достаточно считать f неслучайной величиной $f > 1$.

Рассмотрим изменение содержания радионуклидов в чистой и грязной продукции в результате применения контрмеры согласно уравнению (2). Очевидно

$$A_2(f) = \int_{f\theta}^{\infty} x \varphi(x) dx / f \leq \int_{\theta}^{\infty} x \varphi(x) dx / f = A_2(1) / f,$$

$$\text{т.е. } A_2^{\xi} = A_2(f) \leq A_2 / f.$$

Таким образом, вынос радионуклидов с грязной продукцией уменьшается более чем в f раз (при нормировке на единицу произведенной продукции или в случае, когда применение контрмеры не влияет на валовые показатели производства продукции).

Пусть X_m — супремум мод плотности распределения $\varphi(x)$; пусть также на отрезке $[0, X_m]$ функция $\varphi(x)$ монотонно возрастает (что может быть, например, для нормального или логарифмически нормального законов распределения) или не убывает [для соответствующих кусочно-равномерных видов распределения (гистограмм)]. Если при этом контрольный уровень θ и эффективность f такие, что

$$\theta < f\theta \leq X_m, \quad (3)$$

то на $[0, \theta]$ $\varphi(fx) \geq \varphi(x)$ и

$$A_1(f) - A_1 = \int_0^{\theta} x [\varphi_c(x) - \varphi(x)] dx = \int_0^{\theta} x [f\varphi(fx) - \varphi(x)] dx \geq (f-1) \int_0^{\theta} x \varphi(x) dx =$$

$$= (f-1) A_1, \text{ т.е. при выполнении указанных условий}$$

$$A_1^{\xi} = A_1(f) \geq f A_1. \quad (4)$$

Из неравенств (3), (4) следует, что содержание радионуклидов в чистой продукции (и соответственно коллективная доза от потребления чистой продукции) в результате применения контрмеры может возрастать более чем в f раз даже в случае, если валовое производство продукции не изменяется (при увеличении производства продукции возможность указанного факта возрастает). Очевидно также, что хотя

$$A_1(f) = C_1(f) d_1(f) \leq C_1(f) \leq \theta,$$

значимость указанного увеличения коллективной дозы согласно неравенству (4) зависит от распределения ξ , величины f и количества потребляемой продукции.

Можно показать также, что

$$1 \leq F_d = d_1(f) / d_1 \leq 1 / d_1; f_1 = C_1 / C_1(f) \leq f, \quad (5)$$

кроме того, если $\varphi(x)$ монотонно не убывает на $[0, X_m]$, то в случае выполнения условия (3) $1/d_1 > F_d > f > f_1$. Нетрудно показать также, что более слабое, чем уравнение (4), неравенство $A_1(f) > A_1$ может быть характерно для монотонно убывающей плотности, например, для плотности, описываемой формулой $\varphi(x) = ax^{-b}$, $x \geq x_0$, $b > 1$, если, в частности, $A_1 < \varepsilon(\theta, x_0)$.

Одним из основных показателей качества производимой продукции является среднее загрязнение. Если среднее загрязнение контролируемой продукции при использовании контрмеры согласно уравнению (1) уменьшается в f раз, то согласно неравенствам (4) $f_1 \leq f$. Рассмотрим следующий пример:

$$\varphi(x) = \begin{cases} 0,1, & x \in [0, 1]; \\ 0,8, & x \in [1, 2]; \\ 0,01, & x \in [2, 12]. \end{cases} \quad (6)$$

В случае $\theta = 1$, $f = 2$ применение контрмеры согласно уравнению (2) [см. также формулу (1)] приводит к увеличению среднего загрязнения как чистой, так и грязной продукции: $C_1(1) = 0,5$, $C_1(2) = 0,69$, $C_2(1) = 2,1$, $C_2(2) = 3,5$ (вопрос о том, для каких классов распределений $\varphi(x)$ возможно возникновение указанных эффектов, представляет собой отдельную математическую задачу).

Предположим, что функция $F(x)$ характеризует распределение загрязнения ξ данной продукции для исследуемого региона (хозяйства, группы хозяйств, района) и при этом известно, где производится грязная продукция. Проведение контрмеры только на этой части территории (или для данного поголовья скота, продукции) приводит к следующему распределению загрязнения продукции:

$$\xi_2^c = \begin{cases} \xi, & \text{если } \xi \leq \theta; \\ \xi/f, & \text{если } \xi > \theta. \end{cases} \quad (7)$$

Плотность распределения ξ_2^c может быть представлена выражением

$$\varphi_2^c(x) = \begin{cases} \varphi(x), & x \leq \theta/f; \\ \varphi(x) + f\varphi(fx), & x \in (\theta/f, \theta]; \\ f\varphi(fx), & x > \theta. \end{cases}$$

Обозначим через $A_{1,2}^c$ и $A_{1,1}^c$ содержание радионуклидов в чистой продукции (нормированное на единицу всей произведенной продукции) для ξ_2^c и ξ_1^c соответственно. Тогда (в случае $0 < d_1 < 1$)

$$A_{1,2}^c - A_1 = \int_0^{\theta} x[\varphi_2^c(x) - \varphi(x)]dx = \int_0^{\theta} x\varphi(x)dx/f > \theta(d_1^c - d_1)/f > 0. \quad (8)$$

Кроме того, если на $[0, f\theta]$ $\varphi(x)$ монотонно не убывает, то

$$A_{1,2}^c - A_1 \geq \varphi(\theta)\theta^2(f^2 - 1)/(2f) \geq A_1(f^2 - 1)/f, \quad (9)$$

откуда

$$A_{1,2}^c \geq (f + (f - 1)/f)A_1. \quad (10)$$

Таким образом, при использовании контрмеры (7) содержание радионуклидов в чистой продукции согласно уравнению (8) возрастает и в некоторых случаях, например, согласно условию (10) более чем в f раз. Кроме того,

$$A_{1,2}^c - A_{1,1}^c = A_1(f - 1)/f; \quad (11)$$

$$C\{^2\} = C\{^1\} + C_1(f - 1)/(F_d f), \quad (12)$$

где $C\{^2\}$, C_1 — среднее загрязнение чистой продукции для ξ_2^c и ξ соответственно, $i = 1, 2$. Из равенств (11), (12) следует, насколько стратегия использования контрмеры (7) уступает с радиологической точки зрения стратегии (2). Однако для обоснованного вывода о преимуществе той или иной стратегии применения контрмер необходимо учитывать также социально-экономические факторы, используя в том числе методы затраты—выгода [5].

В таблице в качестве примера приведена структура загрязнения молока в пастбищный период в зоне загрязнения ^{137}Cs 15—40 Ки/км² (555—1480 кБк/м²) для различных сценарно выбранных вариантов использования контрмер (предполагалось, что структура загрязнения территории ^{137}Cs в данной зоне имеет распределение, близкое к логарифмически нормальному). При этом радиологические характеристики продукции в случае реализации системы контрмер в растениеводстве (в данном случае как результат коренного улучшения пастбищ) и феррацина (в пастбищный период) совпадают. В результате применения контрмер содержание радионуклидов в чистой продукции увеличивается от 20 до 50 раз (в случае совместного использования коренной мелиорации пастбищ и феррацина). Если предположить, что все грязное молоко будет

Структура загрязнения молока ^{137}Cs в пастбищный период в Новозыбковском районе Брянской обл. по данным модельных оценок на 1989 г. (ВДУ = 0,37 кБк/л)

Мероприятие	% чистой продукции	Среднее загрязнение продукции, кБк/л	Содержание ^{137}Cs в продукции, ГБк		
			всего	в чистой	в грязной
Без контрмер	9	2,44	30,6	0,03	30,57
Система контрмер в растениеводстве	43	0,48	6,25	0,7	5,55
Использование феррацина в пастбищный период	44	0,5	6,3	0,74	5,56
Система контрмер в растениеводстве и использование феррацина в пастбищный период	98	0,11	1,4	1,3	0,1

переработано на масло (коэффициент уменьшения содержания ^{137}Cs ~40 раз), то по данным таблицы количество поступившего с пищей ^{137}Cs без внедрения контрмер составит $(0,03 + 30,57:40) = 0,79$ ГБк, в результате коренного улучшения пастбищ или применения феррацина — 0,84—0,88 ГБк и 1,3 ГБк при совместном проведении указанных мероприятий.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что, несмотря на общее уменьшение содержащегося в произведенной продукции ^{137}Cs , коллективная доза населения от потребления чистой и переработанной грязной продукции в результате введения контрмер может увеличиваться. Безусловно, защитные мероприятия в сельском хозяйстве приведут к росту количества чистой продукции, что само по себе важно для удовлетворения соответствующих потребностей. При этом оценку эффективности (оправданности) введения защитных мероприятий можно дать на основе комплексного анализа радиологических и экономических показателей [5].

Использование аналога выражения (2) для оценки изменения структуры радиоактивного загрязнения продукции во времени (вследствие процессов радиоактивного распада и самоочищения) также приводит к выводу о возможном увеличении коллективной дозы в последующие годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рекомендации по ведению сельского хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения территории в результате аварии на ЧАЭС на период 1991—1995 гг. Под ред. Р.М. Алексахина. М.: Госагропром СССР, 1991. 58 с.
2. Vlasov O.K., Yatsalo B.I., Mirzeabasov O.A. Using probabilistic methods for tasks of regional radioecological modelling. In: Proc. Intern. Symp. «Problems of Ecoinformatics», Zvenigorod, Moscow, 1992, p. 52.
3. Kumazawa S., Numakunai T. Why do we need dose distribution models? — Radiation protection dosimetry, 1991, v. 36, No 2—4, p. 269—273.
4. Фесенко С.В., Черняева Л.Г., Санжарова Н.И., Алексахин Р.М. Вероятностный подход к прогнозированию радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной продукции. — Атомная энергия, 1993, т. 74, вып. 6, с. 507—513.
5. Оптимизация радиационной защиты на основе анализа соотношения «затраты—выгода». Публикация МКРЗ № 37. М.: Энергоатомиздат, 1985.