DOI: 10.21870/0131-3878-2021-30-4-131-142

УДК 614.876:631.438:633.2

35 лет после аварии на Чернобыльской АЭС – нужны ли реабилитационные мероприятия на сельскохозяйственных угодьях?

Просянников Е.В., Зверева Л.А., Силаев А.Л.

Брянский государственный аграрный университет, Брянская область

Рассмотрены изменения плотности загрязнения ^{137}Cs пашни, сенокосов и пастбищ на юго-западе Брянской области. Отмечено, что процесс очищения идёт медленно, поэтому проведение реабилитационных мероприятий является основным способом снижения удельной активности радионуклида в продукции растениеводства и кормопроизводства. Приведён алгоритм расчёта и результаты оценки экономической эффективности агротехнических и агрохимических реабилитационных мероприятий на пашне по результатам стационарных полевых опытов. Установлены наиболее экономически целесообразные реабилитационные мероприятия для различных почв и плотностей радиоактивного загрязнения: 1) почва дерново-подзолистая песчаная, плотность загрязнения ^{137}Cs 871 кБк/м² – в севообороте ячмень, клевер, кукуруза, озимая рожь, овёс, внесение известковой муки в дозе 2,1 т/га + NPK; 2) почва дерново-подзолистая супесчаная, плотность загрязнения ^{137}Cs 2516 кБк/м² – в севообороте озимая рожь, картофель, ячмень + многолетние травы, клевер + тимофеевка первого года пользования, клевер + тимофеевка второго года пользования, внесение фосфоритной муки в дозе 288 кг/га + NPK; 3) почва дерново-подзолистая легкосуглинистая, плотность загрязнения ^{137}Cs 901 кБк/м² – в севообороте картофель, ячмень, кукуруза, овёс + многолетние травы, клевер + тимофеевка первого года пользования, клевер + тимофеевка второго года пользования, озимая рожь, внесение полуторных доз фосфорно-калийного минерального удобрения в сочетании с одной дозой азотного минерального удобрения (NP_{1,5}K_{1,5}); 4) почва дерново-подзолистая легкосуглинистая, плотность загрязнения ^{137}Cs 1224 кБк/м² – в севообороте картофель, ячмень, кукуруза, овёс + многолетние травы, клевер + тимофеевка первого года пользования, клевер + тимофеевка второго года пользования, внесение доломитовой муки в дозе 3 т/га + навоз 120 т/га + K₆₀₀. Для естественных пойменных лугов, на которых не применяют реабилитационные мероприятия, предложен адаптивный способ агроэкологического использования. При плотности загрязнения ^{137}Cs более 185 кБк/м² целесообразно в центральных частях пойм заготавливать зелёную массу канареечников травостоев, которые накапливают меньше радионуклида, а также не пасти животных по отаве, чтобы радиоактивные вещества не поступали в их организм с дерниной и мелкозёмом. В прирусловой и притеррасной частях пойм, где травостои значительно больше накапливает ^{137}Cs , не выпасать животных.

Ключевые слова: ЧАЭС, 35 лет, Брянская область, ^{137}Cs , пашня, реабилитация, экономическая оценка, естественные луга, адаптивное использование, радиологическая оценка.

Введение

До аварии на Чернобыльской АЭС плотность загрязнения почв Брянской области ^{137}Cs составляла 1,5-3,0 кБк/м². Сразу после аварии средневзвешенная плотность загрязнения сельскохозяйственных угодий достигла 132 кБк/м², в том числе на пашне – 111 кБк/м², а на сенокосах и пастбищах – 186 кБк/м², превышая доаварийный уровень в 45-125 раз. По прошествии 35 лет и распаде более половины выпавшего ^{137}Cs на юго-западе Брянской области ещё остаются большие площади сельскохозяйственных земель, которые нельзя отнести к категории радиационно безопасных [1-3].

По данным ФГБУ «Брянскагрохимрадиология» средневзвешенная плотность загрязнения почв сельскохозяйственных угодий радионуклидами снизилась на 47%, пашни – на 43%, сенокосов и пастбищ – на 58%. На пашне уменьшился переход ^{137}Cs в продукцию растениеводства, и её качество стало соответствовать санитарно-гигиеническим нормативам [4].

Просянников Е.В.* – профессор, д.с.-х.н.; Зверева Л.А. – доцент, к.э.н.; Силаев А.Л. – зав. каф., доцент, к.с.-х.н. Брянский ГАУ.
*Контакты: 243365, Брянская обл., Выгоничский р-н, с. Кокино, ул. Советская, 2а. Тел.: +79206047126; e-mail: p_e_v_32@mail.ru.

Учёные ФГБНУ ВНИИРАЭ установили, что в зависимости от интенсивности проведения реабилитационных мероприятий в земледелии их вклад в снижение удельной активности ^{137}Cs в продукции растениеводства в первый период после радиационной аварии (1987-1991 гг.) был максимальным – 20-35%, во второй период (1992-1997 гг.) он снизился до 10-25%, а в третий (1998 г. и далее) – до 5-15%. Через 15-20 лет после аварии в отсутствие реабилитационных мероприятий для некоторых культур уменьшение содержания ^{137}Cs в растениях определяется только распадом радионуклида. Доказано, что в настоящее время проведение агрохимических реабилитационных мероприятий на пашне и агротехнических на кормовых угодьях является основным способом снижения содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства и кормопроизводства [5, 6].

Для получения нормативно чистой продукции растениеводства и кормопроизводства для наиболее загрязнённой ^{137}Cs юго-западной части Брянской области разработаны агрохимические реабилитационные мероприятия на сельскохозяйственных угодьях [7-9] и способ адаптивного использования естественных пойменных лугов [10-12].

Целью настоящей работы являлась оценка необходимости реабилитации сельскохозяйственных угодий юго-запада Брянской области через 35 лет после аварии на ЧАЭС и радиолого-экономическое обоснование наиболее эффективных приёмов восстановления агроэкосистем.

Материалы и методы

Экономическим исследованиям были подвергнуты результаты стационарных полевых опытов ФГБУ «Брянскагрохимрадиология» [13]. Организации по радиологической защите рекомендуют использовать для оценки эффективности реабилитационного мероприятия «анализ затрат и результатов» [14-17]. Оптимальным признают то реабилитационное мероприятие, которое не только обеспечивает высокий радиологический результат, а экономический эффект от применения которого превышает затраты. При выборе реабилитационного мероприятия для практического использования (среди нескольких радиологически эффективных) предложено руководствоваться показателем, определяющим эффективность необходимых затрат. Таким критерием является стоимость единицы предотвращённой относительной дозы облучения, если вменённые издержки выше контрольной денежной стоимости чел.-Зв., то вариант не признают оптимальным [16].

Экономическую оценку проводили по следующему алгоритму. Для примера возьмём вариант: внесение 2,1 т/га известковой муки с минеральными удобрениями ($\text{N}_{60}\text{P}_{30}\text{K}_{90}$) под ячмень в 5-польном севообороте на дерново-подзолистой песчаной почве с плотностью загрязнения ^{137}Cs 871 кБк/м². Исходные данные для расчёта следующие: 1) удельная радиоактивность до проведения реабилитационного мероприятия 137 Бк/кг и после его проведения 111 Бк/кг; 2) урожайность ячменя до проведения реабилитационного мероприятия (M) 2130 кг/га и после его проведения (M_c) 2400 кг/га.

Определяли предотвращённую относительную дозу облучения населения (чел.-мЗв/га), которая является показателем эколого-экономической эффективности реабилитационного мероприятия в условиях радиоактивного загрязнения.

Величину снижения относительной дозы облучения определяли по формуле:

$$\Delta S = K \times E \times M \times C \times (1 - m/f),$$

где ΔS – коллективная доза облучения населения, предотвращённая в результате использования реабилитационных мероприятий, чел.-мЗв; K – доля оставшейся активности радионуклида после технологической переработки рассматриваемого сельскохозяйственного продукта; E – дозовый

коэффициент, чел.-мЗв/Бк [15]; M – объём продукции до применения реабилитационного мероприятия, полученный с единицы площади, кг/га; C – удельная активность радионуклида в продукции до применения реабилитационного мероприятия, Бк/кг; m – кратность увеличения объёма: $m = M_c / M = 2400 / 2130 = 1,13$ раза; f – кратность снижения удельной активности радионуклида в продукции при использовании реабилитационного мероприятия:

$$f = C / C_c = 136,9 / 111 = 1,23 \text{ раза};$$

$$\Delta S = 1,0 \times 6,8 \times 10^{-6} \times 2130 \times 136,9 \times (1 - 1,13 / 1,23) = 0,159 \text{ чел.-мЗв/га}.$$

Полный экономический результат (P) реабилитационного мероприятия определяли по формуле:

$$P = \Delta Y + \Delta D,$$

где ΔY – сокращение экономического ущерба от загрязнения окружающей среды в результате применения реабилитационного мероприятия:

$$\Delta Y = \alpha \times \Delta S = 20 \times 0,159 = 3,17 \text{ долл./га},$$

где α – стоимостный эквивалент потерянных человеком лет жизни от облучения, принимаемый по рекомендациям [14, 16] в размере 10-20 тыс. долл. США/чел.-Зв; ΔD – дополнительный доход от применения реабилитационного мероприятия:

$$\Delta D = (M_c - M) \times C_{яч} = (2400 - 2130) \times 0,05 = 13,5 \text{ долл./га},$$

где $C_{яч}$ – закупочная стоимость зерна ячменя, равная 0,05 долл./кг.

$$P = 3,17 + 13,5 = 16,67 \text{ долл./га}.$$

Дисконтированный экономический результат (DP) определяли по следующей формуле:

$$DP = P \times R,$$

где R – коэффициент дисконтирования, который рассчитывали по формуле:

$$R = (1+r)^{-n} = 1 / (1+r)^n = 1 / (1+0,08) = 0,93,$$

где r – норма дисконтирования (доходности инвестиций), равная для средозащитных мероприятий 0,08.

$$DP = 16,67 \times 0,93 = 15,5 \text{ долл./га}.$$

Чистый дисконтированный доход ($ЧДД$) определяли по формуле:

$$ЧДД = DP - K = 15,5 - 3,8 = 11,7 \text{ долл./га},$$

где K – единовременные затраты, приведённые к одному году, которые представляют собой стоимость внесения 2,1 т/га известковой муки с минеральными удобрениями ($N_{60}P_{30}K_{90}$), равные 3,8 долл./га.

Индекс доходности инвестиций (ID) – доход от каждого вложенного в инвестиции рубля, определяли по формуле:

$$ID = DP / K = 15,5 / 3,8 = 4,08.$$

Расчётный индекс доходности для рассматриваемого реабилитационного мероприятия > 1 , следовательно, его применение экономически эффективно.

Стоимость единицы предотвращённой коллективной дозы облучения (e) рассчитывали по формуле:

$$e = K \times 1000 / \Delta S = 3,8 \times 1000 / 0,159 = 23,9 \text{ тыс. долл. США/чел.-Зв},$$

где 1000 – для пересчёта миллизивертов в зиверты.

Рассчитанная стоимость единицы предотвращённой коллективной дозы облучения близка к нормативному показателю. Поэтому на основании стационарных полевых опытов и экономической оценки их результатов данное реабилитационное мероприятие – внесение известковой муки

2,1 т/га с минеральными удобрениями ($N_{60}P_{30}K_{90}$) под ячмень в пятипольном севообороте на дерново-подзолистой песчаной почве с активностью ^{137}Cs 871 кБк/м² – является эффективным не только по радиологическому, но и по экономическому критериям.

В поймах рек Ипути, Унечи, Беседи, расположенных на юго-западе Брянской области, положили экосистемный ландшафтный стационар, состоящий из пяти ключевых экосистемных участков (КЭУ), которые находятся в различных зонах загрязнения ^{137}Cs . Каждый КЭУ состоит из четырёх пойменных экологических подсистем (ПЭП), образованных естественными сообществами луговых растений, обусловленными почвенными и другими природными условиями (табл. 1, 2).

Таблица 1

Характеристика ПЭП Суражского и Жуковского КЭУ в пойме р. Ипути

Суражский КЭУ, плотность загрязнения ^{137}Cs менее 37 кБк/м ²			
Прирусовая ПЭП. Почва аллювиальная дернов- вая кислая маломощная укороченная. Травостой разнотравно-злаковый, сена 21 ц/га	Центральная ПЭП. Почва собственно аллюви- альная луговая кислая мало- мощная укороченная. Травос- той осоково-манниково-ка- нареечниковый, сена 45 ц/га	Центральная ПЭП. Почва собственно аллюви- альная луговая кислая мало- мощная укороченная. Травос- той разнотравно-маннико- вый, сена 72 ц/га	Притеррасная ПЭП. Почва собственно аллюви- альная лугово-болотная. Травостой разнотравно- осоковый, сена 72 ц/га
Жуковский КЭУ, плотность загрязнения ^{137}Cs 37-185 кБк/м ²			
Прирусовая ПЭП. Почва аллювиальная дерно- вая кислая слоистая примитив- ная укороченная. Травос- той бобово-разнотравно- злаковый, сена 21 ц/га	Центральная ПЭП. Почва собственно аллюви- альная луговая кислая мало- мощная укороченная. Травос- той осоково-разно- травно-канареечниковый, сена 37 ц/га	Центральная ПЭП. Почва собственно аллюви- альная луговая кислая мало- мощная. Травостой осоково- канареечничково-маннико- вый, сена 93 ц/га	Притеррасная ПЭП. Почва собственно аллюви- альная лугово-болотная оторфованная. Травостой манниково-разнотравно- осоковый, сена 32 ц/га

Таблица 2

Характеристика ПЭП Лопатнинского, Перевозского и Батуровского КЭУ

Лопатнинский КЭУ в пойме р. Унечи, плотность загрязнения ^{137}Cs 185-555 кБк/м ²			
Прирусовая ПЭП. Почва аллювиальная дерно- вая кислая слоистая примитив- ная укороченная. Травос- той бобово-разнотравно- злаковый, сена 5 ц/га	Центральная ПЭП. Почва собственно аллюви- альная луговая кислая мало- мощная укороченная. Травос- той разнотравно-канарееч- никовый, сена 47 ц/га	Центральная ПЭП. Почва собственно аллюви- альная луговая кислая мало- мощная. Травостой разнотравно-манниковый, сена 93 ц/га	Притеррасная ПЭП. Почва собственно аллюви- альная лугово-болотная оторфованная. Травостой разнотравно-осоковый, сена 28 ц/га
Перевозский КЭУ в пойме р. Ипути, плотность загрязнения ^{137}Cs 555-1480 кБк/м ²			
Прирусовая ПЭП. Почва аллювиальная дерно- вая кислая слоистая примитив- ная укороченная. Травос- той разнотравно-злаковый, сена 8 ц/га	Центральная ПЭП. Почва собственно аллюви- альная луговая кислая мало- мощная укороченная. Травос- той разнотравно-маннико- вый, сена 43 ц/га	Центральная ПЭП. Почва собственно аллюви- альная луговая кислая мало- мощная укороченная. Травос- той разнотравно-маннико- вый, сена 45 ц/га	Притеррасная ПЭП. Почва собственно аллюви- альная лугово-болотная. Травостой осоковый, сена 25 ц/га
Батуровский КЭУ в пойме р. Беседи, плотность загрязнения ^{137}Cs более 1480 кБк/м ²			
Прирусовая ПЭП. Почва аллювиальная дерно- вая кислая слоистая примитив- ная укороченная. Травос- той бобово-разнотравно- злаковый, сена 10 ц/га	Не обнаружили соответствую- щего луга в пределах дан- ной плотности загрязнения ^{137}Cs	Центральная ПЭП. Почва собственно аллюви- альная лугово-болотная. Травостой разнотравно- осоково-манниковый, сена 63 ц/га	Притеррасная ПЭП. Почва собственно аллюви- альная лугово-болотная. Травостой разнотравно- осоковый, сена 49 ц/га

Геоботаническое обследование травостоев ПЭП и отбор растительных образцов проводили по Л.Г. Раменскому [18]. Почвенные образцы отбирали в почвенных разрезах из слоёв 0-5 и 5-10 см в четырёхкратной повторности.

Для определения содержания форм ^{137}Cs почвенные образцы подвергали последовательной обработке десорбентами по нижеприведённой схеме.

Доступные для растений формы: водорастворимые – извлекали дистиллированной водой, легкообменные – 1 н водным раствором ацетата аммония.

Недоступные для растений формы: труднообменные – извлекали 1 н раствором HCl; необменные – 3 н раствором HCl; прочносвязанные – представляли собой остаток, не извлекаемый вышеуказанными десорбентами.

В ФГБУ «Брянскагрохимрадиология» определяли удельную активность ^{137}Cs в образцах растений, почв и вытяжек из них методом полупроводниковой гамма-спектрометрии.

Результаты и обсуждение

Оценка экономической эффективности наиболее радиологически значимых реабилитационных мероприятий, установленных в стационарных полевых опытах ФГБУ «Брянскагрохимрадиология» [13], позволила выделить среди них наиболее целесообразные для практического использования на различных типах почв и уровнях радиоактивного загрязнения [19]:

- почва дерново-подзолистая песчаная, плотность загрязнения ^{137}Cs 871 кБк/м² – в севообороте ячмень, клевер, кукуруза, озимая рожь, овёс; внесение известковой муки в дозе 2,1 т/га + NPK;
- почва дерново-подзолистая супесчаная, плотность загрязнения ^{137}Cs 2516 кБк/м² – в севообороте озимая рожь, картофель, ячмень + многолетние травы, клевер + тимopheевка первого года пользования, клевер + тимopheевка второго года пользования; внесение фосфоритной муки в дозе 288 кг/га + NPK;
- почва дерново-подзолистая легкосуглинистая, плотность загрязнения ^{137}Cs 901 кБк/м² – в севообороте картофель, ячмень, кукуруза, овёс + многолетние травы, клевер + тимopheевка первого года пользования, клевер + тимopheевка второго года пользования, озимая рожь; внесение полуторных доз фосфорно-калийного минерального удобрения в сочетании с одной дозой азотного минерального удобрения (NP_{1,5}K_{1,5});
- почва дерново-подзолистая легкосуглинистая, плотность загрязнения ^{137}Cs 1224 кБк/м² – в севообороте картофель, ячмень, кукуруза, овёс + многолетние травы, клевер + тимopheевка первого года пользования, клевер + тимopheевка второго года пользования; внесение доломитовой муки в дозе 3 т/га + навоз 120 т/га + K₆₀₀ (КАХОП).

Однако проведение реабилитационных мероприятий на сельскохозяйственных угодьях юго-запада Брянской области по годам снижалось, а по некоторым их видам вовсе прекратилось (табл. 3).

Таблица 3

Изменение площади применения реабилитационных мероприятий на сельскохозяйственных угодьях юго-запада Брянской области за 30 лет [4]

Виды работ, тыс. га	Годы						
	1986	1992	2006	2010	2014	2015	2016
Известкование	177,0	127,0	3,5	1,1	-	-	-
Фосфоритование	101,0	79,0	2,1	-	-	-	-
Калиевание	85,0	64,0	5,0	1,5	-	-	-

На экосистемном ландшафтном стационаре в поймах рек Ипути, Унечи и Беседи установлено, что в слое почв 0-10 см прирусловой, центральной и притеррасной ПЭП независимо от плотности их загрязнения ^{137}Cs преобладает в недоступной для растений форме. Доступных соединений этого радионуклида больше в почвах центральной поймы под канареечниковыми и манниковыми травостоями (рис. 1).

Рис. 1. Удельная активность доступных и недоступных для растений форм ^{137}Cs (Бк/кг) в почвах приусловой, центральной (слева – канареечниковые травостои, справа – манниковые травостои) и притеррасной частей речных пойм при различной плотности радиоактивного загрязнения.

В пойменных почвах достоверная положительная корреляционная связь установлена между доступными формами ^{137}Cs и содержанием обменного калия, а достоверная отрицательная – с $\text{pH}_{\text{КС}}$ и ёмкостью катионного обмена (ЕКО) почвенного поглощающего комплекса. В почвах притеррасной и приусловой частей пойм связь между рассматриваемыми величинами сильнее, чем в почвах центральной части пойм (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициенты парной корреляции между удельной активностью доступных форм ^{137}Cs и агрохимическими показателями в слое 0-10 см пойменных почв

Части речных пойм	$\text{pH}_{\text{КС}}$	ЕКО	Гумус	P_2O_5	K_2O
Приусловые	-0,79	-0,63	-0,05	-0,25	0,75
Центральные, канареечниковые травостои	-0,46	-0,35	-0,47	-0,21	0,58
Центральные, манниковые травостои	-0,52	-0,41	0,18	-0,72	0,41
Притеррасные	-0,71	-0,75	-0,46	-0,31	0,67

Рассчитаны уравнения множественной регрессии для почв различных частей пойм, где y – удельная активность доступных для растений форм ^{137}Cs , Бк/кг; x_1 – pH_{KCl} ; x_2 – ЕКО , ммоль/100 г почвы; x_3 – K_2O , мг/кг почвы.

Приусловые части пойм: $y=17,98 - 3,19 x_1 - 0,15 x_2 + 22,2 x_3$.

Центральные части пойм, канареечниковые травостой:

$y= - 349,88 - 13,39 x_1 + 3,86 x_2 + 474,2 x_3$.

Центральные части пойм, манниковые травостой:

$y=30,74 - 4,03 x_1 - 0,17 x_2 + 28,5 x_3$.

Притеррасные части пойм: $y=39,24 - 4,89 x_1 - 0,23 x_2 + 14,1 x_3$.

Независимо от плотности радиоактивного загрязнения удельная активность ^{137}Cs в зелёной массе с центральной части пойм ниже, чем с приусловой и, особенно, с притеррасной частей (табл. 5). Это, в какой-то мере, обусловлено разбавлением радионуклида в большей массе урожая, но, по-видимому, основную роль играют биологические особенности произрастающих здесь трав и свойства почв [20].

Таблица 5

Удельная активность ^{137}Cs в зелёной массе и в рационе животных с различных частей пойм в основных зонах радиоактивного загрязнения юго-запада Брянской области

Части речных пойм	Удельная активность ^{137}Cs	
	зелёная масса трав, Бк/кг	рацион животных, Бк/сут
Плотность загрязнения ^{137}Cs менее 37 кБк/м ²		
Приусловая	8,6	$0,5 \times 10^3$
Центральная, канареечниковый травостой	3,1	$0,2 \times 10^3$
Центральная, манниковый травостой	2,4	$0,2 \times 10^3$
Притеррасная	4,3	$0,3 \times 10^3$
Плотность загрязнения ^{137}Cs 37-185 кБк/м ²		
Приусловая	19,9	$1,2 \times 10^3$
Центральная, канареечниковый травостой	4,2	$0,3 \times 10^3$
Центральная, манниковый травостой	3,8	$0,2 \times 10^3$
Притеррасная	43,0	$2,6 \times 10^3$
Плотность загрязнения ^{137}Cs 185-555 кБк/м ²		
Приусловая	308,2	$1,9 \times 10^4$
Центральная, канареечниковый травостой	93,5	$0,6 \times 10^4$
Центральная, манниковый травостой	53,0	$0,3 \times 10^4$
Притеррасная	377,6	$2,3 \times 10^4$
Плотность загрязнения ^{137}Cs 555-1480 кБк/м ²		
Приусловая	1366,9	$8,2 \times 10^4$
Центральная, канареечниковый травостой	196,9	$1,2 \times 10^4$
Центральная, манниковый травостой	549,7	$3,3 \times 10^4$
Притеррасная	1756,1	$10,5 \times 10^4$
Плотность загрязнения ^{137}Cs более 1480 кБк/м ²		
Приусловая	368,8	$2,2 \times 10^4$
Центральная, смешанный канареечниково-манниковый травостой	88,5	$0,5 \times 10^4$
Притеррасная	407,5	$2,5 \times 10^4$

Для оценки естественных кормовых угодий учитывали удельную активность ^{137}Cs в зелёной массе луговых трав, а также в рационе сельскохозяйственных животных. Ежедневно корове требуется около 60 кг зелёной массы, а контрольный уровень составляет 370 Бк/кг, следовательно, допустимое суточное содержание этого радионуклида в рационе равно $2,2 \times 10^4$ Бк.

При плотности загрязнения ^{137}Cs менее 37 кБк/м^2 все участки поймы высоко и примерно одинаково хозяйственно пригодны. Когда плотность загрязнения этим радионуклидом превышает 37 кБк/м^2 , то травостой различных частей пойм дифференцируются по удельной активности ^{137}Cs . При плотности загрязнения $37\text{-}185 \text{ кБк/м}^2$ наиболее низка пригодность зелёной массы трав притеррасной поймы. Увеличение плотности загрязнения ^{137}Cs до $185\text{-}555 \text{ кБк/м}^2$ ещё сильнее дифференцирует удельную активность радионуклида в зелёной массе трав на различных частях поймы, а в притеррасной пойме она в районе сельскохозяйственных животных становится больше допустимого уровня. При плотности радиоактивного загрязнения более 555 кБк/м^2 можно безопасно использовать в районе только зелёную массу канареечниковых травостоев центральной поймы (табл. 5).

Итак, на пойменных естественных лугах, где не проводят реабилитационные мероприятия, снижающие удельную активность ^{137}Cs в зелёной массе, эффективен адаптивный (приспособительный) способ использования травостоев. При плотности радиоактивного загрязнения более 185 кБк/м^2 необходимо руководствоваться следующими агроэкологическими принципами:

- 1) использовать для получения зелёной массы высокоурожайный и питательный канареечниковый травостой центральной поймы, который накапливает меньше ^{137}Cs ;
- 2) при радиоактивном загрязнении центральной поймы не пасти животных по отаве, так как ^{137}Cs поступает в организм животных с дерниной и мелкозёмом;
- 3) в прирусловой и притеррасной частях поймы, травостой которых значительно больше накапливают ^{137}Cs , не выпасать животных.

Заключение

Учёные ФГБНУ ВНИИРАЭ прогнозируют [21], что плотность загрязнения сельскохозяйственных угодий ^{137}Cs на юго-западе Брянской области до уровня менее 37 кБк/м^2 снизится к 2150 г. Наиболее длительный период «очищения» лугопастбищных угодий будет в хозяйствах Новозыбковского (до 2155 г.) и Красногорского (до 2180 г.) районов. Этот прогноз позволяет заключить, что в указанном регионе ещё долго загрязнённая ^{137}Cs пашня будет нуждаться в реабилитационных агротехнических и агрохимических мероприятиях, а пойменные естественные луга, на которых не применяют реабилитационные мероприятия, – в адаптивном способе использования зелёной массы травостоев.

Литература

1. **Силаев А.Л., Чекин Г.В., Смольский Е.В., Новиков А.А.** Современное состояние плодородия почв радиоактивно загрязнённых пойменных экосистем Брянской области //Вестник Брянской ГСХА. 2020. № 6 (82). С. 10-16.
2. **Панов А.В.** Возвращение радиоактивно загрязнённых территорий к нормальной жизнедеятельности: современные проблемы и пути решения (к 35-летию аварии на Чернобыльской АЭС) //Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2021. № 1. С. 5-13.
3. Радиационное загрязнение территории Брянской области. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.protown.ru/russia/obl/articles/8001.html> (дата обращения 07.03.2021).
4. **Белоус Н.М.** Развитие радиоактивно загрязнённых территорий Брянской области в отдалённый период после аварии на Чернобыльской АЭС //Вестник Брянской ГСХА. 2018. № 1 (65). С. 3-11.
5. **Panov A.V., Aleksakhin R.M., Prudnikov P.V., Novikov A.A., Muzalevskaya A.A.** Influence of rehabilitation measures on ^{137}Cs uptake by crops from soils contaminated during the Chernobyl NPP accident //Eurasian Soil Sci. 2009. V. 42, N 4. P. 445-457.
6. **Панов А.В., Ратников А.Н., Свириденко Д.Г., Исамов Н.Н., Цыгвинцев П.Н.** Реабилитация сельскохозяйственных земель при масштабном радиоактивном загрязнении (к 35-летию аварии на Чернобыльской АЭС) //Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 3. С. 46-50.
7. **Воробьёв Г.Т., Маркина З.Н., Просянных Е.В.** Почвенная адаптивно-ландшафтная концепция преодоления последствий радиоактивных загрязнений //Система биологизации земледелия Нечернозёмной зоны России. Т. 1. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2002. С. 382-410.
8. **Сычев В.Г., Лунёв В.И., Орлов П.М., Белоус Н.М.** Чернобыль: радиационный мониторинг сельскохозяйственных угодий и агрохимические аспекты снижения последствий радиоактивного загрязнения почв (к 30-летию техногенной аварии на Чернобыльской АЭС). М.: ВНИИА, 2016. 184 с.
9. **Белоус Н.М., Прудников П.В., Щеглов А.М., Смольский Е.В., Белоус И.Н., Силаев А.Л.** Вероятность получения молока и кормов, не соответствующих допустимым уровням содержания ^{137}Cs на территории юго-запада Брянской области в отдалённый период после аварии на Чернобыльской АЭС //Радиация и риск. 2019. Т. 28, № 3. С. 36-46.
10. **Prosyannikov E.V., Silaev A.L., Koshelev I.A.** Specific ecological features of ^{137}Cs behavior in river floodplains //Russ. J. Ecol. 2000. V. 31, N 2. P. 132-135.
11. **Просянных Е.В., Кошелев И.А., Силаев А.Л.** Радиоэкологические аспекты адаптивного использования естественных пойменных кормовых угодий //Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2000. № 3. С. 35-38.
12. **Просянных Е.В., Силаев А.Л.** Адаптивный подход к использованию пойменных угодий, загрязнённых цезием //Кормопроизводство. 1999. № 2. С. 11-14.
13. **Маркина З.Н.** Радиоэкологическое состояние агроландшафтов юго-запада России и их реабилитация: дис. ... д-р с.-х. наук. Брянск, 1999. 276 с.
14. ICRP, 1983. Cost-benefit analysis in the optimization of radiation protection. ICRP Publication 37 //Ann. ICRP. 1983. V. 10, N 2-3. P. 1-75.
15. Методические указания МУ 2.6.1-95. Реконструкция эффективной дозы облучения жителей населённых пунктов РФ, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году.
16. Серия докладов по безопасности, № 21. Оптимизация радиационной защиты при контроле облучения персонала МАГАТЭ. Вена, 2003. 82 с.

17. Реконструкция средней накопленной эффективной дозы облучения жителей населённых пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году. Изм. 3 к МУ 2.6.1.579-96: Методические указания. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2014. 6 с.
18. **Раменский Л.Г.** Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. М.: Сельхозгиз, 1935. 620 с.
19. **Зверева Л.А.** Обоснование экономической эффективности реабилитационных мероприятий в растениеводстве на радиоактивно загрязнённых землях (на материалах Брянской области): дис. ... канд. экон. наук. Москва, 2005. 179 с.
20. **Кузнецов В.К., Исамов Н.Н., Панов А.В.** Оценка эффективности реабилитации лугопастбищных угодий на различных этапах после аварии на Чернобыльской АЭС //Радиация и риск. 2021. Т. 30, № 2. С. 50-61.
21. **Панов А.В., Санжарова Н.И., Шубина О.А., Гордиенко Е.В., Титов И.Е.** Современное состояние и прогноз загрязнения ^{137}Cs сельскохозяйственных угодий Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей, подвергшихся воздействию аварии на Чернобыльской АЭС //Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 3. С. 66-74.

35 years after the Chernobyl accident – do we need rehabilitation measures on agricultural land?

Prosyannikov E.V., Zvereva L.A., Silaev A.L.

Bryansk State Agricultural University, Bryansk region

The changes in the density of pollution ^{137}Cs of arable land, hayfields and pastures in the south-west of the Bryansk region are considered. It is noted that the cleansing process is slow, so rehabilitation measures are the main way to reduce the specific activity of the radionuclide in crop and feed production. The paper presents algorithm of calculation. Economic efficiency of agrotechnical and agrochemical rehabilitation of arable land is estimated on results of stationary field experiments. The most economically expedient rehabilitation measures for various soils and densities of radioactive contamination are established: 1) soil sod-podzolic sand, contamination density ^{137}Cs 871 kBq/m² – in crop rotation barley, clover, corn, winter rye, oats application of lime flour in a dose of 2.1 t/ha + NPK; 2) sod-podzolic sandy loam soil, contamination density ^{137}Cs 2516 kBq/m² – in crop rotation winter rye, potatoes, barley + perennial grasses, clover + timofeevka of the first year of use, clover + timofeevka of the second year of use introduction of phosphorite flour in a dose of 288 kg/ha + NPK; 3) sod-podzolic soil light loamy, contamination density ^{137}Cs 901 kBq/m² – in crop rotation potatoes, barley, corn, oats + perennial grasses, clover + timofeevka of the first year of use, clover + timofeevka of the second year of use, winter rye application of one-and-a-half doses of phosphorus-potassium mineral fertilizer in combination with one dose of nitrogen mineral fertilizer (NP_{1,5K_{1,5}}); 4) sod-podzolic soil is light loamy, contamination density ^{137}Cs 1224 kBq/m² – in crop rotation potatoes, barley, corn, oats + perennial grasses, clover + timofeevka of the first year of use, clover + timofeevka of the second year of use, application of dolomite flour in a dose of 3 t/ha + manure 120 t/ha + K₆₀₀. For natural meadows, where rehabilitation measures are not used, an adaptive method of agroecological use is proposed. With a contamination density of ^{137}Cs of more than 185 kBq/m², it is advisable to harvest a green mass of canary grass stands in the central parts of the floodplains, which accumulate less radionuclide, grazing animals along the otava is prohibited in order to protect them from radioactive substances that may enter their body with sod and shallow soil. In "near the river bed" and "near terrace" parts of the waterprays, where grass stands accumulate much more ^{137}Cs , grazing of animals is prohibited.

Key words: *Chernobyl NPP, 35 years old, Bryansk region, ^{137}Cs , arable land, rehabilitation, economic assessment, natural meadows, adaptive use, radiological assessment.*

Prosyannikov E.V.* – Prof., D. Sc. Agr.; **Zvereva L.A.** – Associate Prof., C. Sc. Econ.; **Silaev A.L.** – Head of Dep., Associate Prof., C. Sc. Agr. Bryansk SAU.

*Contacts: 2a Sovetskaya str., Kokino village, Vygonichsky district, Bryansk region, Russia, 243365. Tel.: +79206047126; e-mail: p_e_v_32@mail.ru.

References

1. **Silaev A.L., Chekin G.V., Smolsky E.V., Novikov A.A.** Current state of soil fertility of radioactively contaminated floodplain ecosystems of the Bryansk region. *Vestnik Brjanskoj GSHA – Bulletin of the Bryansk State Agricultural Academy*, 2020, no. 6 (82), pp. 10-16. (In Russian).
2. **Panov A.V.** Returning radioactively contaminated territories to normal life: current problems and ways for solution (35 years after the Chernobyl NPP accident). *Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psihologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychajnykh situatsijakh – Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*, 2021, no. 1, pp. 5-13. (In Russian).
3. Radiation pollution of the territory of the Bryansk region. Available at: <http://www.protown.ru/russia/obl/articles/8001.html> (Accessed 07.03.2021).
4. **Belous N.M.** Development of radioactive contaminated territories of the Bryansk region in the remote period after the Chernobyl accident. *Vestnik Brjanskoj GSHA – Bulletin of the Bryansk State Agricultural Academy*, 2018, no. 1 (65), pp. 3-11. (In Russian).
5. **Panov A.V., Aleksakhin R.M., Prudnikov P.V., Novikov A.A., Muzalevskaya A.A.** Influence of rehabilitation measures on ^{137}Cs uptake by crops from soils contaminated during the Chernobyl NPP accident. *Eurasian Soil Sci.*, 2009, vol. 42, no. 4, pp. 445-457.
6. **Panov A.V., Ratnikov A.N., Sviridenko D.G., Isamov N.N., Tsygvintsev P.N.** Rehabilitation of agricultural lands under large-scale radioactive contamination (to the 35th anniversary of the Chernobyl accident). *Rossijskaja sel'skokhozjajstvennaja nauka – Russian Agricultural Science*, 2021, no. 3, pp. 46-50. (In Russian).
7. **Vorobyev G.T., Markina Z.N., Prosyannikov E.V.** Pochvennaja adaptivno-landshaftnaja konceptsiya preodolenija posledstvij radioaktivnykh zagraznenij [Soil adaptive landscape concept of overcoming the consequences of radioactive contamination]. *Sistema biologizatsii zemledelija Nechernozjomnoj zony Rossii [The system of biologization of agriculture in the Non-Chernozem zone of Russia]*. Vol. 1. Moscow, FGNU "Rosinformagrotekh", 2002, pp. 382-410.
8. **Sychev V.G., Lunev V.I., Orlov P.M., Bilous N.M.** Chernobyl': radiatsionnyj monitoring sel'skokhozjajstvennykh ugodij i agrokhimicheskie aspekty snizhenija posledstvij radioaktivnogo zagraznenija pochv (k 30-letiju tehnogennoj avarii na Chernobyl'skoj AJeS) [Chernobyl: radiation monitoring of agricultural land and agrochemical aspects of the management of the consequences of radioactive contamination of soils (the 30th anniversary of the technogenic accident at the Chernobyl nuclear power plant)]. Moscow, VNIIA, 2016. 184 p.
9. **Belous N.M., Prudnikov P.V., Shcheglov A.M., Smolskiy E.V., Belous I.N., Silayev A.L.** Estimating risk of radiocesium presence at levels exceeded the permissible amount of the radionuclide in forage and milk from the south-west part of Bryansk region long after the Chernobyl accident. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 36-46. (In Russian).
10. **Prosyannikov E.V., Silaev A.L., Koshelev I.A.** Specific ecological features of ^{137}Cs behavior in river floodplains. *Russ. J. Ecol.*, 2000, vol. 31, no. 2, pp. 132-135.
11. **Prosyannikov E.V., Koshelev I.A., Silaev A.L.** Radioecological aspects of adaptive use of natural floodplain forage conditions. *Vestnik Rossijskoj akademii sel'skokhozjajstvennykh nauk – Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences*, 2000, no. 3, pp. 35-38. (In Russian).
12. **Prosyannikov E.V., Silaev A.L.** Adaptive approach to the use of floodplain lands contaminated with cesium. *Kormoproizvodstvo – Fodder Production*, 1999, no. 2, pp. 11-14. (In Russian).
13. **Markina Z.N.** Radiojekologicheskoe sostojanie agrolandshaftov jugo-zapada Rossii i ih reabilitacija. Diss. doct. s.-kh. nauk [Radioecological state of agricultural landscapes of the south-west of Russia and their rehabilitation. Dr. agric. sci. diss.]. Bryansk, 1999. 276 p.

14. ICRP, 1983. Cost-benefit analysis in the optimization of radiation protection. ICRP Publication 37. *Ann. ICRP*, 1983, vol. 10, no. 2-3, pp. 1-75.
15. Metodicheskie ukazaniya MU 2.6.1-95. Rekonstruktsiya jeffektivnoj dozy oblucheniya zhitelej naseljonnykh punktov RF, podverghshikhsya radioaktivnomu zagrizneniju vsledstvie avarii na Chernobyl'skoj AJeS v 1986 godu [Methodological guidelines MU 2.6.1-95. Reconstruction of the effective radiation dose of residents of settlements of the Russian Federation exposed to radioactive contamination as a result of the Chernobyl accident in 1986].
16. Seriya dokladov po bezopasnosti, № 21. Optimizacija radiacionnoj zashhity pri kontrole oblucheniya personala MAGATJe [Series of Safety reports, no. 21. Optimization of radiation protection during the control of radiation exposure of IAEA personnel]. Vienna, 2003. 82 p.
17. Reconstruction of the average accumulated effective radiation dose to the inhabitants of settlements of the Russian Federation exposed to radioactive contamination due to the Chernobyl accident in 1986. Izm. 3 to MU 2.6.1.579-96. Methodological guidelines. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2014. 6 p. (In Russian).
18. **Ramenskiy L.G.** Vvedenie v kompleksnoe pochvenno-geobotanicheskoe issledovanie zemel' [Introduction to the complex soil-geobotanical investigation of lands]. Moscow, Selkhozgiz, 1935. 620 p.
19. **Zvereva L.A.** Obosnovanie jekonomicheskoy jeffektivnosti reabilitatsionnykh meroprijatij v rastenievodstve na radioaktivno zagriznjonnnykh zemljakh (na materialakh Brjanskoj oblasti). Diss. kand. jekon. nauk [Justification of the economic efficiency of rehabilitation measures in crop production on radioactively contaminated lands (based on the materials of the Bryansk region). Diss. cand. econ. sci.]. Moscow, 2005. 179 p.
20. **Kuznetsov V.K., Isamov N.N., Panov A.V.** Assessment of grasslands remediation effectiveness in different periods after the Chernobyl accident. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2021, vol. 30, no. 2, pp. 50-61. (In Russian).
21. **Panov A.V., Sanzharova N.I., Shubina O.A., Gordienko E.V., Titov I.E.** Contamination of agricultural lands in Bryansk, Kaluga, Orel and Tula regions with ¹³⁷Cs as a result of the Chernobyl accident: current status and prognosis. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2017, vol. 26, no. 3, pp. 66-74. (In Russian).