

РЕАБИЛИТАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДЬЯХ, ПОДВЕРГШИХСЯ РАДИОАКТИВНОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ

А.Н. РАТНИКОВ¹, Г.И. ПОПОВА¹, Д.Г. СВИРИДЕНКО¹, С.П. АРЫШЕВА¹,
А.А. СУСЛОВ¹, К.В. ПЕТРОВ¹, С.П. ТОРШИН²

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»;
² ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева)

В статье проведен анализ мероприятий по восстановлению радиоактивно загрязненных в результате аварии на ЧАЭС пахотных и кормовых угодий и оценена их эффективность. Качественное выполнение мероприятий обеспечивает стабильные урожаи сельскохозяйственных культур и получение продукции растениеводства и кормопроизводства, соответствующей санитарно-гигиеническим нормативам по содержанию радионуклидов (¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr). Рассчитаны дозы минеральных, органических удобрений, необходимых для проведения реабилитационных мероприятий при возделывании зерновых культур и картофеля, а также при поверхностном и коренном улучшении сенокосов и пастбищ на различных типах почв, в зависимости от плотности загрязнения ¹³⁷Cs. Показана большая эффективность известкования кислых почв для снижения поступления радионуклидов (особенно радиоцезия) в продукцию растениеводства. Внесение извести и других известковых материалов, в зависимости от уровня загрязнения и кислотности почвы способствует снижению поступления радионуклидов в сельскохозяйственные культуры в 1,5–3,0 раза. Описаны новые комплексные удобрения Борофоска и Нитроборофоска, содержащие макроэлементы питания (азот, фосфор, калий, кальций), а также микроэлемент бор, которые показали высокую эффективность (снижение накопления ¹³⁷Cs в урожае до 6,8 раза) в зоне аварии на Чернобыльской АЭС на дерново-подзолистых почвах легкого гранулометрического состава. Приведены результаты испытания нового высокоэффективного органоминерального удобрения пролонгированного действия на основе трепела – СУПРОДИТ М – смесь комплексного сорбента с закрепленными в кристаллической решетке элементами минерального питания растений (N, P, K), обогащенного Mg, B и Mo, и органической компоненты на основе торфа, содержащей легкоусвояемый азот и биологически активные вещества (гуматы калия).

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, радионуклиды, сельскохозяйственные угодья, восстановление, мероприятия, эффективность.

Введение

Загрязнённые радиоактивными веществами в результате крупных радиационных аварий на химкомбинате «Маяк» (Южный Урал) и на Чернобыльской АЭС сельскохозяйственные угодья занимает площадь более 17 млн га. В качестве критерия для зонирования подвергшихся радиоактивному загрязнению земель используют плотность загрязнения ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. Контрольные уровни содержания радионуклидов в почве определяются с учётом состава радиоактивных выпадений и характеристики почвенного покрова. После аварии на ЧАЭС зонирование территории по плотности загрязнения ¹³⁷Cs проводили по следующей градации: < 37 кБк/м² (менее 1 Ки/км²); 37–185 кБк/м² (1–5 Ки/км²);

185–555 кБк/м² (5–15 Ки/км²); 555–1480 кБк/м² (15–40 Ки/км²) и >1480 кБк/м² (свыше 40 Ки/км²).

В настоящее время загрязнение сельскохозяйственных угодий радионуклидами в ряде регионов Российской Федерации (Брянская, Калужская, Тульская и Орловская области) достигает уровней, при которых производимая продукция может не соответствовать требованиям санитарно-гигиенических нормативов или велик риск получения такой продукции.

Реабилитация почв при радиоактивном загрязнении связано с применением технологических приёмов по закреплению и снижению подвижности радионуклидов в почве, что приводит к ограничению их поступления в сельскохозяйственные культуры и получению продукции, соответствующей существующим санитарно-гигиеническим нормативам. Восстанавливаемые земли и окружающие их территории должны после окончания всех работ представлять собой оптимально сформированный, экономически и эколого-гигиенически сбалансированный ландшафтный участок [1, 5].

Методологические основы реабилитации радиоактивно загрязнённых сельскохозяйственных земель

Критерии оценки уровней загрязнения почв радионуклидами приведены в таблице 1.

Таблица 1

Критерии оценки загрязнения почв радионуклидами [6]

Уровень загрязнения	Плотность загрязнения, кБк/м ²		Мощность экспозиционной дозы, мкР/ч
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	
Допустимый	<37	<11,1	<20
Умеренно опасный	37–185	11,1–18,5	20–55
Опасный	185–555	18,5–37,0	55–200
Высоко опасный	555–1480	37,0–111,0	200–400
Чрезвычайно опасный	>1480	>111,0	>400

Критериями для принятия решения о необходимости проведения работ по восстановлению почв на техногенно загрязнённых территориях служат: превышение содержания радионуклидов в получаемой сельскохозяйственной продукции и почвах [4] и превышение допустимых доз облучения населения [7].

Физические, химические и биологические приёмы реабилитации радиоактивно загрязнённых сельскохозяйственных земель приведены в табл. 2.

Классификация приёмов реабилитации загрязнённых радионуклидами земель сельскохозяйственного назначения

Группа приёмов восстановления		
Физические	Химические	Биологические
Удаление верхнего слоя почвы (5–10 см)	Известкование в дозе 1,0–2,0 Нг	Подбор видов сельскохозяйственных культур
Обработка почвы: - вспашка с оборотом пласта; - глубокое рыхление до 45 см	Внесение удобрений: - минеральных; - органических; - комплексных	Подбор сортов Севообороты
Обработка дернины и почвы: фрезерование + вспашка с оборотом пласта	Применение сорбентов: - химических; - на основе природных мелиорантов	Применение биологически активных веществ
Комбинированная обработка дернины и почвы: фрезерование + дисковая обработка	Применение комплексных соединений, обладающих свойствами удобрений и сорбентов	Применение биопрепаратов на основе специализированных видов микроорганизмов

Мероприятия по реабилитации радиоактивно загрязнённых сельскохозяйственных угодий и их эффективность

Комплекс мероприятий, направленных на получение продукции, отвечающей санитарно-гигиеническим радиологическим нормативам, включает в себя организационные, агротехнические, агрохимические и технологические мероприятия.

Организационные мероприятия на радиоактивно загрязнённых сельскохозяйственных угодьях включают:

- проведение обследования загрязнённых сельскохозяйственных угодий, инвентаризацию угодий по плотности загрязнения и составление картографического материала;

- прогнозирование накопления радионуклидов сельскохозяйственными культурами;

- изменение структуры посевных площадей на основании данных инвентаризации угодий по плотности загрязнения радионуклидами и прогнозирования их содержания в урожае;

- организацию радиационного контроля продукции.

Агротехнические мероприятия в растениеводстве включают:

- применение обработки почвы, обеспечивающей уменьшение эрозионных процессов, предотвращение ветрового подъёма и горизонтальной миграции радионуклидов;

- совмещение операций основной и дополнительной обработок почвы с применением новых высокопроизводительных машин;

- под зерновые и однолетние травы рекомендуется применение неглубокой (10–14 см) обработки чизельными культиваторами с последующим применением предпосевной обработки;

- глубокая вспашка (с оборотом или без оборота пласта) проводится на вновь осваиваемых или залежных землях с мощным гумусовым горизонтом [11];
- совмещение ряда технологических операций по уходу за посевами и использование высокопроизводительных агрегатов и машин;
- применение различных способов уборки урожая сельскохозяйственных культур (уборка зерновых прямым комбайнированием).

Эффективность агротехнических приёмов в растениеводстве зависит от условий их применения:

- при первом применении вспашки на глубину 20–22 см на радиоактивно загрязнённых угодьях переход радионуклидов (^{90}Sr и ^{137}Cs) в растения снижается в 1,5–2,0 раза; последующие обработки влияния не оказывают;

- при первом применении глубокой обработки почвы с помощью чизельного плуга на глубину 40–45 см и последующее уменьшение глубины основной обработки до 18–20 см способствуют снижению поступления радионуклидов (^{90}Sr и ^{137}Cs) в растения до 3 раз;

- при первом применении дискования почвы на глубину 10–12 см переход радионуклидов (^{90}Sr и ^{137}Cs) в растения снижается в 1,2–1,5 раза; последующие обработки влияния не оказывают.

Агрохимические приёмы в растениеводстве включают:

- известкование кислых почв;
- внесение органических удобрений;
- внесение повышенных доз фосфорных и калийных удобрений;
- оптимизация азотного питания растений;
- внесение микроудобрений;
- снижение пестицидной нагрузки.

Эффективность агрохимических приёмов в растениеводстве зависит от времени применения после аварии, почвенных условий, типа радиоактивного загрязнения, видовых особенностей сельскохозяйственных культур.

Известкование загрязнённых кислых почв способствует снижению поступления радионуклидов в сельскохозяйственные культуры в 1,5–3,0 раза. В качестве известковых материалов можно использовать $\text{Ca}(\text{OH})_2$, мартезовские и электроплавильные шлаки, доломитовую муку и др. Дозы применения известковых материалов зависят от кислотности почв и уровней радиоактивного загрязнения (табл. 3).

В табл. 4 приведены рекомендуемые дозы внесения органических, азотных, фосфорных и калийных удобрений под основные сельскохозяйственные культуры в зависимости от плотности загрязнения почв ^{137}Cs :

Применение органических удобрений способствует снижению накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr сельскохозяйственными культурами в 1,2–2,5 раза в зависимости от уровня плодородия почв и вида культуры.

Эффективность применения минеральных удобрений зависит от характеристик радионуклидов, показателей почвенного плодородия, вида возделываемых культур.

При загрязнении почв ^{90}Sr наиболее эффективным является внесение повышенных (двойных) доз фосфорных удобрений. Снижение накопления радионуклида в урожае составляет 1,2–3,5 раза. При этом рекомендуется применение повышенных (двойных) доз калийных удобрений и азотных удобрений под запланированный урожай. Накопление ^{90}Sr в урожае может быть снижено до 3 раз. Для ^{137}Cs применение фосфорных удобрений менее эффективно – снижение накопления в урожае в 1,1–2,5 раза.

Таблица 3

**Рекомендуемые дозы внесения известковых материалов
для радиоактивно загрязнённых почв в зависимости от степени
их кислотности [11]**

Кислотность почв (рН _{ксл})	Дозы СаСО ₃ (т/га) при различных уровнях загрязнения ¹³⁷ Cs		
	I*	II*	III*
Сильнокислые (4,5)	8,0	9,0	10,0
Среднекислые (4,6–5,0)	6,0	8,0	9,0
Слабокислые (5,1–5,5)	5,0	7,0	9,0
Близкие к нейтральным (5,6–6,0)	3,0	6,0	8,0
Нейтральные (около 7)	-	5,0*	6,0

*Уровни загрязнения ¹³⁷Cs: I – 37–185 кБк/м²; II – 185–555 кБк/м²; III – 555–1480 кБк/м²

Таблица 4

Дозы внесения удобрений для почв, загрязнённых ¹³⁷Cs выше 555 кБк/м² [11]

Культура	Органические удобрения, т/га	Дозы минеральных удобрений, (кг д.в. на 1 га)		
		Азот	Фосфор	Калий
Озимые зерновые (рожь, пшеница)	40–80	80–100	100–180	90–180
Яровые зерновые (ячмень, овес)	30–50	80–100	90–140	90–160
Картофель	60–80	90–120	100–180	120–240

При загрязнении почв ¹³⁷Cs рекомендуется сбалансированное внесение азотных, фосфорных и калийных удобрений в соотношении NPK = 1:1:1,5 и NPK = 1:1,5:2,0 (1 – зональные (базовые) дозы). Применение повышенных доз фосфорно-калийных удобрений обеспечивает снижение накопления радионуклида в урожае до 3 раз. Повышенные дозы калийных удобрений можно вносить раз в 2–3 года, а в остальные годы удобрения вносят под запланированный урожай с учётом обеспеченности почвы подвижным калием и плотностью загрязнения почвы ¹³⁷Cs. Эффективность применения повышенных доз калийных удобрений выше для ¹³⁷Cs (снижение накопления в урожае в 1,5–3,5 раза), чем для ⁹⁰Sr (в 1,2–1,5 раза).

Комплексное применение органических (40–80 т/га) и минеральных удобрений (N_{60–120}P_{60–120}K_{90–180}) является более эффективным приёмом получения сельскохозяйственной продукции с наименьшим содержанием радионуклидов – накопление радионуклидов (⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs) снижается в 1,2–2,5 раза. При этом азотные удобрения должны вноситься в расчёте на планируемый урожай, т.к. повышенные дозы приводят к увеличению перехода радионуклидов в растения.

Комплексное окультуривание почв является эффективным приёмом, как для повышения почвенного плодородия, так и для снижения накопления радионуклидов в продукции растениеводства. Оно включает: известкование (для кислых почв), доза извести – 5–6 т/га, внесение органических удобрений в количестве 40 т/га (и выше), фосфоритование (до 2 т/га), внесение калийных удобрений в количестве до 240 кг/га K_2O . Стартовая доза азотных удобрений – N_{60} , которую вносят весной [8]. Накопление радионуклидов снижается до 3 раз.

Эффективность применения природных минералов и сорбентов зависит от множества факторов и проявляется нестабильно, как правило, на 2–3-й год после внесения. При наличии положительного эффекта применение природных мелиорантов (пальгорскитовая глина и опока – 20 т/га) снижает переход радионуклидов из почвы в растения в 1,5–3,0 раза. Внесение вермикулита (5 т/га) и бентонита (10 т/га) на фоне $N_{90}P_{90}K_{90}$ снижает накопление ^{137}Cs в продукции растениеводства в 1,5–2,5 раза. Природные мелиоранты вносят осенью под вспашку или дисковую обработку почвы.

Применение новых комплексных удобрений типа Борофоска и Нитроборофоска, содержащих Ca, элементы питания (P, K, N), а также B, показало высокую эффективность (снижение накопления ^{137}Cs в урожае до 6,8 раза) в зоне аварии на Чернобыльской АЭС на дерново-подзолистых почвах лёгкого гранулометрического состава [13].

Во ВНИИРАЭ разработано и испытано новое высокоэффективное органоминеральное удобрение пролонгированного действия на основе трепела – СУПРОДИТ М. СУПРОДИТ М – смесь комплексного сорбента с закреплёнными в кристаллической решётке элементами минерального питания растений (N, P, K), обогащённого Mg, B и Mo, и органической компоненты на основе торфа, содержащей легкоусвояемый азот и биологически активные вещества (гуматы калия). СУПРОДИТ М содержит: N – 11,4%; P_2O_5 – 12%; K_2O – 18%, Mg – 5900 мг/кг; B – 478 мг/кг; Mo – 206 мг/кг. СУПРОДИТ М – удобрение основного внесения в почву, применяется в дозах 0,6–1,0 т/га, вносится 1 раз в 2–3 года, повышает урожайность ячменя – на 10–30%, овса – на 15–40%, картофеля – на 10–40%, улучшает сорбционные свойства почвы. На радиоактивно загрязнённых сельскохозяйственных угодьях внесение СУПРОДИТА М снижает поступление ^{137}Cs в зерно зерновых культур до 3,5 раза; в вегетативную массу многолетних трав – до 4,4 раза [3, 8, 10].

Фитомелиорация земель включает в себя приёмы подбора видов и сортов сельскохозяйственных культур а также фиторемедиации. Приёмы фитомелиорации основаны на способности растений поглощать из почвы в значительных количествах загрязняющие вещества.

Подбор культур. Сельскохозяйственные культуры, в зависимости от видовых особенностей, различаются между собой по накоплению ^{137}Cs до 30 раз. Минимальным размером накопления радионуклидов характеризуются озимые зерновые и картофель, максимальным – бобовые и зернобобовые культуры:

- сортовые различия по накоплению ^{137}Cs в урожае растений составляют в среднем 2–7 раз (для озимой ржи – 2–7, озимой пшеницы – 1,5–5,0, яровой пшеницы – 2–4, ячменя и овса – 1,5–3, для картофеля – 1,5–3, овощей – 2–3 раза);

- севообороты сохраняют плодородие почв и способствуют получению стабильных урожаев сельскохозяйственных культур, служат основой для рационального использования имеющихся в хозяйстве удобрений и приёмов обработки почвы в ротационной системе;

- возделывание ячменя по картофелю, удобренному навозом в дозе 50 т/га, способствует ограничению перехода ^{137}Cs в зерно в 1,4 раза. Содержание ^{137}Cs в зерне ячменя, возделываемого по люпину, повышается на 20–30%;

- чередование сельскохозяйственных культур в севооборотах на дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах с низким содержанием органического вещества

и элементов минерального питания растений должно быть направлено на пополнение запасов гумуса и создание положительного азотного баланса этих почв;

- на эродированных и дефлированных землях вводят почвозащитные зернотравяные и травяно-зерновые севообороты;

- на радиоактивно загрязнённых территориях для пополнения запасов органического вещества и элементов минерального питания растений в общей структуре посевных площадей бобовым культурам следует отводить не более 20–25%, в то время как зерновым – 70–80%.

Перечень приёмов, применяемых при реабилитации радиоактивно загрязнённых сельскохозяйственных угодий, и их эффективность, указаны в табл. 5.

Таблица 5

Эффективность приёмов по снижению накопления радионуклидов в продукции растениеводства и кормопроизводства [2, 11, 14]

Технологический приём	Кратность снижения накопления радионуклидов сельскохозяйственными культурами, раз	
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Обработка почв (вспашка с оборотом пласта, глубокая вспашка)	1,2–3,0	2,0–3,0
Чередование культур (севооборот)	до 1,5	-
Подбор видов и сортов культур с минимальными уровнями накопления	7,0–30,0	3,0–25,0
Известкование (в дозе 1,5–2,0 Н _т)	1,5–2,5	1,5–3,0
Применение органических удобрений	1,2–2,5	1,2–1,5
Применение фосфорных удобрений	1,1–2,5	1,2–3,5
Применение калийных удобрений	1,5–3,5	1,2–1,5
Оптимизация доз применения азотных удобрений	Превышение оптимальных доз ведёт к росту накопления в растениях в 1,2–2,5 раза	
Применение природных сорбентов (цеолиты, глины и др.)	1,2–3,0	1,5–4,0
Применение глинистых минералов и Борофоски	1,5–3,0	-
Совместное внесение извести, органических и минеральных удобрений (фосфорных и калийных)	1,5–3,0	1,5–3,0
Коренное улучшение сенокосов и пастбищ	1,5–6,0	2,0–5,0
Поверхностное улучшение сенокосов и пастбищ	1,5–2,5	1,5–3,0
Осушение + поверхностное улучшение	2,5–5,5	2,5–5,5
Осушение + коренное улучшение	3,0–10,0	2,5–8,0

Приёмы восстановления земель, загрязнённых радионуклидами, носят длительный характер и направлены на ограничение их перехода в сельскохозяйственную продукцию. В табл. 6–7 представлены данные по дозам внесения минеральных, органических удобрений и извести, необходимые для проведения реабилитационных мероприятий при возделывании зерновых культур и картофеля на различных типах почв, в зависимости от плотности загрязнения ^{137}Cs .

Таблица 6

**Мероприятия при возделывании зерновых культур
на сельскохозяйственных землях, загрязнённых ^{137}Cs [9, 11, 14]**

Группа почв	Тип почвы	Плотность загрязнения ^{137}Cs , кБк/м ²	Минеральные удобрения, кг/га			Известь, т/га	Органические удобрения, т/га
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O		
Песчаные и супесчаные	дерново-подзолистые, серые лесные	37–185	60	60	60	5	30
		185–555	60	90	120	6	40
		555–740	70	110	140	8	60
		740–1480	90	135	180	10	80
Суглинистые	дерново-подзолистые, серые лесные, черноземы	37–185	60	60	90	5	30
		185–555	60	90	120	7	40
		555–740	90	120	180	9	60
		740–1480	100	120	180	10	80
Тяжелосуглинистые и глинистые	серые лесные, черноземы	37–185	30	30	60	3	-
		185–555	60	60	90	5	20
		555–740	90	90	140	7	30
		740–1480	120	150	180	8	40
Органические	торфяные и торфяно-глеевые	37–185	30	30	60	5	-
		185–555	60	90	120	7	-
		555–740	80	120	160	10	-
		740–1480	90	140	180	10	-

Мероприятия в кормопроизводстве

В условиях радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий организация кормовой базы является наиболее важным звеном в производстве продукции животноводства. Существует две группы агротехнических приемов, традиционно проводимых на кормовых угодьях – поверхностное и коренное улучшение сенокосов и пастбищ. Проведение традиционных мероприятий по повышению продуктивности

травостоев является эффективным также с точки зрения снижения накопления радионуклидов в травостое.

Приёмы поверхностного улучшения травостоя сенокосов и пастбищ на основе традиционных технологий предполагают сохранение естественной растительности полностью или частично. Для повышения продуктивности сенокосов, пастбищ и питательной ценности кормов проводятся агротехнические приёмы, внесение минеральных удобрений, подсев злаковых и бобовых трав и культур технических мероприятия (удаление кустарников, кочек и кротовин, борьба с сорной луговой растительностью). Поверхностное улучшение травостоя в первую очередь реализуется на эрозионно-опасных угодьях и низкопродуктивных пойменных лугах, засорённых неподаемыми видами трав, имеющих закороченность и закустаренность менее 20%. Поверхностное улучшение травостоя сенокосов и пастбищ повышает их продуктивность на 25–50%. Приемы специальных обработок дернины и почвы на естественных сенокосах и пастбищах (разрушение дернины дискованием, вспашка обычным и двухъярусным плугами, применение раундапа) и замена естественного травостоя сеяным злаковым снижают содержание ^{137}Cs в травостое в 1,5–3,0 раза.

Таблица 7

Мероприятия при возделывании *картофеля* на сельскохозяйственных землях, загрязненных ^{137}Cs [9, 11, 14]

Группа почв	Тип почвы	Плотность загрязнения ^{137}Cs , кБк/м ²	Минеральные удобрения, кг/га			Известь, т/га	Органические удобрения, т/га
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O		
Песчаные и супесчаные	дерново-подзолистые, серые лесные	37–185	60	60	60	3	50
		185–555	60	90	120	4	60
		555–740	90	120	180	5	80
		740–1480	90	120	180	6	80
Суглинистые	дерново-подзолистые, серые лесные, черноземы	37–185	60	60	90	4	40
		185–555	90	120	140	5	50
		555–740	90	135	180	6	60
		740–1480	90	135	180	6	60
Тяжелосуглинистые и глинистые	серые лесные, черноземы	37–185	60	60	90	3	20
		185–555	80	120	160	4	30
		555–740	80	140	180	5	40
		740–1480	80	140	180	6	50
Органические	торфяные и торфяно-глеевые	37–185	30	30	60	5	-
		185–555	60	90	120	7	-
		555–740	100	150	180	8	-
		740–1480	100	150	180	8	-

Коренное улучшение лугов включает вспашку, известкование, внесение минеральных удобрений и замену естественного травостоя на сеяные травы (предпочтительно злаковые). Приёмы коренного улучшения сенокосов и пастбищ на основе традиционных технологий гарантируют повышение их продуктивности в 3–5 раз. С точки зрения обеспечения радиологических критериев безопасности, применение агроメリорантов при коренном улучшении кормовых угодий зависит от типа луга, почвенных показателей, характера загрязнения. Необходимо обеспечить сбалансированность при внесении минеральных удобрений на всех типах лугов. Внесение одних азотных удобрений или несбалансированное применение N, P, K может усиливать усвоение радионуклидов (^{90}Sr и ^{137}Cs) корневой системой трав и привести к повышенному накоплению в урожае.

Оптимальными дозами внесения минеральных удобрений на суходолах на минеральных почвах является $\text{N}_{60}\text{P}_{90}\text{K}_{120}$, или даже $\text{N}_{90}\text{P}_{100}\text{K}_{180}$, которая обеспечивает снижение накопления ^{137}Cs в травостое в 2,7–3,0 раза. Весь комплекс мероприятий коренного улучшения суходольных лугов обеспечивает снижение накопления радионуклидов (^{90}Sr и ^{137}Cs) в травостое до 5,0 раза.

Таблица 8

Мероприятия по поверхностному улучшению сенокосов и пастбищ, загрязнённых ^{137}Cs [9, 12]

Тип луга	Почвы	Плотность загрязнения ^{137}Cs , кБк/м ²	Минеральные удобрения, кг/га по действующему веществу			Известь, т/га
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
Суходольные	дерново-подзолистые песчаные и супесчаные	37–185	45	40	60	5
		185–555	60	90	120	7
	дерново-подзолистые суглинистые	37–185	40	6	80	6
		185–555	90	100	180	8
	черноземы выщелоченные, серые лесные	37–185	30	45	60	3
		185–555	45	60	90	5
Пойменные	аллювиальные супесчаные	37–185	45	60	100	5
		185–555	60	80	120	7
	аллювиальные суглинистые	37–185	-	30	60	6
		185–555	40	60	80	8
Низинные	дерново-глеевые	37–185	50	75	100	5
		185–555	60	90	120	8
Торфяники осушенные	торфяно-глеевые	37–185	70	90	140	6
		185–555	80	110	160	10

На пойменных угодьях рекомендуемые дозы минеральных удобрений составляют $N_{60}P_{90}K_{120}$ или $N_{70}P_{100}K_{140}$. Для получения нормативно чистого сена на пойме соотношение N:K в составе полного минерального удобрения должно быть 1:1,5–2,0. Наиболее надёжным приёмом снижения содержания радионуклидов в травостое при коренной агромелиорации пойменного луга служит известкование в дозе до 4 т/га, внесение минеральных удобрений в дозе $N_{70}P_{100}K_{140}$ и органических до 10 т/га. Снижение накопления ^{137}Cs в травостое при таких мероприятиях – до 5,1 раза.

На болотных лугах с торфяно-болотными почвами доза N снижается до 40–80 кг/га по д.в., а доза K повышается до 160–180 кг/га, при этом соотношение N:P:K должно быть в пределах 1:1–1,5:2–2,5. Снижение накопления ^{137}Cs в травостое – до 6,2 раза.

Эффективным приёмом снижения до 10 раз перехода радионуклидов в травостой переувлажненных лугов (болотных, пойменных) является проведение осушения с последующим коренным улучшением.

Качество кормов, как по питательной ценности, так и по содержанию радионуклидов, можно регулировать при дробном внесении известковых материалов и минеральных удобрений в качестве подкормок при скашивании или стравливании травостоя.

Таблица 9

Мероприятия по коренному улучшению сенокосов и пастбищ, загрязнённых ^{137}Cs [9]

Тип луга	Почвы	Плотность загрязнения ^{137}Cs , КБк/м ²	Минеральные удобрения, кг/га по действующему веществу			Известь, т/га	Органические удобрения, т/га
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O		
Суходольные	дерново-подзолистые песчаные и супесчаные	37–185	45	40	60	4	50–60
		185–555	45	60	90	4	40–50
		555–740	60	90	120	4	-
		740–1480	90	135	180	5	-
	дерново-подзолистые суглинистые и глинистые	37–185	40	45	80	6	40–50
		185–555	45	60	90	7	30–40
		555–740	60	90	120	7	-
		740–1480	90	135	180	7	-
	черноземы выщелоченные, оподзоленные; серые лесные	37–185	30	60	90	3	-
		185–555	45	80	90	5	-
		555–740	60	90	120	5	-
		740–1480	100	150	180	6	-

Пойменные	аллювиальные песчаные и супесчаные	37–185	30	45	60	3	20
		185–555	45	60	90	3	10
		555–740	60	90	120	3	10
		740–1480	70	100	140	4	10
Низинные и осушенные торфяники	дерново-луговые с гумусовым горизонтом 22–25 см	37–185	-	45	60	5	-
		185–555	40	60	90	5	-
		555–740	60	90	120	6	10
		740–1480	80	120	160	8	10
	торфяная с мощностью торфяного слоя свыше 50 см	37–185	40	60	90	4	-
		185–555	45	60	90	4	-
		555–740	60	90	120	6	-
		740–1480	80	100	160	8	-
Осушенные низинные и переходные торфяники	торфяные со слаборазложив- шимся торфом	37–185	60	60	90	5	10
		185–555	60	80	120	6	15
		555–740	80	100	160	8	15
		740–1480	90	135	180	10	20
	торфяные с хорошо разложившимся торфом	37–185	-	45	60	6	-
		185–555	45	70	90	6	-
		555–740	60	90	120	7	-
		740–1480	80	120	160	8	-
	торфяно-глеевые	37–185	30	45	60	5	30
		185–555	45	60	90	5	25
		555–740	60	90	120	10	25
		740–1480	80	120	160	10	25

В табл. 8–9 представлены данные по дозам минеральных, органических удобрений и извести, необходимых для проведения реабилитационных мероприятий при поверхностном и коренном улучшении сенокосов и пастбищ на различных типах почв, в зависимости от плотности загрязнения ^{137}Cs .

Выводы (заключение)

Ведение агропромышленного производства на радиоактивно загрязнённых территориях и реабилитация сельскохозяйственных угодий рассматриваются как целостная система мероприятий, направленных на восстановление и повышение плодородия почвы и получение продукции, соответствующей существующим нормативам.

Нарушенные в результате радиоактивного загрязнения сельскохозяйственные угодья должны восстанавливаться своевременно и с надлежащим качеством. Восстановление проводят в несколько этапов. При этом выделяют мероприятия по восстановлению плодородия и улучшению качества верхнего слоя почвы для последующего сельскохозяйственного использования. Проведение восстановительных работ способствует более быстрой интеграции загрязнённых земель в природную среду.

В условиях радиоактивного загрязнения земель ^{137}Cs и ^{90}Sr качественное выполнение данных мероприятий обеспечивает стабильные урожаи сельскохозяйственных культур и получение продукции растениеводства, соответствующей существующим санитарно-гигиеническим нормативам по содержанию радионуклидов.

Библиографический список

1. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий / Под ред. академика РАСХН В.И. Кирюшина, академика РАСХН А.Л. Иванова. Методическое руководство. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. 784 с.
2. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия-Беларусь). Москва-Минск: МЧС России, МЧС Республики Беларусь, 2009. 139 с.
3. *Баланова О.Ю., Ратников А.Н.* Накопление ^{137}Cs в урожае яровой пшеницы при использовании СУПРОДИТА М и ГЕОТОНА на дерново-подзолистой супесчаной почве // Сборник докладов молодёжной конференции с международным участием «Взгляд молодых учёных на современные проблемы развития радиобиологии, радиозоологии и радиационных технологий» (к 45-летию образования ФГБНУ ВНИИРАЭ). 7–8 сентября 2016 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2016. С. 79–84.
4. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.3.2.1078–01. М.: Минздрав России, 2002. 155 с.
5. Концепция «Обеспечение устойчивого развития агропромышленного производства в условиях техногенеза». М.: Россельхозакадемия, 2003. 66 с.
6. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия / Под ред. Н.Г. Рыбальского. М.: Минприроды России, 1992. 71 с.
7. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
8. *Ратников А.Н., Санжарова Н.И., Жигарева Т.Л., Свириденко Д.Г., Попова Г.И., Петров К.В., Бочкарев С.Н.* Разработка и апробация новых комплексных органоминеральных удобрений // Материалы научно-практической конференции: «Новые перспективные комплексные удобрения для сельскохозяйственного производства» (разработка, опыт применения, эффективность)». 9 ноября 2012 г. / Под ред. А.Н. Ратникова, В.Н. Мазурова. – Обнинск: ГНУ ВНИИСХРАЭ Россельхозакадемии. 2013. С. 7–23.
9. *Ратников А.Н., Санжарова Н.И., Свириденко Д.Г., Жигарева Т.Л., Попова Г.И., Сапожников П.М.* Методические указания по оценке кадастровой стоимости

радиоактивно загрязнённых земель сельскохозяйственного назначения. Обнинск: ГНУ ВНИИСХРАЭ, 2013. 47 с.

10. Ратников А.Н., Свириденко Д.Г., Санжарова Н.И., Жигарева Т.Л., Попова Г.И., Петров К.В., Баланова О.Ю. Влияние новых комплексных удобрений на продуктивность ярового ячменя и накопление Cd, ¹³⁷Cs в урожае // Плодородие, № 1, 2015. С. 45–48.

11. Реестр технологических приёмов восстановления техногенно нарушенных сельскохозяйственных земель. Обнинск: ГНУ ВНИИСХРАЭ РАСХН, 2009. 106 с.

12. Рекомендации по ведению кормопроизводства на радиоактивно загрязнённых сельскохозяйственных угодьях северной части лесостепной зоны. Обнинск: ГНУ ВНИИСХРАЭ РАСХН, 2009. 109 с.

13. Прудников П.В. Использование агрономических руд и новых комплексных минеральных удобрений на радиоактивно загрязнённых почвах. Брянск, 2012. 296 с.

14. Технологические приёмы, обеспечивающие повышение устойчивости агроценозов, восстановление нарушенных земель, оптимизацию ведения земледелия и получение соответствующей нормативам сельскохозяйственной продукции / Под ред. Н.И. Санжаровой. Обнинск, 2010. 180 с.

REHABILITATION ACTIVITIES ON FARM LANDS CONTAMINATED WITH RADIONUCLIDES

A.N. RATNIKOV¹, G.I. POPOVA¹, D.G. SVIRIDENKO¹, S.P. ARYSHEVA¹,
A.A. SUSLOV¹, K.V. PETROV¹, S.P. TORSHIN²

(¹ Russian Scientific Research Institute of Radiology and Agroecology;

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy)

The paper provides an analysis of rehabilitation activities on arable and forage lands radioactively contaminated as a result of the Chernobyl accident and evaluates their efficiency. Quality performance of rehabilitation activities ensures stable crop yields and obtaining crop and forage products corresponding to the existing sanitary-hygienic requirements for the content of radionuclides (¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr). The authors have calculated application rates for mineral and organic fertilizers as well as lime needed to carry out rehabilitation activities for the cultivation of grain crops and potatoes, as well as at the surface and radical improvement of hayfields and pastures on different types of soils, depending on the density of their contamination with ¹³⁷Cs. The high efficiency of liming acid soils to reduce the intake of radionuclides (especially, radiocaesium) in crop products has been shown. The introduction of lime and other lime materials, depending on the level of pollution and soil acidity, contributes to reducing the intake of radionuclides into crops in 1.5–3.0 times. The paper describes new complex fertilizers Borofoska and Nitroborofoska containing macronutrients (nitrogen, phosphorus, potassium, and calcium), and the trace element boron, which have shown high efficiency (reduction of ¹³⁷Cs accumulation in the harvested crop up to 6.8 times) in the Chernobyl accident zone on sod-podzolic soils of light texture. The authors comment on the results of testing a new highly effective organo-mineral fertilizer of a prolonged action based on tripoli – SUPRODIT M – a mixture of a complex sorbent with elements of plant mineral nutrition (N, P, K) enriched with Mg, B and Mo, and an organic component based on peat-containing easily digestible nitrogen and biologically active substances (potassium humates).

Key words: radioactive contamination, radionuclides, agricultural land, rehabilitation activities, efficiency.

References

1. Agroekologicheskaya otsenka zemel', proyektirovaniye adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliya i agrotekhnologiy [Agroecological assessment of land, design of adaptive-landscape farming systems and agrotechnologies] / Ed. by RASKHN akademik V.I. Kiryushin, RASKHN akademik A.L. Ivanov. Methodological guidebook. M.: FGNU "Rosinformagrotekh", 2005. 784 p.
2. Atlas sovremennykh i prognoznykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoy AES na postradavshikh territoriyakh Rossii i Belarusi (ASPA Rossiya-Belarus') [Atlas of modern and projected aspects of the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant in the affected areas of Russia and Belarus (ASPA Russia-Belarus)]. Moskva-Minsk: MCHS Rossii, MCHS Respubliki Belarus', 2009. 139 p.
3. *Balanova O.Yu., Ratnikov A.N.* Nakopleniye ^{137}Cs v urozhaye yarovoy pshenitsy pri ispol'zovanii SUPRODITA M i GEOTONa na dernovo-podzolistoy supeschanoy pochve [Accumulation of ^{137}Cs in the spring wheat crops using SUPRODITIS M and GEOTON on the sod-podzolic sandy soil] // Sbornik dokladov molodozhnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem "Vzglyad molodykh uchonykh na sovremennyye problemy razvitiya radiobiologii, radioekologii i radiatsionnykh tekhnologiy" (k 45-letiyu obrazovaniya FG-BNU VNIIRAE). 7–8 September, 2016. Obninsk: FGBNU VNIIRAE, 2016. Pp. 79–84.
4. Gigiyenicheskiye trebovaniya bezopasnosti i pishchevoy tsennosti pishchevykh produktov. Sanitarno-epidemiologicheskkiye pravila i normativy. SanPiN2.3.2.1078–01 [Hygienic requirements for safety and nutritional value of food. Sanitary-epidemiological rules and regulations. SanPiN2.3.2.1078–01]. M.: Minzdrav Rossii, 2002. 155 p.
5. Kontseptsiya "Obespecheniye ustoychivogo razvitiya agropromyshlennogo proizvodstva v usloviyakh tekhnogeneza" [The concept of "Ensuring the sustainable development of agro-industrial production under the conditions of technogenesis"]. M.: Rossel'khozakademiya, 2003. 66 p.
6. Kriterii otsenki ekologicheskoy obstanovki territoriy dlya vyyavleniya zon chrezvychaynoy ekologicheskoy situatsii i zon ekologicheskogo bedstviya [Criteria for assessing the ecological situation of the territories to identify areas of emergency ecological situation and zones of ecological disaster] / Ed. by N.G. Rybal'skiy. M.: Minprirody Rossii, 1992. 71 p.
7. Normy radiatsionnoy bezopasnosti (NRB-99/2009) [Radiation safety standards (NRB-99/2009)]. M.: Federal'nyy tsentr gigiyeny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2009. 100 p.
8. *Ratnikov A.N., Sanzharova N.I., Zhigareva T.L., Sviridenko D.G., Popova G.I., Petrov K.V., Bochkarev S.N.* Razrabotka i aprobatsiya novykh kompleksnykh organomineral'nykh udobreniy [Developing and testing new complex organo-mineral fertilizers] // Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii: "Novyye perspektivnyye kompleksnyye udobreniya dlya sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva" (razrabotka, opyt primeneniya, effektivnost')". 9 November, 2012. / Ed. by A.N. Ratnikov, V.N. Mazurov. – Obninsk: GNU VNIISKHRAE Rossel'khozakademii. 2013. Pp. 7–23.
9. *Ratnikov A.N., Sanzharova N.I., Sviridenko D.G., Zhigareva T.L., Popova G.I., Sapozhnikov P.M.* Metodicheskiye ukazaniya po otsenke kadaastrovoy stoimosti radioaktivno zagryaznennykh zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Guidelines for assessing the cadastral value of radioactively contaminated farmland]. Obninsk: GNU VNIISKHRAE, 2013. 47 p.
10. *Ratnikov A.N., Sviridenko D.G., Sanzharova N.I., Zhigareva T.L., Popova G.I., Petrov K.V., Balanova O.Yu.* Vliyaniye novykh kompleksnykh udobreniy na produktivnost' yarovogo yachmenya i nakopleniye Cd, ^{137}Cs v urozhaye [The impact of new complex fertilizers on the productivity of spring barley and the accumulation of Cd, ^{137}Cs in the crops] // Plodorodiye, no. 1, 2015. Pp. 45–48.

11. Reyestr tekhnologicheskikh priyomov vosstanovleniya tekhnogenno narushennykh sel'skokhozyaystvennykh zemel' [Register of technological methods for the restoration of technologically disturbed agricultural lands]. Obninsk: GNU VNIISKHRAE RASKHN, 2009. 106 p.

12. Rekomendatsii po vedeniyu kormoproizvodstva na radioaktivno zagryaznonnykh sel'skokhozyaystvennykh ugod'yakh severnoy chasti lesostepnoy zony [Recommendations for fodder production in radioactively contaminated farmlands of the northern part of the forest-steppe zone]. Obninsk: GNU VNIISKHRAE RASKHN, 2009. 109 p.

13. *Prudnikov P.V.* Ispol'zovaniye agronomicheskikh rud i novykh kompleksnykh mineral'nykh udobreniy na radioaktivno zagryaznonnykh pochvakh [Use of agricultural rocks and new complex mineral fertilizers on radioactively contaminated soils]. Bryansk, 2012. 296 p.

14. Tekhnologicheskiye priyomy, obespechivayushchiye povysheniye ustoychivosti agrotsenozov, vosstanovleniye narushennykh zemel', optimizatsiyu vedeniya zemledeliya i polucheniye sootvetstvuyushchey normativam sel'skokhozyaystvennoy produktsii [Technological methods to improve the sustainability of agrocenoses, disturbed land restoration, farming optimization and obtaining the appropriate standards of farm produce] / Ed. by N.I. Sanzharov. Obninsk, 2010. 180 p.

Александр Николаевич Ратников, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник. Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии (ВНИИРАЭ) г. 249032 Обнинск Калужской обл., Киевское шоссе, 108 км. Тел. моб.: 8(910)5401555. E-mail: ratnikov-51@mail.ru.

Галина Ивановна Попова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник. Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии (ВНИИРАЭ). г. 249032 Обнинск Калужской обл., Киевское шоссе, 108 км. Тел. раб.: (48439)96972, 96329. E-mail: ratnikov-51@mail.ru.

Дмитрий Георгиевич Свириденко, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник. Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии (ВНИИРАЭ). г. 249032 Обнинск Калужской обл., Киевское шоссе, 108 км. Тел. раб.: (48439)96972, 96493. Тел. моб.: 8(961)1204194. E-mail: iglina-lv@mail.ru.

Светлана Петровна Арышева, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник. Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии (ВНИИРАЭ). г. 249032 Обнинск Калужской обл., Киевское шоссе, 108 км. Тел. раб.: (48439)96972. E-mail: ratnikov-51@mail.ru.

Алексей Афанасьевич Сулов, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник. Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии (ВНИИРАЭ). г. 249032 Обнинск Калужской обл., Киевское шоссе, 108 км. Тел. раб.: (48439)96972, 96406. Тел. моб.: 8(910)5418976. E-mail: ratnikov-51@mail.ru.

Константин Владимирович Петров, научный сотрудник. Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии (ВНИИРАЭ). г. 249032 Обнинск Калужской обл., Киевское шоссе, 108 км. Тел. раб.: (48439)96972, 96329. Тел. моб.: 8(903)8140670. E-mail: ratnikov-51@mail.ru.

Сергей Порфирьевич Торшин, доктор биологических наук, профессор. Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева. 127550 Москва, ул. Тимирязевская, 49. Тел.: (499) 976-40-24, E-mail: spstorshin@rambler.ru.

Aleksandr N. Ratnikov, DSc (Ag), Professor, Key Research Associate, Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, phone: (48439)96972, 96406. E-mail: ratnikov-51@mail.ru. Obninsk, Kaluga region, Kievskoe shosse, 109 km, 249032, Russia.

Galina I. Popova, PhD (Bio), Senior Research Associate, Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, phone: (48439)96972, 96406. E-mail: ratnikov-51@mail.ru. Obninsk, Kaluga region, Kievskoe shosse, 109 km, 249032, Russia.

Dmitry G. Sviridenko, PhD (Bio), Senior Research Associate, Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, phone: (48439)96972, 96406. E-mail: ratnikov-51@mail.ru. Obninsk, Kaluga region, Kievskoe shosse, 109 km, 249032, Russia.

Svetlana P. Arysheva, PhD (Bio), Senior Researcher., Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, phone: (48439)96972, 96406. E-mail: ratnikov-51@mail.ru. Obninsk, Kaluga region, Kievskoe shosse, 109 km, 249032, Russia.

Aleksei A. Suslov, PhD (Ag), Key Research Associate, Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, phone: (48439)96972, 96406. E-mail: ratnikov-51@mail.ru. Obninsk, Kaluga region, Kievskoe shosse, 109 km, 249032, Russia.

Konstantin V. Petrov, Research Associate, Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, phone: (48439)96972, 96406. E-mail: ratnikov-51@mail.ru. Obninsk, Kaluga region, Kievskoe shosse, 109 km, 249032, Russia.

Sergey P. Torshin, DSc (Bio), Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 127550 Moscow Timiryazevskaya Str., 49, phone: (499) 976-40-24, E-mail: sptorshin@rambler.ru, Russia.