DOI: 10.21870/0131-3878-2021-30-2-50-61

УДК 614.876:631.438:633.2

Оценка эффективности реабилитации лугопастбищных угодий на различных этапах после аварии на Чернобыльской АЭС

Кузнецов В.К., Исамов Н.Н., Панов А.В.

ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии, Обнинск

В работе представлены результаты анализа радиоэкологической эффективности коренного улучшения сенокоса и пастбища, проведённых в 2004 г. в ареале населённого пункта Веприн Брянской области, подвергнувшегося радиоактивному загрязнению после аварии на ЧАЭС. Коренная мелиорация лугопастбищных угодий, направленная на снижение поступления ^{137}Cs в корма (трава, сено) и далее в продукцию животноводства (молоко), включала глубокую перепахку почвы, известкование, внесение повышенных доз минеральных удобрений и высев травосмесей. Оценка эффективности коренного улучшения дана для первых трёх лет после проведения реабилитационных работ и через 15 лет. Показано, что агротехнические мероприятия позволили уменьшить плотность поверхностного загрязнения ^{137}Cs почвы сельскохозяйственных угодий в 1,8 раза. Проведение коренного улучшения пастбища, расположенного в пойме реки, дало возможность снизить плотность поверхностного загрязнения ^{137}Cs в 2,7 раза, мощность дозы – в 1,9 раза. Отмечено, что критическими по накоплению ^{137}Cs в травостое и аккумулярованию радионуклидов в пойме реки являются пониженные геоморфологические элементы ландшафта, где преобладают торфяные почвы. В первые три года после коренного улучшения пастбища переход ^{137}Cs в травостой уменьшился в 3 раза, на окультуренном сенокосе после агроулучшения до 8 раз. Через 15 лет после реабилитационных работ потенциал коренной мелиорации значительно снизился, однако накопление ^{137}Cs в травостое сенокоса было меньше по сравнению с неокультуренными участками в 1,6 раза. На пастбище эта разница составила 1,8 раза. За счёт коренного улучшения лугопастбищных угодий содержание ^{137}Cs в молоке в первые годы после реабилитации снизилось в 3,3 раза, через 15 лет кратность снижения составила 1,5 раза. Полученные результаты будут востребованы при оптимизации стратегий реабилитации радиоактивно загрязнённых сельскохозяйственных земель вследствие аварии на ЧАЭС.

Ключевые слова: ЧАЭС, ^{137}Cs , Брянская область, сенокосы, пастбища, радиоактивное загрязнение, вертикальное распределение, загрязнение сельскохозяйственной продукции, защитные мероприятия, радиационная защита, мониторинг, коэффициенты перехода.

Введение

После аварии на Чернобыльской АЭС сельское население, проживающее в радиоактивно загрязнённых регионах, оказалось в наибольшей степени подвержено дополнительному облучению за счёт потребления местных продуктов питания с повышенным содержанием наиболее радиологически значимых ^{137}Cs и ^{90}Sr [1]. Поскольку минимизация поступления радионуклидов в организм человека с природными пищевыми продуктами ограничивалась, в основном, запретительными мерами, что давало значимый эффект лишь в первые годы после аварии, применение защитных мероприятий в аграрном секторе стало ведущим направлением в системе комплексной реабилитации пострадавших от аварии на ЧАЭС сельских территорий, включая и населённые пункты. При этом из всех сельскохозяйственных пищевых продуктов, содержащих радионуклиды, наибольший вклад в дозу внутреннего облучения населения вносило молоко. Поэтому при разработке стратегий реабилитации в сельском хозяйстве защитные мероприятия в животноводстве и кормопроизводстве имели приоритет [1, 2].

Кузнецов В.К. – гл. науч. сотр., д.б.н.; Исамов Н.Н. – вед. науч. сотр., к.б.н.; Панов А.В.* – зам. директора, д.б.н., проф. РАН. ФГБНУ ВНИИРАЭ.

*Контакты: 249032, Калужская обл., Обнинск, Киевское шоссе, 109-й км. Тел.: (484) 399-69-59; e-mail: riag@mail.ru.

При широкомасштабном радиоактивном загрязнении организация кормовой базы сельскохозяйственных животных является важнейшим звеном в производстве пищевых продуктов, отвечающих радиологическим нормативам, поскольку позволяет снизить миграцию радионуклидов по цепочке почва-растения (корм)-сельскохозяйственные животные-продукция животноводства (молоко, мясо). Стоит отметить, что продуктивность природных сенокосов и пастбищ в наиболее пострадавших от аварии на ЧАЭС районах Брянской области достаточно низкая. Поэтому для снижения накопления радионуклидов в травостое лугопастбищных угодий был разработан комплекс агромелиоративных технологий, включающий: агротехнические (перепашка почвы на различную глубину), позволяющие перераспределить радионуклиды в почвенном профиле, а также агрохимические (известкование и внесение повышенных доз минеральных удобрений), направленные на изменение свойств почвы путём повышения её сорбционной способности, снижение подвижности радионуклидов в почве и их доступности для поглощения корневой системой растений. На заключительной стадии мелиорации высев на обработанных площадях травосмесей с низким накоплением радионуклидов позволяет дополнительно уменьшить переход ^{137}Cs и ^{90}Sr в травостой и повышает продуктивность кормовых угодий [3].

Понимая важность решения проблем по снижению доз облучения жителей сельских населённых пунктов, как наиболее «критичной» группы населения, в 2003 г. МАГАТЭ был инициирован региональный проект RER 9074 «Стратегии долговременных защитных мероприятий и мониторинг облучения сельского населения, подверженного воздействию аварии на ЧАЭС», в рамках которого в России, Беларуси и Украине на примере наиболее радиоактивно загрязнённых тестовых населённых пунктов отработывались сельскохозяйственные технологии, направленные на снижение доз внутреннего облучения населения [4]. В России таким населённым пунктом стала деревня Веприн Клиновского района Брянской области. Весной 2004 г. на двух участках в ареале этого населённого пункта были проведены работы по коренному улучшению пастбища и созданию окультуренного сенокоса на землях заброшенной пашни, для получения кормов (травы и сена) с пониженным содержанием ^{137}Cs и, соответственно, меньшим переходом этого радионуклида в молоко коров в частных хозяйствах, потребляемое местным населением. Эффективность внедрения предложенных технологий для данного населённого пункта была обоснована с помощью многокритериального анализа как по радиоэкологическим критериям, так и по экономическим, а также социально-психологическим показателям [5]. В то же время отмечалось, что радиоэкологическая эффективность коренной мелиорации сохраняется в течение 4-х лет, далее она уменьшается. Однако количественных параметров снижения эффекта от применения агро-мелиоративных технологий на длительном промежутке времени ранее показано не было.

Проблема получения на радиоактивно загрязнённых территориях кормов сельскохозяйственных животных, соответствующих радиологическим стандартам, имеет долгосрочный характер [6]. Особенно она актуальна для частного сектора сельских населённых пунктов. Так, по последним данным зонирования 2017 г. [7] в юго-западных районах Брянской области остаются 135 населённых пунктов с дозой облучения жителей выше 1 мЗв/год, и где необходимо проведение защитных и реабилитационных мероприятий. Большая часть этих населённых пунктов относится к категории сельских, или они являются таковыми по типу питания жителей. Вклад в дозу внутреннего облучения населения в них от ^{137}Cs , содержащегося в молоке из частного сектора, до 3-х раз выше по сравнению с другими сельскохозяйственными продуктами местного производства [8].

Целью работы является оценка радиоэкологической эффективности коренного улучшения сенокосов и пастбищ на радиоактивно загрязнённых вследствие аварии на ЧАЭС территориях в первые годы и через 15 лет после проведения агромелиоративной реабилитации.

Материалы и методы

Населённый пункт Веприн (ранее Веприно) относится к зоне отселения и в 2004 г. (начало эксперимента) в нём проживало 254 человека, которые содержали 22 коровы в частных хозяйствах и 36 коз [9]. Среднегодовая доза облучения жителей населённого пункта составляла 5,35 мЗв, причём вклад внутреннего облучения был доминирующим (4,4 мЗв/год). Плотность загрязнения ^{137}Cs территории населённого пункта по официальным данным равнялась 617 кБк/м² [10]. Населённый пункт окружён сельскохозяйственными угодьями агропредприятия «Майский», которые включают: пашню, кормовые угодья (заливные луга, сенокосы и пастбища), а также сады. По данным радиологического обследования ФГБУ «Брянскагрохимрадиология» на 2002 г. плотность загрязнения ^{137}Cs пашни в хозяйстве варьировала в пределах 163-532 кБк/м², лугопастбищных угодий – от 248 до 1014 кБк/м². Жители Веприна традиционно используют луга, расположенные вблизи населённого пункта в поймах ближайших рек Вепринка и Ипуть, для выпаса частного скота и заготовки сена. Большой процент торфяников в почвенном покрове лугопастбищных угодий определяет высокие уровни загрязнения ^{137}Cs молока частных коров, что в значительной мере влияет на формирование дозы внутреннего облучения жителей населённого пункта. Для отработки технологий коренного улучшения лугопастбищных угодий и оценки их эффективности в ареале д. Веприн были выбраны 4 контрольных участка (рис. 1). На двух из них (КУ-1 и КУ-3) проведён комплекс работ по коренной мелиорации, два других (КУ-2 и КУ-4) являлись контролем с целинными землями.

Рис. 1. Карта-схема контрольных участков лугопастбищных угодий д. Веприн.

При выборе участков, на которых проводилось коренное улучшение, учитывались: их площадь (для возможности обеспечения кормами всех частных коров в населённом пункте), плотность загрязнения ^{137}Cs , характеристики почв, отсутствие ранее проведённых контрмер, удобство использования (расстояние до населённого пункта и наличие дороги для доставки сена), а также разрешение администрации хозяйства «Майский» на проведение агромелиоративных работ и дальнейшее использование этих земель населением для выпаса скота (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика контрольных участков лугопастбищных угодий д. Веприн

Показатель	Контрольный участок			
	КУ-1	КУ-2	КУ-3	КУ-4
Номер агрохимического участка	74	89	95	90
Направление использования	Пашня* Сенокос	Сад	Заливной луг (пастбище)	
Площадь общая (реабилитированная), га	35 (20)	14	32 (11)	56
Плотность загрязнения ¹³⁷ Cs в 2002 г., «Бк/м ² (по данным ФГБУ «Брянскагрохимрадиоэкология»)	278	392	525	585
Тип (подтип) почвы	Дерново-подзолистая		Дерново-глеевая оторфованная	
Гранулометрический состав почвы	Супесчаный			
Агрохимические показатели почв				
pH _{KCl}	5,33±0,19 5,51±0,22	4,70	5,08±0,17 6,10±0,21	4,50±0,57
H _r , мг-экв/100 г почвы	2,39±0,17 2,08±0,14	-	1,72±0,17 0,60±0,11	-
S _{обм} , мг-экв/100 г почвы	3,71±0,59 4,4±0,74	-	7,07±0,61 6,88±0,58	-
P ₂ O ₅ , мг/кг почвы	118,6±12,1 142,0±16,0	103	50,0±17,1 191,0±34,0	25,5±0,7
K ₂ O, мг/кг почвы	37,1±4,3 123,8±18,9	45	49,7±14,2 156,2±16,4	32,0±2,1

* числитель – до реабилитации, знаменатель – после реабилитации.

На участке КУ-1, который расположен на землях заброшенной пашни, были проведены работы по созданию окультуренного сенокоса. Комплекс технологических операций включал: внесение фосфоритной муки в дозе 1 т/га с перепашкой почвы на глубину 20-25 см; внесение с помощью дисковых борон и культиваторов извести в дозе 5 т/га, а также минеральных удобрений в дозе N32P332K152; посев покровной культуры – овса (сорт Скаун с нормой высева 150 кг/га) для подавления роста сорняков с последующим высевом травосмеси (тимофеевка – 8,75 кг/га, овсяница луговая – 8,75 кг/га и красный клевер – 5,0 кг/га). Поддержание продуктивности травостоя осуществлялось дополнительным внесением калийных удобрений в дозе 15 кг/га действующего вещества K₂O после каждого укоса. Расположенный рядом участок КУ-2 в саду (до аварии на ЧАЭС также использовался под пашню) являлся контролем для оценки радиоэкологической эффективности проведённой коренной мелиорации.

На участке КУ-3, примыкающем к д. Веприн, местное население организует выпас коров. На этом пастбище было проведено коренное улучшение, которое включало: выравнивание участка (удаление кочек и неровностей); внесение фосфоритной муки в дозе 1,8 т/га; перепашку почвы на глубину 30-35 см; внесение с помощью дисковых борон и культиваторов извести в дозе 4,55 т/га, минеральных удобрений в дозе N32P332K152; посев травосмеси (тимофеевка – 7,73 кг/га, овсяница луговая – 7,73 кг/га, красный клевер – 2,72 кг/га и белый клевер – 2,73 кг/га). Расположенный рядом пастбищный участок КУ-4 со схожими уровнями радиоактивного загрязнения и почвенными характеристиками использовался в качестве контроля для оценки радиоэкологической эффективности проведённого коренного улучшения.

Качество работ по коренной мелиорации оценивалось как равномерностью плотности поверхностного загрязнения ^{137}Cs участков, так и оценкой вертикального распределения радионуклидов в почвенном профиле. Жители Веприна начали использовать улучшенное пастбище весной, а сенокос – летом 2005 г. Мониторинговые исследования по оценке радиоэкологической эффективности агрономелиоративных мероприятий проводились в 2004 г. до и после реабилитации

участков, в последующие два года (2005-2006 гг.) и через 15 лет (2018 г.). Мониторинг включал отбор проб почвы, травостоя (сопряжённого с почвой), сена, молока и их измерение на содержание ^{137}Cs . Одновременно с отбором образцов почвы на контрольных участках проводилось измерение мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД).

Результаты

Радиоэкологическая эффективность коренной мелиорации лугопастбищных угодий на участках КУ-1 и КУ-3 оценивалась по кратности снижения плотности поверхностного загрязнения ^{137}Cs (табл. 2) и содержания этого радионуклида в травостое (табл. 3) до и после проведения агрономелиоративных работ, а также с использованием параметров миграции ^{137}Cs и сопоставлением аналогичных показателей с контролем (участки КУ-2 и КУ-4).

Таблица 2

Динамика загрязнения ^{137}Cs почв контрольных участков лугопастбищных угодий д. Веприн

Год	КУ-1			КУ-2		КУ-3			КУ-4		
	МАЭД*	УА*	ПЗ*	УА	ПЗ	МАЭД	УА	ПЗ	МАЭД	УА	ПЗ
2004 до реабилитации	30±3	1582±237	268±34	4264±1354	485±163	89±4	8478±2851	960±251	73±3	4358±1960	525±136
2004 после реабилитации	27±2	1548±240	262±39	Коренное улучшение не проводилось		46±5	3177±1287	359±143	Коренное улучшение не проводилось		
2005	28±4	1571±272	267±46	4189±1438	502±172	35±4	4646±1510	526±171	57±9	5048±2076	606±147
2006	26±3	1559±183	265±31	4489±1123	508±127	34±5	4626±1449	525±162	54±2	3582±1113	406±126
2018	21±2	745	126	3058	347	29±3	2645	302	43±3	2253±1316	271±117
Коэффициент вариации, %	12,7	26,2	26,3	16,0	16,6	52,6	48,4	48,3	21,8	31,5	32,3

* МАЭД – мощность амбиентного эквивалента дозы, мкЗв/ч; УА – удельная активность, Бк/кг; ПЗ – плотность загрязнения, кБк/м².

Таблица 3

Динамика параметров перехода ^{137}Cs из почвы в травостой контрольных участков лугопастбищных угодий д. Веприн

Год	КУ-1			КУ-2			КУ-3			КУ-4		
	УА*	КН*	КП*	УА	КН	КП	УА	КН	КП	УА	КН	КП
2004 до реабилитации	256±40	0,162	0,96	185±25	0,043	0,38	2300±190	0,271	2,40	3819±1822	0,876	7,27
2004 после реабилитации	30±8	0,019	0,11	Коренное улучшение не проводилось			478±110	0,151	1,33	Коренное улучшение не проводилось		
2005	29±12	0,018	0,11	180±23	0,043	0,36	1149±177	0,247	2,18	4273±2006	0,847	7,05
2006	28±13	0,018	0,11	165±37	0,037	0,33	1088±525	0,235	2,07	3225±820	0,900	7,94
2018	59	0,079	0,47	97	0,032	0,28	811	0,306	2,69	1283	0,569	4,73
Коэффициент вариации, %	123,2	106,7	106,2	26,0	13,7	12,9	59,0	23,8	23,8	41,8	19,3	20,7

* УА – удельная активность в травостое, Бк/кг; КН – коэффициент накопления (Бк/кг)/(Бк/кг); КП – коэффициент перехода, (Бк/кг)/(кБк/м²).

Поскольку участок КУ-1 до создания на нём окультуренного пастбища использовался в качестве пашни с ежегодной перепашкой, то перераспределение радионуклидов в почве к моменту проведения коренной мелиорации в 2004 г. уже произошло и снижение плотности поверхностного загрязнения ^{137}Cs , а также МАЭД было выражено слабо (табл. 2). Эффект от ранее проведённых агротехнических работ подтверждается и разницей в плотностях загрязнения ^{137}Cs между расположенными рядом участками КУ-1 и КУ-2 (целина), которая на начало эксперимента

составляла 1,8 раза и в дальнейшем сохранялась на том же уровне. При сравнении данных о распределении ^{137}Cs в почвенном профиле на пашне (КУ-1) и целинном участке (КУ-2) отмечено, что на первом оно достаточно равномерное за счёт перепашки, в то время как на необработанном участке более 80% ^{137}Cs находилось в верхнем 0-5 см слое почвы (рис. 2), что достаточно хорошо коррелирует с данными работы [11].

Рис. 2. Распределение ^{137}Cs в почвенном профиле окультуренного сенокоса (КУ-1) и сада (КУ-2) в районе д. Веприн в 2004 г.

Через 15 лет (2018 г.) плотности загрязнения ^{137}Cs обоих участках закономерно снизились, что обусловлено распадом радионуклидов. Так, на участке КУ-1 она стала 126 кБк/м² (по модели распада – 185 кБк/м²), на участке КУ-2 – 347 кБк/м² (по модели – 343 кБк/м²). Несколько меньшая фактическая плотность загрязнения ^{137}Cs участка КУ-1, в сравнении с модельными расчётами по распаду радионуклида, по всей видимости обусловлена более активной миграцией ^{137}Cs в почве, подвергшейся коренной мелиорации.

Пастбищные участки КУ-3 и КУ-4 расположены в пойме р. Вепринка и характеризуются более сложными процессами перераспределения радионуклидов, включающими как вертикальную, так и горизонтальную миграцию. Территорию поймы можно разделить на несколько типологических комплексов: русловый вал, верхняя, средняя (центральная) и нижняя части поймы, которые представлены, соответственно, различными возвышенностями или, наоборот, понижениями [12]. Так, например, в 2004 г. до проведения коренного улучшения на участке КУ-3, плотность загрязнения ^{137}Cs при среднем значении 960 кБк/м² в верхней и нижней частях поймы отличались в 2,7 раза. Максимальными уровнями радиоактивного загрязнения характеризовался участок нижней поймы (рис. 3А), минимальными – прирусловая часть поймы (рис. 3В). Такие различия обусловлены аккумулятивными процессами при вторичном перераспределении выпавших после аварии радионуклидов в период весеннего паводка и ливневых осадков [12]. Почвенный покров пойменных участков также разнообразен и варьирует от дерново-глеевых, местами слоистых в ближней части руслового вала и возвышенных частей поймы (рис. 3В) до торфяников в низкой пойме (рис. 3А), где мощность торфа достигает 70 см. Это также определяет закономерности вертикального распределения ^{137}Cs по профилю почвенных горизонтов. Через 15 лет после проведения коренного улучшения пастбища на участке КУ-3 закономерности распределения радионуклидов в зависимости от гидрологических режимов на возвышенных и пониженных частях поймы, а также различных свойств почв, сохранились (рис. 3).

Рис. 3. Распределение ^{137}Cs в почвенном профиле пастбища КУ-3 (А – мощность торфа 70 см, Б – мощность торфа 30 см, В – мощность торфа до 15 см) и пастбища КУ-4 (Г) рядом с д. Веприн в 2004 и 2018 гг.

При коренном улучшении природных лугопастбищных угодий происходит перераспределение радионуклидов в более глубокие слои почвы, что влияет на снижение плотности поверхностного загрязнения и МАЭД. Это видно на примере участка КУ-3, где после реабилитации плотность поверхностного загрязнения ^{137}Cs снизилась в 2,7 раза, МАЭД – в 1,9 раза (табл. 2). Более значительное снижение плотности загрязнения ^{137}Cs на пастбище, по сравнению с сенокосом, объясняется разницей в глубине перепахки участков КУ-1 и КУ-3.

Проведение коренной мелиорации сенокосов и пастбищ повлияло не только на снижение плотности поверхностного загрязнения ^{137}Cs , но и на уменьшение доступности перехода радионуклидов в растения. Пахотные земли, где был сформирован окультуренный сенокос (КУ-1), расположены на дерново-подзолистых супесчаных почвах. Эти почвы имеют кислую реакцию почвенного раствора, низкое содержание гумуса и калия, среднее содержание фосфора. Почвенный покров пастбища (КУ-3) представлен пойменными заболоченными и дерново-глеевыми, местами слоистыми почвами, которые характеризуются высокой кислотностью и очень низким содержанием минеральных питательных веществ. Применение в ходе реабилитационных работ повышенных доз агроメリорантов позволило увеличить содержание в почве элементов питания растений (калия и фосфора), а также ёмкости катионного обмена. Кроме того, за счёт известкования была отмечена тенденция к снижению кислотности почвы (табл. 1).

Создание окультуренного сенокоса на участке КУ-1 позволило уменьшить содержание ^{137}Cs в травостое, в среднем, до 8 раз (табл. 3). Эффект от данного мероприятия варьировал в разных частях сенокоса от 4 до 12 раз, однако был стабилен и сохранял высокую эффективность как минимум первые три года после проведения агроメリоративных работ. Через 15 лет после

реабилитации потенциал внесённых агроメリорантов и высеянных трав по снижению накопления ^{137}Cs в кормах существенно снизился. Произошло некоторое повышение удельной активности радионуклидов в травостое (до 60 Бк/кг). Однако по сравнению с контрольным участком (КУ-2), где значения КН уменьшились за 15 лет в 1,3 раза, на окультуренном сенокосе эта разница была выше – 2,1 раза. При этом содержание ^{137}Cs в растительности окультуренного сенокоса было в 1,6 раза ниже по сравнению с контролем (табл. 3). Учитывая, что содержание ^{137}Cs в травостое сенокоса находится в последние годы на уровне, ниже норматива (100 Бк/кг по ВП 13.5.13/06-01), агроメリоративные работы на данном участке следует проводить только для повышения его продуктивности.

Природные особенности пойменного участка КУ-3 в значительной степени влияют на накопление радионуклидов в травостое. Так, минимальное содержание ^{137}Cs отмечено в растениях, произрастающих ближе к русловому валу. При этом по мере приближения к наиболее низкой части поймы возрастает плотность загрязнения, меняются свойства почв и увеличивается накопление радионуклидов в растениях. Следует отметить, что содержание ^{137}Cs в растениях руслового вала и в наиболее возвышенной части поймы, характеризующихся сходным почвенным покровом, примерно одинаковое. Наиболее высоким содержанием ^{137}Cs характеризуются растения в нижней части поймы, где распространены наиболее мощные торфяные почвы и аккумуляровано наибольшее количество радионуклидов. Различия в накоплении ^{137}Cs в растениях руслового вала и нижней части поймы достигают 8 раз и более [12].

Проведение коренного улучшения пастбища (КУ-3) также было достаточно эффективно. Так, в первый год после агроメリоративных мероприятий удельная активность ^{137}Cs в травостое снизилась в 4,8 раза. В последующие два года она несколько возросла (кратность снижения составила 2,0-2,1 раза). Однако в среднем, для 3-летнего периода, кратность снижения ^{137}Cs в травостое пастбища была на уровне 2,97 раза, что для почв, содержащих большой процент торфяников и где наблюдаются максимальные коэффициенты перехода радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию, является хорошим показателем. Через 15 лет после проведения коренного улучшения на участке (КУ-3) эффективность реабилитационных работ несколько снизилась. Коэффициент перехода ^{137}Cs в растения с 1,3-2,2 (Бк/кг)/(кБк/м²) вырос до 2,7 (Бк/кг)/(кБк/м²), однако он оставался существенно ниже, чем на соседнем, необработанном участке (КУ-4), где равнялся 4,7 (Бк/кг)/(кБк/м²). Поскольку травостой на участке КУ-3 в последние годы остаётся с превышением радиологического норматива, технологические операции, входящие в коренную мелиорацию (кроме глубокой перепашки почв), рекомендуется повторить.

При оценке эффективности коренного улучшения лугопастбищных угодий важно проанализировать поступление ^{137}Cs из почвы не только в травостой, но и накопление радионуклидов в сене, а также конечной продукции животноводства – молоке и мясе. В 2004 г. до начала работ по коренной мелиорации экспериментальных участков на частных подворьях д. Веприн, где содержались коровы, были отобраны пробы сена и молока, проведено прижизненное определение содержания ^{137}Cs в мышцах коров. Так, среднее содержание ^{137}Cs в молоке оказалось на уровне 432 Бк/л (что более чем в 4 раза превышало норматив СанПин 2.3.2.1078-01), в говядине – 750 Бк/кг (выше норматива в 4,7 раза). Уже в 2004 г. после проведения коренного улучшения двух участков, за счёт поступления в рацион коров травы первых укосов с низким содержанием ^{137}Cs , удалось снизить загрязнение молока в 1,6 раза (табл. 4). К 2006 г., когда на пойменном участке проводился полноценный выпас коров, и они получали относительно «чистое» сено в стойловый

период, уровень содержания ^{137}Cs в молоке снизился до 133 Бк/л. Таким образом, проведение коренной мелиорации двух лугопастбищных участков позволило уменьшить содержание ^{137}Cs в молоке в 3,25 раза, что хорошо коррелирует со средним снижением загрязнения травостоя экспериментальных участков после проведения реабилитационных работ.

Таблица 4

Динамика содержания ^{137}Cs в сене с контрольных участков лугопастбищных угодий и молоке д. Веприн, Бк/кг(л)

Год	Сено			Молоко
	КУ-1	КУ-3	КУ-4	
2004 до реабилитации	490±236	1837±528	6430±3164	432±199
2004 после реабилитации	Заготовка сена после коренного улучшения			296±201
2005	48±36	1391±491	6078±3505	313±127
2006	53±28	1054±350	5619±3553	133±86
2018 (расчёт) [13]	95	1340	2065	123±85
Коэффициент вариации, %	124,4	23,0	39,9	50,5
Норматив	400 (по ВП 13.5.13/06-01)			100 (по СанПин 2.3.2.1078-01)

К 2018 г. в связи со складывающейся демографической ситуацией в населённом пункте жители отказались от содержания коров, используя для получения молока только коз. Однако по модельным расчётам, на основе данных о рационах питания коров и уровней загрязнения радионуклидами кормов с исследуемых участков за 2018 г., можно оценить потенциальное содержание ^{137}Cs в молоке на уровне 123 Бк/л, что несколько превышает норматив СанПин 2.3.2.1078-01. Однако в случае использования населением кормов с участков, не подвергшихся реабилитации, содержание ^{137}Cs в молоке оказалось бы в 1,6 раза выше – на уровне 195 Бк/л.

Заключение

Результаты радиэкологической оценки эффективности реабилитации кормовых угодий, расположенных на радиоактивно загрязнённых территориях, показали высокий потенциал коренного улучшения пастбищ и создания окультуренных сенокосов по снижению накопления радионуклидов в сельскохозяйственной продукции. Так, в первые годы после проведения коренной мелиорации лугопастбищных угодий снижение поступления ^{137}Cs в травостой реабилитированных участков составляло 3-8 раз, в молоко – 3,3 раза. Через 15 лет после реабилитации эффективность агромелиоративных мероприятий заметно снизилась до 1,6-1,8 раза по снижению накопления радионуклидов в кормах и молоке, что обусловлено, в основном, эффектом от перераспределения радионуклидов в почве за счёт перепашки. Полученные многолетние данные наблюдений за изменением радиэкологической обстановки на лугопастбищных угодьях, подвергшихся коренному улучшению, можно использовать для обоснования целесообразности проведения реабилитационных мероприятий, обеспечивающих радиационную безопасность населения и производство радиологически безопасной сельскохозяйственной продукции на радиоактивно загрязнённых территориях. Результаты исследования могут также применяться для уточнения и корректировки стратегий реабилитации радиоактивно загрязнённых сельскохозяйственных земель и оптимизации использования лугопастбищных угодий, подвергшихся ранее коренной мелиорации.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-19-00016).

Литература

1. Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Environment" (EGE). Vienna: IAEA, 2006. 166 p.
2. **Алексахин Р.М., Фесенко С.В., Санжарова Н.И., Ульянов Л.Н., Филипас А.С., Панов А.В.** Концепция реабилитации загрязнённых сельскохозяйственных угодий в отдалённый период после аварии на Чернобыльской АЭС //Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2003. № 3. С. 14-17.
3. Сельскохозяйственная радиозоология /под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М.: Экология, 1992. 400 с.
4. **Fesenko S., Jacob P., Ulanovsky A., Chupov A., Bogdevich I., Sanzharova N., Kashparov V., Panov A., Zhuchenka Yu.** Justification of remediation strategies in the long term after the Chernobyl accident //J. Environ. Radioact. 2013. V. 119. P. 39-47.
5. **Панов А.В., Фесенко С.В., Алексахин Р.М.** Оптимизация защитных мероприятий в сельских населённых пунктах в зоне аварии на Чернобыльской АЭС //Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2005. № 3. С. 3-6.
6. **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. 36-46.
7. **Брук Г.Я., Романович И.К., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Власов А.Ю., Громов А.В., Жеско Т.В., Кадука М.В., Кравцова О.С., Сапрыкин К.А., Степанов В.С., Титов Н.В., Яковлев В.А.** Средние годовые эффективные дозы облучения в 2017 году жителей населённых пунктов Российской Федерации, отнесённых к зонам радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС (для целей зонирования населённых пунктов) //Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 4. С. 73-78.
8. **Братилова А.А., Брук Г.Я.** Влияние потребления различных пищевых продуктов на формирование доз внутреннего облучения взрослого населения Российской Федерации после аварии на Чернобыльской АЭС //Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 53-59.
9. Паспорт безопасности проживания на радиоактивно загрязнённых территориях. Населённый пункт Веприн Клиновского района Брянской области. Обнинск: ГНУ ВНИИСХРАЭ, 2014. 30 с.
10. Средние годовые эффективные дозы облучения в 2004 г. жителей населённых пунктов Российской Федерации, отнесённых к зонам радиоактивного загрязнения по постановлению Правительства Российской Федерации № 1582 от 18 декабря 1997 года «Об утверждении Перечня населённых пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС»: Информационный сборник. М., 2006. 176 с.
11. **Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Варфоломеева К.В.** Вертикальное распределение ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве на лугах и в лесах Брянской области в 2015-2016 гг. //Радиационная гигиена. 2019. Т.12, № 3. С. 27-41.
12. **Кузнецов В.К.** Научные основы и системы мероприятий по реабилитации радиоактивно загрязнённых сельскохозяйственных территорий в адаптивно-ландшафтном земледелии: дис. ... докт. биол. наук. Обнинск, 2014. 453 с.
13. Оценка средних годовых эффективных доз облучения критических групп жителей населённых пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС. МУ 2.6.1.2003-05. М., 2005. 20 с.

Assessment of grasslands remediation effectiveness in different periods after the Chernobyl accident

Kuznetsov V.K., Isamov N.N., Panov A.V.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk

The paper presents the impact of remedial actions on ^{137}Cs content in agricultural lands affected by radiation as a result of the Chernobyl accident. The remediation of ^{137}Cs – contaminated of hayfields and pastures in the vicinity of the Veprin village, located in the Bryansk region, was carried out in 2004. Remediation of greenlands aimed at reduction of soil-forage-milk transfer of ^{137}Cs involved deep ploughing of the soil, liming, introducing high doses of mineral fertilizers and sowing grass mixtures. Evaluation of remedial actions effectiveness after the first three years and 15 years later is discussed in the paper. Undertaken agrotechnical measures resulted in reduction of soil surface layer density contamination with ^{137}Cs by 1.8 times. Due to remediation of the pasture in the river floodplain the soil surface layer density contamination with ^{137}Cs was reduced by 2.7 times and dose rate by 1.9 times. It is to be noted that lower geomorphological elements of the landscape with prevailing peat soils are critical for accumulation of ^{137}Cs in the grass stand and accumulation of radionuclides in the river floodplain. In the first three years after the remediation ^{137}Cs soil-grass transfer was reduced by 3 times, and in cultivated hayfield soils the ^{137}Cs transfer was reduced by 8 times. While the land reclamation effectiveness weakened significantly in 15 years after the remediation, accumulation of ^{137}Cs in grass stand grown on cultivated hayfields was 1.6 time lower than in the grass grown in uncultivated lands. The radionuclide content in cultivated pastures is 1.8 times lower than in uncultivated ones. The content of ^{137}Cs in milk was reduced by 3.3 times in the first years after grasslands reclamation, in 15 years the reduction factor was 1.5. Outcomes of long-term follow-up of radioecological situation in grasslands, affected by radiation as a result of the Chernobyl accident, following land remediation and the assessment of its effectiveness can be used as the motivation for and benefits of remedial actions ensuring radiation safety of agricultural products from radioactively contaminated areas. The obtained results can be used for clarification and adjustment of the strategies of reclamation of radioactively contaminated lands and optimal use of grasslands after their restoration.

Key words: Chernobyl NPP, ^{137}Cs , Bryansk region, hayfields, pastures, radioactive contamination, vertical distribution, contamination of agricultural products, countermeasures, radiation protection, monitoring, transfer factor.

References

1. Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Environment" (EGE). Vienna, IAEA, 2006. 166 p.
2. Aleksakhin R.M., Fesenko S.V., Sanzharova N.I., Ulyanenko L.N., Filipas A.S., Panov A.V. The concept of rehabilitation of contaminated agricultural land in the long-term period after the Chernobyl NPP accident. *Vestnik Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk – Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences*, 2003, no. 3, pp. 14-17 (In Russian).
3. Sel'skokhozyaystvennaya radioekologiya [Agricultural radioecology]. Eds.: R.M. Aleksakhin, N.A. Korneev. Moscow, Ecology, 1992. 400 p.
4. Fesenko S., Jacob P., Ulanovsky A., Chupov A., Bogdevich I., Sanzharova N., Kashparov V., Panov A., Zhuchenka Yu. Justification of remediation strategies in the long term after the Chernobyl accident. *J. Environ. Radioact.*, 2013, vol. 119, pp. 39-47.
5. Panov A.V., Fesenko S.V., Alexakhin R.M. Optimization of countermeasures in rural settlements in the zone affected by the Chernobyl NPP accident. *Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk – Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences*, 2005, no. 3, pp. 3-6. (In Russian).

Kuznetsov V.K. – Chief Researcher, D. Sc., Biol.; Isamov N.N. – Leading Researcher, C. Sc., Biol.; Panov A.V.* – Deputy Director, D. Sc., Biol., Prof. of RAS. RIRAE.

*Contacts: 109 km, Kievskoe Sh., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249032. Tel.: +7(484) 399-69-59; e-mail: riar@mail.ru.

6. **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).
7. **Bruk G.Ya., Bazyukin A.B., Bratilova A.A., Vlasov A.Yu., Gromov A.V., Zhesko T.V., Kaduka M.V., Kravtsova O.S., Saprykin K.A., Stepanov V.S., Titov N.V., Yakovlev V.A.** The average annual effective doses for the population in the settlements of the Russian Federation attributed to zones of radioactive contamination due to the Chernobyl accident (for the zonation purposes). *Radiatsionnaya gygiena – Radiation Hygiene*, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 73-78 (In Russian).
8. **Bratilova A.A., Bruk G.Ya.** Influence of the consumption of different foodstuffs on the internal exposure dose formation in the adult population of the Russian Federation after the accident at the Chernobyl NPP. *Radiatsionnaya gygiena – Radiation Hygiene*, 2018, vol. 11, no. 2, pp. 53-59 (In Russian).
9. **Pasport bezopasnosti prozhivaniya na radioaktivno zagryaznennykh territoriyakh. Naselenny punkt Veprin Klintsovskogo rayona Bryanskoy oblasti** [Safety data sheet for living in radioactively contaminated territories. Settlement Veprin, Klintsovsky district, Bryansk region]. Obninsk, RIRAE, 2014. 30 p.
10. **Sredniye godovyye effektivnyye dozy oblucheniya v 2004 g. zhiteley naselennykh punktov Rossiyskoy Federatsii, otnesennykh k zonam radioaktivnogo zagryazneniya po postanovleniyu Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii №1582 ot 18 dekabrya 1997 goda «Ob utverzhdenii Perechnya naselennykh punktov, nakhodyashchikhsya v granitsakh zon radioaktivnogo zagryazneniya vsledstviye katastrofy na CHernobyl'skoy AES»** [The average annual effective radiation doses in 2004 to residents of settlements of the Russian Federation assigned to radioactive contamination zones by decree of the Government of the Russian Federation No. 1582 of December 18, 1997 "On approval of the List of settlements located within the boundaries of radioactive contamination zones due to the Chernobyl disaster"]. Information Digest. Moscow, 2006, 176 p.
11. **Ramzaev V.P., Barkovsky A.N., Varfolomeeva K.V.** Vertical distribution of ^{137}Cs in soddy-podzolic sandy soil in grasslands and forests of the Bryansk region in 2015-2016. *Radiatsionnaya gygiena – Radiation Hygiene*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 27-41 (In Russian).
12. **Kuznetsov V.K.** Nauchnyye osnovy i sistemy meropriyatiy po reabilitatsii radioaktivno zagryaznennykh sel'skokhozyaystvennykh territoriy v adaptivno-landshaftnom zemledelii: dis. ... dokt. biol. nauk [Scientific foundations and systems of measures for the rehabilitation of radioactively contaminated agricultural territories in adaptive landscape agriculture: dis. dr. biol. sci.]. Obninsk, 2014. 453 p.
13. **Otsenka srednikh godovykh effektivnykh doz oblucheniya kriticheskikh grupp zhiteley naselennykh punktov Rossiyskoy Federatsii, podvergshikhsya radioaktivnomu zagryazneniyu vsledstviye avarii na Chernobyl'skoy AES** [Estimation of average annual effective doses of critical groups of residents of settlements of the Russian Federation exposed to radioactive contamination as a result of the Chernobyl accident]. MU 2.6.1.2003-05. Moscow, 2005. 20 p.