

ВЛИЯНИЕ АЗОТНЫХ И КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ НА НАКОПЛЕНИЕ ^{137}Cs МНОГОЛЕТНИМИ БОБОВО-ЗЛАКОВЫМИ И ЗЛАКОВЫМИ ТРАВАМИ НА ТОРФЯНЫХ ПОЧВАХ

Н. Н. Цыбулько¹, доктор сельскохозяйственных наук

А. В. Шашко², кандидат сельскохозяйственных наук

И. И. Жукова³, кандидат сельскохозяйственных наук

Е. Б. Евсеев⁴, соискатель

¹РУП «Институт почвоведения и агрохимии», г. Минск, Беларусь

²Полесский государственный университет, г. Пинск, Беларусь

³Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка, г. Минск, Беларусь

⁴Пинский государственный аграрно-технический колледж имени А. Е. Клещева, г. Пинск, Беларусь

Аннотация

Установлено, что на торфяной маломощной почве применение под многолетние бобово-злаковые травы $\text{P}_{60}\text{K}_{240}$ (K_{180} под первый укос и K_{60} под второй укос) снижает содержание ^{137}Cs в сене в 2,2–3,0 раза. Внесение азотных удобрений в общих дозах от 30 до 90 кг/га на фоне $\text{P}_{90}\text{K}_{180}$ уменьшает концентрацию ^{137}Cs в сене первого укоса в среднем в 1,7–2,0 раза, в сене второго укоса в 1,5–1,9 раза. На торфянисто-глеевой почве фосфорные и калийные удобрения в дозах $\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ снижают переход ^{137}Cs в многолетние злаковые травы первого укоса на 27–28 %. При внесении под первый укос K_{120} также наблюдается снижение поступления ^{137}Cs из почвы в растения. Подкормка трав второго укоса калием в дозе 30 кг/га на фоне $\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ обеспечивает уменьшение коэффициента перехода радионуклида в сено на 50 %. Внесение под первый укос злаковых трав N_{60} и N_{80} несущественно увеличивает поступление ^{137}Cs в растения. Вторая азотная подкормка трав приводит к некоторому увеличению накопления ^{137}Cs в сене трав второго укоса. Поступление ^{137}Cs в сено при повышенных дозах азотных удобрений ($\text{N}_{120-140}$) снижается на высоком фоне применения калия.

Ключевые слова: торфяная маломощная почва, торфянисто-глеевая почва, ^{137}Cs , активность, коэффициент перехода, азотные и калийные удобрения, дозы, многолетние бобово-злаковые и злаковые травы.

Abstract

N. N. Tsybulka, A. V. Shashko, I. I. Zhukova, E. B. Evseev

INFLUENCE OF NITROGEN AND POTASH FERTILIZERS ON THE ACCUMULATION OF ^{137}Cs BY PERENNIAL LEGUME-CEREAL AND CEREAL GRASSES ON PEAT SOILS

It has been established that on peat shallow soil, the use of $\text{P}_{60}\text{K}_{240}$ (K_{180} for the first grass cutting and K_{60} for the second grass cutting) under perennial legume-cereal grasses reduces the ^{137}Cs content in hay by 2.2–3.0 times. The use of nitrogen fertilizers in total rates from 30 to 90 kg/ha against the background of $\text{P}_{90}\text{K}_{180}$ reduces the concentration of ^{137}Cs in the hay of the first cut by an average of 1.7–2.0 times, in the hay of the second cut by 1.5–1.9 times. On peaty-gley soil, phosphorus and potash fertilizers in rates of $\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ reduce the transfer of ^{137}Cs into perennial grasses of the first cut by 27–28 %. When K_{120} is introduced for the first cut, a decrease in ^{137}Cs input from the soil into plants is observed. Top dressing of grasses of the second cut with potassium at a dose of 30 kg/ha against the background of $\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ provides a 50 % decrease in the coefficient of radionuclide conversion into hay. The introduction of cereal grasses N_{60} and N_{80} for the first cut does not significantly increase the ^{137}Cs intake into plants. The second nitrogen fertilization of grasses leads to a slight increase in the accumulation of ^{137}Cs in the hay of the grasses of the second cut. The intake of ^{137}Cs in hay at increased doses of nitrogen fertilizers ($\text{N}_{120-140}$) decreases against a high background of potassium use.

Keywords: shallow peat soil, peaty-gley soil, ^{137}Cs , activity, transfer coefficient, nitrogen and potassium fertilizers, rates, perennial legume-cereal and cereal grasses.

Введение

В сельскохозяйственном пользовании сейчас находится 825,4 тыс. га земель, загрязненных ^{137}Cs в результате аварии на Чернобыльской АЭС [1]. Многочисленные исследования показали, что генетические особенности и свойства почв являются одним из важнейших факторов, определяющих процессы сорбции радиону-

клов в почвенно-поглощающем комплексе и интенсивность поступления их в растения. Проблемы в использовании загрязненных радионуклидами сельскохозяйственных земель сконцентрированы преимущественно на легких по гранулометрическому составу песчаных, переувлажненных аллювиальных, торфяно-бо-

лотных, торфяно-глеевых, торфянисто-глеевых и торфяно-минеральных почвах разной степени деградации, которые характеризуются высокими параметрами перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в растениеводческую продукцию. Установлено, что количественные параметры перехода ^{137}Cs в продукцию сельскохозяйственных культур на гидроморфных торфяных почвах в 1,5–6,0 раза выше по сравнению с почвами автоморфного ряда. Эти почвы наиболее критичны для получения сельскохозяйственной продукции с допустимым содержанием радионуклидов.

В качестве сельскохозяйственных земель в Беларуси используются 1068,2 тыс. га осушенных торфяных почв, в том числе на территории радиоактивного загрязнения – около 245,0 тыс. га, из них 83,0 тыс. га с мощностью торфяного слоя менее 0,5 м. В среднем на каждый из 55 загрязненных радионуклидами административных районов приходится около 4 тыс. га тор-

Материалы и методы исследований

Исследования проводились в 2012–2019 гг. в стационарных полевых опытах на территории землепользования КСУП «Синкевичский» Лунинецкого р-на Брестской обл. Объектами исследований являлись: торфяная маломощная низинная осушенная почва, развивающаяся на тростниково-осоковых торфах, подстилаемых с глубины 0,61 м связными древнеаллювиальными песками; торфянисто-глеевая низинная осушенная почва, развивающаяся на тростниково-осоковых торфах, подстилаемых с глубины 0,26 м связными древнеаллювиальными песками. Почвы характеризовались следующими агрохимическими показателями (T_n): торфяная маломощная – $\text{pH}_{\text{KCl}} - 5,44$; содержание органического вещества – 53,1 %; содержание общего азота – 1,54 %; содержание минерального азота – 36,2 мг/кг почвы; содержание подвижного фосфора и калия соответственно 737 и 665 мг/кг почвы; торфянисто-глеевая – $\text{pH}_{\text{KCl}} - 5,38$; содержание органического вещества – 64,0 %; содержание общего азота – 1,72 %; содержание минерального азота – 55,7 мг/кг почвы; содержание подвижного фосфора и калия соответственно 875 и 805 мг/кг почвы. Плотность загрязнения почв ^{137}Cs составляла 3,2–5,1 Ки/км².

В 2012–2014 гг. на торфяной маломощной почве возделывали многолетнюю бобово-зла-

кующую травосмесь, включающую тимофеевку луговую, овсяницу луговую, кострец безостый и лядвенец рогатый. В 2016–2019 гг. на торфянисто-глеевой почве возделывали многолетнюю злаковую травосмесь, включающую тимофеевку луговую, овсяницу луговую, кострец безостый.

Схемы опытов с применением разных доз минеральных удобрений под бобово-злаковые и злаковые травы приведены в табл. 1.

Опыты проводили в 4-кратной повторности, размещение делянок – рандомизированное. Общая площадь делянки – 20 м², учетная площадь – 12 м². Ежегодно проводили два укоса трав, урожайность сена пересчитывали на 16%-ю стандартную влажность. Уборка трав осуществлялась вручную, поделяночно.

Агрохимические анализы выполняли в соответствии с действующими ГОСТами. Удельную активность ^{137}Cs в почвенных пробах определяли на γ - β -спектрометре МКС-АТ1315, в растительных образцах – на γ -спектрометрическом комплексе *Canberra-Packard*. Полученные данные обрабатывали методами дисперсионного и корреляционного анализов с использованием компьютерного программного обеспечения (*MS Excel 7.0, Statistica 6.0*).

Опыты проводили в 4-кратной повторности, размещение делянок – рандомизированное. Общая площадь делянки – 20 м², учетная площадь – 12 м². Ежегодно проводили два укоса трав, урожайность сена пересчитывали на 16%-ю стандартную влажность. Уборка трав осуществлялась вручную, поделяночно.

Агрохимические анализы выполняли в соответствии с действующими ГОСТами. Удельную активность ^{137}Cs в почвенных пробах определяли на γ - β -спектрометре МКС-АТ1315, в растительных образцах – на γ -спектрометрическом комплексе *Canberra-Packard*. Полученные данные обрабатывали методами дисперсионного и корреляционного анализов с использованием компьютерного программного обеспечения (*MS Excel 7.0, Statistica 6.0*).

Опыты проводили в 4-кратной повторности, размещение делянок – рандомизированное. Общая площадь делянки – 20 м², учетная площадь – 12 м². Ежегодно проводили два укоса трав, урожайность сена пересчитывали на 16%-ю стандартную влажность. Уборка трав осуществлялась вручную, поделяночно.

Таблица 1. Схемы применения минеральных удобрений под бобово-злаковые и злаковые травы

Варианты опыта	Дозы удобрений под 1-й укос, кг/га д.в.			Дозы удобрений под 2-й укос, кг/га д.в.		
	N	P	K	N	P	K
Схема применения минеральных удобрений под бобово-злаковые травы на торфяной маломощной почве						
1. Контроль (без удобрений)	–	–	–	–	–	–
2. P ₉₀ K ₁₂₀	–	90	120	–	–	–
3. P ₉₀ K ₁₈₀	–	90	120	–	–	60
4. P ₉₀ K ₂₄₀	–	90	180	–	–	60
5. N ₃₀ P ₉₀ K ₁₈₀	30	90	120	–	–	60
6. N ₆₀ P ₉₀ K ₁₈₀	30	90	120	30	–	60
7. N ₉₀ P ₉₀ K ₁₈₀	60	90	120	30	–	60
Схема применения минеральных удобрений под злаковые травы на торфянисто-глеевой почве						
1. Контроль (без удобрений)	–	–	–	–	–	–
2. P ₉₀ K ₁₂₀	–	90	90	–	–	30
3. P ₉₀ K ₁₅₀	–	90	90	–	–	60
4. P ₉₀ K ₁₈₀	–	90	120	–	–	60
5. N ₁₀₀ P ₉₀ K ₁₅₀	60	90	90	40	–	60
6. N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₅₀	80	90	90	40	–	60
7. N ₁₄₀ P ₉₀ K ₁₅₀	80	90	90	60	–	60
8. N ₁₀₀ P ₉₀ K ₁₈₀	60	90	120	40	–	60
9. N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₈₀	80	90	120	40	–	60
10. N ₁₄₀ P ₉₀ K ₁₈₀	80	90	120	60	–	60

Результаты исследований и их обсуждение

Многолетняя практика применения комплекса защитных мероприятий на загрязненных радионуклидами сельскохозяйственных землях показала, что наиболее эффективны агрохимические меры: известкование кислых почв, применение повышенных доз фосфорных и калийных удобрений. На почвах разного генезиса под влиянием калийных удобрений поступление ¹³⁷Cs в сельскохозяйственные культуры может уменьшаться от 2 до 20 раз [3, 4].

Положительная роль калийных удобрений в снижении поступления радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию возрастает на фоне оптимальных параметров минерального питания растений. Внесение калийных удобрений совместно с другими минеральными и органическими удобрениями и химическими мелиорантами способствует модификации эффективности калия в снижении перехода ¹³⁷Cs в продукцию растениеводства [5]. При сбалансированном азотном и фос-

форном питании калийные удобрения снижали поступление ¹³⁷Cs в растения в 2–3 раза [6].

В ходе исследований, проведенных на торфяной маломощной осушенной почве в 2012–2014 гг., изучено влияние возрастающих доз калийных удобрений на накопление ¹³⁷Cs многолетними бобово-злаковыми травами. Так, 2012 и 2014 гг. характеризовались по степени увлажнения как влажные (ГТК составили соответственно 1,66 и 2,02), а 2013 год был слабозасушливым (ГТК равен 1,16).

При плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs 4,5 Ки/км² содержание радионуклида колебалось по годам на контроле от 29,77 до 256,48 Бк/кг. Различия в активности ¹³⁷Cs в травах первого укоса достигали 1,4 раза, второго укоса – 3,6 раза, а между укосами – 8,6 раза. В целом за годы исследований удельная активность ¹³⁷Cs в сене не превышала 350 Бк/кг (табл. 2).

Фосфорные и калийные удобрения, внесенные под первый укос трав в дозах P₉₀K₁₂₀

при содержании в почве P_2O_5 и K_2O соответственно 737 и 665 мг/кг почвы, уменьшали накопление ^{137}Cs в зависимости от года пользования трав в сене первого укоса от 20 до 43 %, в сене второго укоса – от 29 до 40 %, а в среднем снижение составило 29 и 34 % соответственно. Применение под первый укос трав дозы калия 180 кг/га также было эффективным. Активность радионуклида в сене уменьшилась в среднем с 25,17 до 15,81 Бк/кг, или в 1,6 раза.

Подкормка трав под второй укос калием в дозе 60 кг/га действующего вещества на фоне $P_{90}K_{120}$ (вариант 3) способствовала уменьшению содержания ^{137}Cs в сене по отношению к контролю в среднем в 2,2 раза, по отношению к варианту с $P_{90}K_{120}$ – в 1,5 раза. При внесении

K_{60} под второй укос на фоне $P_{90}K_{180}$ (вариант 4) также наблюдалось снижение активности ^{137}Cs в сене по сравнению с вариантом 3 с 66,93 до 49,02 Бк/кг.

Расчеты коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в многолетние бобово-злаковые травы показали следующее. За годы исследований в зависимости от метеорологических условий вегетационных периодов различия в переходе ^{137}Cs в сено первого укоса достигали 3,0 раза, в сено второго укоса – 4,0 раза. На контрольном варианте (без удобрений) коэффициент перехода изменялся по годам для трав первого укоса незначительно, в пределах 0,21–0,24 Бк/кг: кБк/м², тогда как для второго укоса он менялся от 0,47 до 1,57 Бк/кг: кБк/м² (табл. 3).

Таблица 2. Удельная активность ^{137}Cs в сене многолетних бобово-злаковых трав на торфяной маломощной почве в зависимости от доз фосфорных и калийных удобрений, Бк/кг

Варианты опыта	Годы			Среднее значение	Процент к контролю
	2012	2013	2014		
Первый укос					
1 Контроль	40,50 ± 9,96	36,37 ± 10,78	29,77 ± 6,91	35,55	100
2 $P_{90}K_{120}$	23,26 ± 6,54	29,13 ± 7,57	23,11 ± 5,93	25,17	71
3 $P_{90}K_{180}$	24,10 ± 5,87	27,87 ± 6,75	22,79 ± 5,23	24,92	70
4 $P_{90}K_{240}$	12,67 ± 3,52	17,17 ± 4,57	17,60 ± 4,28	15,81	44
Второй укос					
1 Контроль	71,36 ± 17,48	123,52 ± 30,54	256,48 ± 69,94	150,45	100
2 $P_{90}K_{120}$	42,64 ± 11,87	87,32 ± 23,19	167,29 ± 40,22	99,08	66
3 $P_{90}K_{180}$	37,63 ± 9,57	63,39 ± 16,02	99,77 ± 25,93	66,93	44
4 $P_{90}K_{240}$	27,04 ± 7,06	59,48 ± 13,82	60,55 ± 14,21	49,02	33

Таблица 3. Коэффициенты перехода ^{137}Cs в сено многолетних бобово-злаковых трав на торфяной маломощной почве в зависимости от доз фосфорных и калийных удобрений, Бк/кг: кБк/м²

Варианты опыта	Годы			Среднее значение	Процент к контролю
	2012	2013	2014		
Первый укос					
1 Контроль	0,21	0,24	0,21	0,22	100
2 $P_{90}K_{120}$	0,13	0,18	0,18	0,16	73
3 $P_{90}K_{180}$	0,14	0,16	0,17	0,16	73
4 $P_{90}K_{240}$	0,07	0,11	0,12	0,10	45
Второй укос					
1 Контроль	0,47	0,82	1,57	0,95	100
2 $P_{90}K_{120}$	0,26	0,52	1,12	0,63	66
3 $P_{90}K_{180}$	0,22	0,42	0,65	0,43	45
4 $P_{90}K_{240}$	0,16	0,39	0,39	0,31	33

Фосфорные и калийные удобрения в дозах соответственно 90 и 120 кг/га снизили параметры перехода ^{137}Cs из почвы в травы первого и второго укосов на 27–34 %. При внесении под второй укос K_{60} на фоне $\text{P}_{90}\text{K}_{120}$ показатель перехода ^{137}Cs из почвы в растения снизился с 0,63 до 0,43 Бк/кг: кБк/м². Применение под первый укос $\text{P}_{90}\text{K}_{180}$ и под второй укос K_{60} (вариант 4) уменьшило коэффициент перехода ^{137}Cs по отношению к варианту 3 ($\text{P}_{90}\text{K}_{180}$) в тра-

вы первого укоса с 0,16 до 0,10 Бк/кг: кБк/м², в травы второго укоса – с 0,43 до 0,31 Бк/кг: кБк/м².

Установлена тесная взаимосвязь коэффициентов перехода ^{137}Cs в сено многолетних бобово-злаковых трав с уровнем их продуктивности. С повышением доз калийных удобрений наблюдалось увеличение урожайности и, соответственно, уменьшение перехода радионуклида в сено (рис. 1).

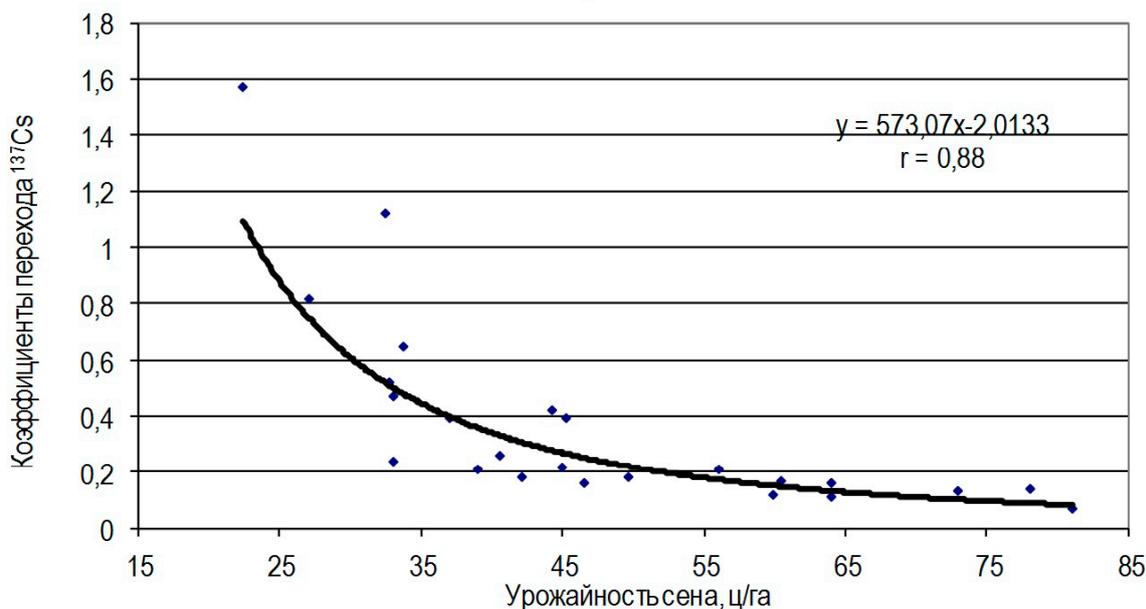


Рис. 1. Зависимость коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в сено многолетних бобово-злаковых трав от уровня их продуктивности при внесении разных доз калийных удобрений

Таблица 4. Удельная активность ^{137}Cs в сене многолетних злаковых трав в зависимости от доз фосфорных и калийных удобрений, Бк/кг

Варианты опыта	Годы				Среднее значение	Процент к контролю
	2016	2017	2018	2019		
Первый укос						
1 Контроль	103,88	81,37	65,10	36,12	71,62	100
2 $\text{P}_{90}\text{K}_{120(90+30)}$	71,66	47,89	21,09	21,31	40,49	57
3 $\text{P}_{90}\text{K}_{150(90+60)}$	71,03	48,32	21,36	20,12	40,20	56
4 $\text{P}_{90}\text{K}_{180(120+60)}$	51,85	36,13	11,44	17,21	29,16	41
Второй укос						
1 Контроль	–	73,97	50,08	49,41	57,82	100
2 $\text{P}_{90}\text{K}_{120(90+30)}$	–	30,58	17,38	31,32	26,42	46
3 $\text{P}_{90}\text{K}_{150(90+60)}$	–	29,21	15,20	28,41	24,27	42
4 $\text{P}_{90}\text{K}_{180(120+60)}$	–	27,16	8,80	25,53	20,49	35

В 2016–2019 гг. изучено влияние доз калийных удобрений на накопление ^{137}Cs многолетними злаковыми травами на торфянисто-глеевой осушенной почве. По степени увлажнения 2016 г. был слабозасушливым, 2017 г. – влажным, 2018 г. – засушливым, 2019 г. соответствовал оптимальным климатическим условиям. ГТК составили соответственно 1,28, 2,24, 0,97 и 1,30.

За годы исследований удельная активность радионуклида в сене не превышала 150 Бк/кг при допустимом содержании 1300 Бк/кг для скармливания дойному поголовью при получении цельного молока и 520 Бк/кг для скармливания поголовью при получении мяса. Содержание ^{137}Cs в сене трав первого укоса на контроле (без применения удобрений) колебалось по годам от 36,12 до 103,88 Бк/кг и в среднем составило 71,62 Бк/кг.

Фосфорные и калийные удобрения, внесенные под первый укос трав в дозах $\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ (варианты 2 и 3), уменьшали накопление радионуклида в сене первого укоса в зависимости от года пользования трав от 21 до 67 %, в среднем на 43 %. Наибольшее снижение отмечено в засушливом 2018 г., наименьшее – в 2019 г. с оптимальным увлажнением. Применение под первый укос трав дозы калия 120 кг/га (вариант 4) также было эффективным. Удельная активность ^{137}Cs в сене уменьшилась в среднем с 40,20–40,49 до 29,16 Бк/кг, или на 27–28 % по отношению к варианту $\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ (табл. 4).

Содержание ^{137}Cs в сене трав второго укоса на контроле изменялось по годам от 49,41 до 73,97 Бк/кг. Подкормка трав под второй укос

калием в дозе 30 кг/га на фоне $\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ (вариант 2) способствовала уменьшению удельной активности ^{137}Cs в сене по отношению к контролю в среднем с 58,72 до 26,42 Бк/кг, или более чем в 2 раза. Внесение под второй укос K_{60} на фонах $\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ (вариант 3) и $\text{P}_{90}\text{K}_{120}$ (вариант 4) не способствовало существенному снижению поступления радионуклида в сено по сравнению с вариантом 2.

Расчеты коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в многолетние травы показали следующее. За годы исследований различия в переходе ^{137}Cs в многолетние травы первого и второго укосов достигали 3,3 раза (в зависимости от метеорологических условий вегетационных периодов).

На контрольном варианте коэффициент перехода изменялся по годам для трав первого укоса в пределах 0,30–0,87 Бк/кг: кБк/м², для второго укоса – в пределах 0,41–0,62 Бк/кг: кБк/м². Фосфорные и калийные удобрения в дозах $\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ снизили переход ^{137}Cs из почвы в травы первого укоса с 0,56 до 0,34–0,35, или на 27–28 % по отношению к контролю. При внесении под первый укос K_{120} также наблюдалось снижение показателя перехода ^{137}Cs из почвы в растения до 0,25 Бк/кг: кБк/м². Подкормка трав второго укоса калием в дозе 30 кг/га на фоне $\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ обеспечила уменьшение коэффициента перехода радионуклида в сено на 50 %. При внесении под второй укос K_{60} на фонах $\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ и $\text{P}_{90}\text{K}_{120}$ также наблюдалось снижение коэффициента перехода ^{137}Cs по отношению к варианту 2 ($\text{P}_{90}\text{K}_{120}$), однако оно было несущественным (табл. 5).

Таблица 5. Коэффициенты перехода ^{137}Cs в сено многолетних злаковых трав в зависимости от доз фосфорных и калийных удобрений, Бк/кг

Варианты опыта	Годы				Среднее значение	Процент к контролю
	2016	2017	2018	2019		
Первый укос						
1 Контроль	0,87	0,51	0,54	0,30	0,56	100
2 $\text{P}_{90}\text{K}_{120}(90+30)$	0,61	0,40	0,19	0,20	0,35	63
3 $\text{P}_{90}\text{K}_{150}(90+60)$	0,60	0,41	0,18	0,18	0,34	62
4 $\text{P}_{90}\text{K}_{180}(120+60)$	0,43	0,30	0,10	0,16	0,25	45
Второй укос						
1 Контроль	–	0,62	0,42	0,41	0,48	100
2 $\text{P}_{90}\text{K}_{120}(90+30)$	–	0,26	0,15	0,30	0,24	49
3 $\text{P}_{90}\text{K}_{150}(90+60)$	–	0,24	0,13	0,25	0,21	43
4 $\text{P}_{90}\text{K}_{180}(120+60)$	–	0,23	0,07	0,23	0,18	37

В отличие от калия повышенные дозы азотных удобрений увеличивают накопление радионуклидов в урожае сельскохозяйственных культур в 1,5–4,0 раза [7]. С одной стороны, дефицит азота приводит к снижению урожайности сельскохозяйственных культур, в результате чего концентрация радионуклидов в растениях повышается. С другой стороны, применение минерального азота также приводит к увеличению накопления радионуклидов в растениях [8–10].

Установлено влияние возрастающих доз азота на накопление ^{137}Cs многолетними бобово-злаковыми травами на торфяно-болотной маломощной почве. Азотные подкормки трав в начале весеннего отрастания и под второй укос в общих дозах 30, 60 и 90 кг/га на фоне $\text{P}_{90}\text{K}_{180}$ не

привели к усилению поступления ^{137}Cs в растения, а способствовали снижению его накопления. Так, при внесении N_{30} в начале весенней вегетации трав снижение активности ^{137}Cs в сене первого укоса по отношению к фону РК составило по годам 6,87–12,60 Бк/кг, в среднем за 3 года исследований 10,40–10,63 Бк/кг, или 41–42 % (табл. 6).

Минимальное содержание ^{137}Cs в сене первого укоса (12,28 Бк/кг) было в варианте с внесением в начале весеннего отрастания трав N_{60} . Азотная подкормка трав после первого укоса в дозе 30 кг/га на фоне ранневесеннего применения N_{30} и N_{60} снизила накопление ^{137}Cs в сене второго укоса по отношению к варианту $\text{P}_{90}\text{K}_{180}$ соответственно на 47 и 44 %, к варианту $\text{N}_{30}\text{P}_{90}\text{K}_{180}$ – на 21 и 15 %.

Таблица 6. Удельная активность ^{137}Cs (Бк/кг) в сене многолетних бобово-злаковых трав на торфяной маломощной почве в зависимости от доз азотных удобрений

Варианты опыта	Годы			Среднее значение	Процент к контролю
	2012	2013	2014		
Первый укос					
1. Контроль	40,50 ± 9,96	36,37 ± 10,78	29,77 ± 6,91	35,55	100
2. $\text{P}_{90}\text{K}_{180}$ – фон	24,10 ± 5,87	27,87 ± 7,75	22,79 ± 5,93	24,92	70
3. Фон + N_{30}	11,50 ± 3,11	15,43 ± 3,62	15,94 ± 3,77	14,29	40
4. Фон + N_{60}	12,20 ± 3,17	15,53 ± 4,10	15,82 ± 3,55	14,52	41
5. Фон + N_{90}	13,42 ± 3,39	9,97 ± 2,71	13,46 ± 3,35	12,28	35
Второй укос					
1. Контроль	71,36 ± 17,48	123,52 ± 30,54	256,48 ± 69,94	150,45	100
2. $\text{P}_{90}\text{K}_{180}$ – фон	37,63 ± 9,57	63,39 ± 16,02	99,77 ± 25,93	66,93	45
3. Фон + N_{30}	18,31 ± 4,87	56,99 ± 14,99	57,37 ± 15,22	44,22	30
4. Фон + N_{60}	23,29 ± 5,95	49,26 ± 12,77	32,81 ± 8,83	35,12	24
5. Фон + N_{90}	26,06 ± 6,94	51,44 ± 14,25	34,73 ± 8,40	37,41	25

Определены коэффициенты перехода ^{137}Cs из почвы в сено злаково-бобовых трав первого и второго укосов. При внесении полного минерального удобрения (NPK) они составили в среднем на травах первого укоса 0,08–0,09, на травах второго укоса – 0,22–0,29, то есть были ниже по отношению к контролю и вариантам с применением только фосфорных и калийных удобрений. Различия в зависимости от доз азотных удобрений были незначительными (рис. 2 и 3).

Установлена зависимость коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в сено многолетних бобово-злаковых трав от уровня их продуктивности при внесении возрастающих доз азотных

удобрений. Величина достоверности аппроксимации (R^2) составила 0,77, коэффициент корреляции – 0,88. С повышением урожайности переход ^{137}Cs в сено снижался (рис. 4).

Изучено влияние разных доз и сроков внесения азотных удобрений на накопление ^{137}Cs многолетними злаковыми травами на торфянисто-глеевой осушенной почве, подстилаемой с глубины 0,26 м песком. Азотные удобрения применяли в начале весеннего отрастания трав под первый укос в дозах 60 и 80 кг/га, под второй укос – в дозах 40 и 60 кг/га. Общие их дозы колебались от 100 до 140 кг/га на двух фонах – $\text{P}_{90}\text{K}_{150}$ и $\text{P}_{90}\text{K}_{180}$.

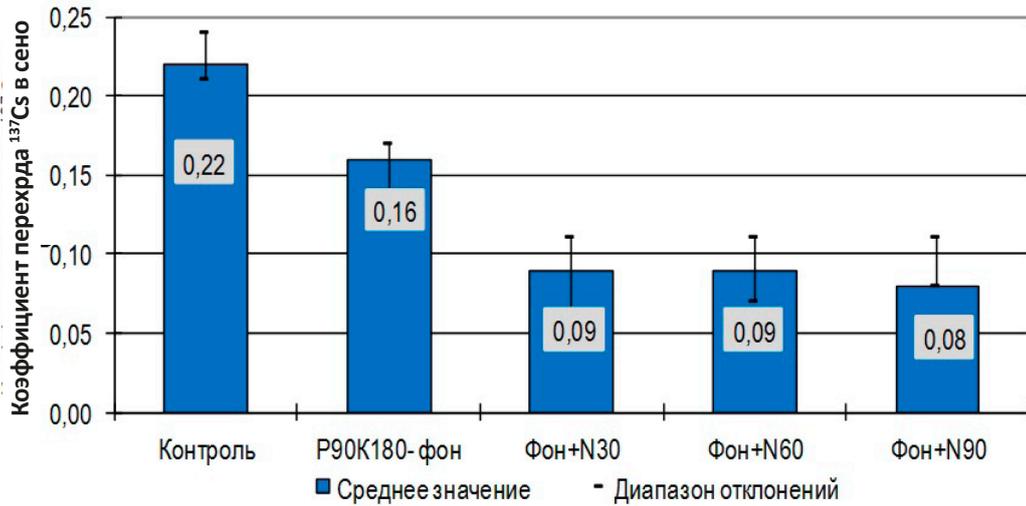


Рис. 2. Коэффициенты перехода ^{137}Cs в сено многолетних бобово-злаковых трав первого укоса в зависимости от доз азотных удобрений (Бк/кг: кБк/м²)

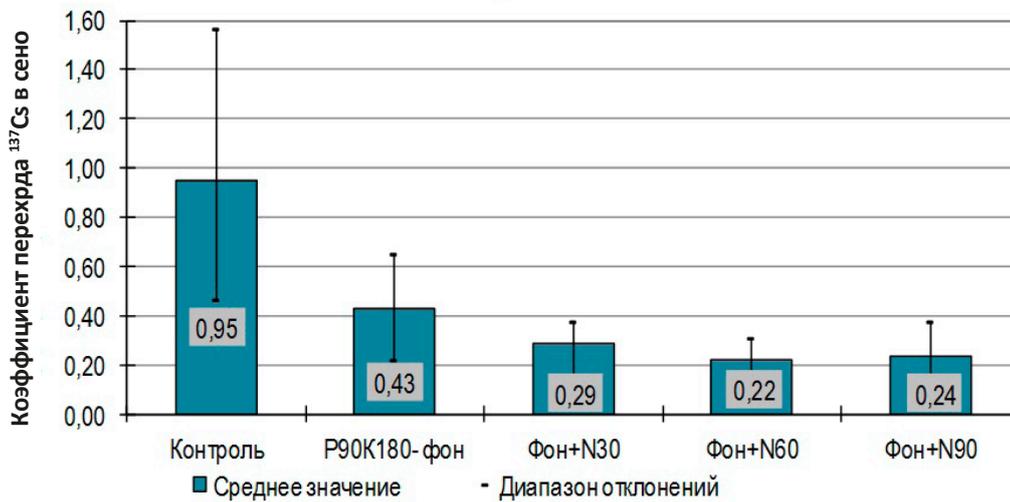


Рис. 3. Коэффициенты перехода ^{137}Cs в сено многолетних бобово-злаковых трав второго укоса в зависимости от доз азотных удобрений (Бк/кг: кБк/м²)

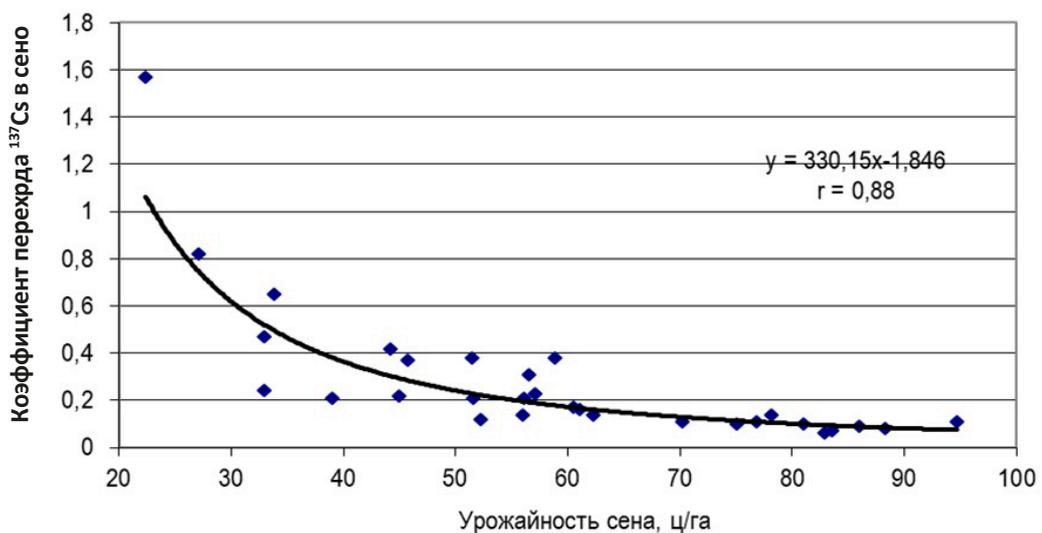


Рис. 4. Зависимость коэффициентов перехода ^{137}Cs в сено многолетних бобово-злаковых трав от уровня их продуктивности при внесении разных доз азотных удобрений

Внесение под первый укос трав N_{60} и N_{80} не привело к усилению поступления ^{137}Cs в растения. В среднем за 4 года исследований при содержании радионуклида в сене на фоне 1 ($P_{90}K_{150}$) и фоне 2 ($P_{90}K_{180}$) соответственно 40,21 и 29,16 Бк/кг. Его концентрация в вариантах с дозами азота 60 и 80 кг/га составила на фоне 1 39,83 и 44,28 Бк/кг, на фоне 2 – 33,77 и 38,67 Бк/кг соответственно (табл. 7).

В вариантах с полным (НРК) минеральным удобрением удельная активность ^{137}Cs в сене первого укоса была ниже по сравнению с контролем на фоне 1 на 38–44 %, на фоне 2 – на 43–53 %. В среднем за годы исследований минимальное содержание ^{137}Cs в сене первого укоса (33,77 Бк/кг) отмечено в варианте с применением 60 кг/га азота под укос на фоне $P_{90}K_{180}$.

Вторая азотная подкормка трав привела к увеличению накопления ^{137}Cs в сене трав вто-

рого укоса по отношению к фосфорно-калийным фонам. Так, при внесении N_{40} удельная активность радионуклида в сене изменялась на фоне 1 в пределах 31,18–34,72 Бк/кг, на фоне 2 – 27,85–29,79 Бк/кг. В вариантах с применением под второй укос N_{60} содержание ^{137}Cs в сене составило 36,80 и 35,62 Бк/кг соответственно.

Средний за 2 укоса многолетних злаковых трав коэффициент перехода ^{137}Cs в сено составил на контроле 0,56. Фосфорные и калийные удобрения в дозах $P_{90}K_{150}$ снизили его до 0,34, или в 1,6 раза. Азотные удобрения на фоне $P_{90}K_{150}$ привели к некоторому повышению ^{137}Cs в растения при внесении их в дозах 120–140 кг/га. В то же время на более высоком фоне калия ($P_{90}K_{180}$) значения коэффициентов перехода радионуклида в сено и при повышенных дозах азотных удобрений ($N_{120-140}$) не превышали 0,30 (рис. 5).

Таблица 7. Активность ^{137}Cs в сене многолетних злаковых трав в зависимости от доз азотных удобрений

Варианты опыта	Годы				Среднее значение	Процент к контролю
	2016	2017	2018	2019		
Первый укос						
1. Контроль	103,88	81,37	65,10	36,12	71,62	100
2. $P_{90}K_{150}$ – Фон 1	71,03	48,32	21,36	20,12	40,21	56
3. Фон 1+ $N_{100(60+40)}$	67,68	38,95	26,39	26,31	39,83	56
4. Фон 1+ $N_{120(80+40)}$	72,69	47,42	29,37	27,63	44,28	62
5. Фон 1+ $N_{140(80+60)}$	70,01	46,62	34,50	27,74	44,72	62
6. $P_{90}K_{180}$ – Фон 2	51,85	36,13	11,44	17,21	29,16	41
7. Фон 2+ $N_{100(60+40)}$	61,72	30,31	21,91	21,14	33,77	47
8. Фон 2+ $N_{120(80+40)}$	66,19	39,91	24,26	24,33	38,67	54
9. Фон 2+ $N_{140(80+60)}$	64,75	40,67	27,82	30,24	40,87	57
Второй укос						
1. Контроль	–	73,97	50,08	49,41	57,82	100
2. $P_{90}K_{150}$ – Фон 1	–	29,21	15,20	28,41	24,27	42
3. Фон 1+ $N_{100(60+40)}$	–	38,61	20,30	34,62	31,18	54
4. Фон 1+ $N_{120(80+40)}$	–	41,68	26,35	36,14	34,72	60
5. Фон 1+ $N_{140(80+60)}$	–	44,08	31,40	34,91	36,80	64
6. $P_{90}K_{180}$ – Фон 2	–	27,16	12,80	25,53	21,83	38
7. Фон 2+ $N_{100(60+40)}$	–	42,03	15,78	25,74	27,85	48
8. Фон 2+ $N_{120(80+40)}$	–	37,07	21,05	31,24	29,79	52
9. Фон 2+ $N_{140(80+60)}$	–	40,32	24,23	42,31	35,62	62

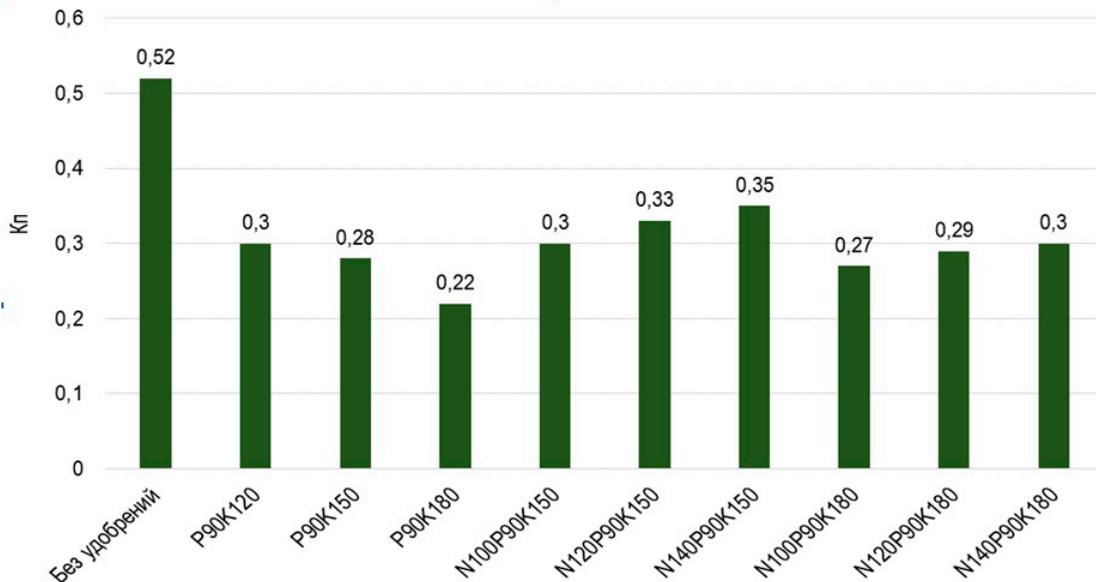


Рис. 5. Средние значения коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в сено многолетних злаковых трав в зависимости от доз удобрений

Выводы

1. В зависимости от метеорологических условий вегетационных периодов различия по годам в активности ^{137}Cs в сене многолетних бобово-злаковых трав достигают 3,6 раза, минимальные и максимальные значения между укосами составляют 8,6 раза. Такие колебания в содержании радионуклида в продукции в значительной степени обусловлены уровнями формируемой продуктивности. Установлены тесные обратно пропорциональные зависимости коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в сено многолетних трав от урожайности с величиной достоверности аппроксимации 0,78.

2. Различия по годам в переходе ^{137}Cs в сено многолетних злаковых трав первого укоса достигают 4,3 раза, в сено второго укоса – 3,3 раза. Наибольшее поступление ^{137}Cs в сено наблюдается в условиях повышенного увлажнения вегетационного периода, меньшее – при засушливых условиях, самое низкое – при оптимальных условиях увлажнения. В неблагоприятные по увлажнению вегетационные периоды отмечаются более существенные различия между минимальным и максимальным содержанием радионуклида в растениях по сравнению с оптимальными по увлажнению условиями вегетации.

3. На торфяной маломощной почве с содержанием P_2O_5 737 мг/кг и K_2O 665 мг/кг мак-

симальное снижение содержания ^{137}Cs в сене многолетних бобово-злаковых трав первого и второго укосов соответственно 2,2 и 3,0 раза обеспечивает применение $\text{P}_{60}\text{K}_{240}$ (K_{180} под первый укос и K_{60} под второй укос). Применение азотных удобрений под многолетние бобово-злаковые травы в общих дозах от 30 до 90 кг/га на фоне $\text{P}_{90}\text{K}_{180}$ снижает содержание ^{137}Cs в сене первого укоса в среднем в 1,7–2,0 раза, в сене второго укоса в 1,5–1,9 раза по отношению к фосфорно-калийному фону.

4. На торфянисто-глеевой почве с содержанием P_2O_5 875 мг/кг и K_2O 805 мг/кг фосфорные и калийные удобрения в дозах $\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ снижают переход ^{137}Cs из почвы в травы первого укоса на 27–28 % по отношению к контролю. При внесении под первый укос K_{120} также наблюдается снижение поступления ^{137}Cs из почвы в растения. Подкормка трав второго укоса калием в дозе 30 кг/га на фоне $\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ обеспечивает уменьшение коэффициента перехода радионуклида в сено на 50 %. При внесении под второй укос K_{60} на фонах $\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ и $\text{P}_{90}\text{K}_{120}$ поступление радионуклида в растения по отношению к варианту $\text{P}_{90}\text{K}_{120}$ уменьшается несущественно. Внесение под первый укос злаковых трав N_{60} и N_{80} несущественно увеличивает поступление ^{137}Cs в растения. В среднем за годы исследований минимальное содержа-

ние ^{137}Cs в сене первого укоса (33,77 Бк/кг) отмечено в варианте с применением 60 кг/га азота на фоне $\text{P}_{90}\text{K}_{180}$. Вторая азотная подкормка трав приводит к некоторому увеличению накопления ^{137}Cs в сене трав второго укоса по отношению к фосфорно-калийным фонам. Од-

нако его концентрация в растениях не превышает 35 Бк/кг, что более чем на порядок ниже допустимого уровня. Поступление ^{137}Cs в сено при повышенных дозах азотных удобрений ($\text{N}_{120-140}$) снижается на высоком фоне применения калийных удобрений ($\text{P}_{90}\text{K}_{180}$).

Библиографический список

1. Рекомендации по ведению сельскохозяйственного производства на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь на 2021–2025 годы / Н. Н. Цыбулько [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, М-во с. х. и продовольствия Респ. Беларусь, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск : ИВЦ Минфина, 2021. – 144 с.
2. Осушенные торфяные и дегроторфяные почвы в составе сельскохозяйственных земель Республики Беларусь : практ. пособие / В. В. Лапа [и др.] ; под общ. ред. В. В. Лапа ; Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск : ИВЦ Минфина, 2018. – 215 с.
3. Моисеев, И. Т. К вопросу о влиянии минеральных удобрений на доступность ^{137}Cs из почвы сельскохозяйственными растениями / И. Т. Моисеев, Л. А. Рерих, Ф. А. Тихомиров // Агрохимия. – 1986. – № 2. – С. 89.
4. Прогноз накопления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в травяных кормах в зависимости от степени окультуренности дерново-подзолистых почв / И. М. Богдевич [и др.] // Почвоведение и агрохимия : сб. науч. тр. – Минск : РУП «Институт агрохимии и почвоведения НАН Беларуси», 2004. – Вып 33. – С. 139–149.
5. Алексахин, Р. М. Поведение ^{137}Cs в системе почва – растение и влияние внесения удобрений на накопление радионуклида в урожае / Р. М. Алексахин, И. Т. Моисеев, Ф. А. Тихомиров // Агрохимия. – 1992. – № 8. – С. 127–138.
6. Влияние новых форм азотных и калийных удобрений на поступление ^{137}Cs и ^{90}Sr в зеленую массу и сено бобово-злаковых смесей на дерново-подзолистых супесчаных почвах / Г. В. Пироговская, А. М. Русалович, В. И. Сороко, А. С. Силкова, В. Н. Ферсенков // Почвенные исследования и применение удобрений : межведом. темат. сб. / Ин-т почвоведения и агрохимии НАН Беларуси ; под ред. И. М. Богдевича. – Минск, 2003. – Вып. 27. – С. 292–303.
7. Роль химии в реабилитации сельскохозяйственных угодий, подвергшихся радиоактивному загрязнению / Н. И. Санжарова, А. А. Сысоева, Н. Н. Исамов (мл.), Р. М. Алексахин, В. К. Кузнецов, Т. Л. Жигарева // Рос. хим. журн. – 2005. – Т. XLIX. – № 3. – С. 26–34.
8. Пристер, Б. С. Актуальные проблемы кормопроизводства в условиях радиоактивного загрязнения территории / Б. С. Пристер, Г. П. Перепелятникова, М. И. Ильин // Проблема сельскохозяйственной радиологии : сб. науч. тр. / Украин. науч.-исслед. ин-т с.-х. радиологии ; под ред. Н. А. Лощилова. – Киев, 1992. – Вып. 2. – С. 71–88.
9. Бондарь, П. Ф. Некоторые аспекты научного сопровождения ведения растениеводства на загрязненной территории / П. Ф. Бондарь // Проблема сельскохозяйственной радиологии : сб. науч. тр. / Украин. науч.-исслед. ин-т с.-х. радиологии ; под ред. Н. А. Лощилова. – Киев, 1996. – Вып. 4. – С. 107–123.
10. Тулин, С. А. Рекомендации по эффективному применению азота в загрязненной радионуклидами зоне : информ. листок / С. А. Тулин, А. С. Тулина ; Брянский ЦНТИ. – Брянск, 1994. – 3 с.

Поступила 15 ноября 2021 г.