

НАКОПЛЕНИЕ ^{137}Cs ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЕЙ НА АНТРОПОГЕННО-ПРЕОБРАЗОВАННОЙ ТОРФЯНОЙ ПОЧВЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЕЙ АЗОТНОГО И КАЛИЙНОГО ПИТАНИЯ

Н.Н. Цыбулько, кандидат сельскохозяйственных наук

РУП «Институт почвоведения и агрохимии»

г. Минск, Беларусь

А.В. Шашко, младший научный сотрудник

РНИУП «Институт радиологии»

г. Гомель, Беларусь

Аннотация

На антропогенно-преобразованной торфяной почве минимальное накопление ^{137}Cs яровой пшеницей отмечается при калийно-азотном соотношении 1:1,0-1,2. При соотношении 1:0,2-0,6 наблюдается дефицит азота и увеличение концентрации радионуклида в зерне из-за снижения урожайности. Внесение повышенных доз азотных удобрений на низком фоне калийного питания расширяет соотношение N:K, что сопровождается образованием калийного дефицита и ослаблением дискриминации ^{137}Cs по отношению к калию при поступлении в растения. Увеличение накопления радионуклида в зерне наблюдается при соотношении выше 1:1,5.

Ключевые слова: ^{137}Cs , удельная активность, коэффициент перехода, антропогенно-преобразованная торфяная почва, удобрения, калий, азот, соотношение

Abstract

N.N. Tsybulka, A.V. Shashko

THE ACCUMULATION OF ^{137}Cs IN SPRING WHEAT ON ANTHROPOGENIC-TRANSFORMED PEAT SOIL DEPENDING ON NITROGEN AND POTASSIUM NUTRITION LEVELS

On the anthropogenic-transformed peat soil the minimum accumulation of ^{137}Cs with spring wheat is noted at a nitrogen-potassium ratio of 1:1.0-1.2. At a ratio of 1:0.2-0.6, nitrogen deficiency and an increase in radionuclide concentration in grain are observed due to a decrease in yield. The introduction of high rates of nitrogen fertilizers on a low background of potassium nutrition broadens the N:K ratio, which is accompanied by the formation of a potassium deficiency and a decrease in the discrimination of ^{137}Cs with respect to potassium when entering plants. An increase in the accumulation of a radionuclide in the grain is observed at a ratio above 1:1.5.

Keywords: ^{137}Cs , activity, transfer factor, anthropogenic-transformed peat soil, fertilizers, potassium, nitrogen, ratio.

Введение

Генетические особенности почв оказывают существенное влияние на процессы сорбции радионуклидов и интенсивность перехода их в растения. В зависимости от свойств почв содержание обменной формы радионуклидов варьирует от 9 до 40% для ^{137}Cs и от 64 до 93% – для ^{90}Sr [1]. На территории радиоактивного загрязнения в составе сельскохозяйственных земель значительный удельный вес занимают органогенные почвы. Площади торфяных почв с разной мощностью торфа и деградированных торфяно-минеральных почв в загрязненных радионуклидами Гомельской, Могилевской и Брестской областях составляют около 500 тыс. га [2, 3]. Такие почвы отличаются от минеральных более высоким поступлением радио-

нуклидов в растения и являются критичными для получения нормативно чистой сельскохозяйственной продукции. Высокие показатели миграции радионуклидов в растения на этих почвах обусловлены особенностями их морфологического и генетического строения, водно-физическими и агрохимическими свойствами. Из-за повышенной адсорбционной способности органического вещества и емкости катионного обмена, низкого отрицательного поверхностного заряда этих почв значительное количество веществ, в том числе и радионуклидов, удерживается в доступных для растений формах. Ведущим механизмом взаимодействия радионуклидов с почвой является ионный обмен, а основную роль играют фульво- и гуминовые кислоты, находящиеся в почвенном растворе [4, 5].

Основным агрохимическим приемом, снижающим поступление ^{137}Cs в сельскохозяйственные культуры, является внесение калийных удобрений. На почвах разного генезиса под влиянием калия поступление ^{137}Cs в сельскохозяйственные культуры может уменьшаться от 2 до 20 раз [6]. Положительная роль его в снижении поступления радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию возрастает на фоне оптимальных параметров минерального питания растений [7].

Снижение перехода радионуклидов в растения при внесении калийных удобрений напрямую зависят от исходной обеспеченности почвы подвижным калием [8]. Установлено, что уровень содержания подвижного калия в почве, превышение которого не снижает накопление ^{137}Cs в полевых культурах, составляет 240–260 мг/кг почвы. Внесение высоких доз калийных удобрений (180–240 кг/га) на слабообеспеченных почвах (150 мг/кг почвы) снижает в 1,5–2,7 раза содержание ^{137}Cs . На почвах с повышенным (250 мг/кг почвы) и высоким (350 мг/кг почвы) содержанием подвижного калия внесение повышенных доз калийных удобрений малоэффективно [9].

В отличие от калия, азотные удобрения, особенно в повышенных дозах увеличивают в 1,5–4,0 раза накопление радионуклидов в сельскохозяйственных культурах [10]. Принято считать, что основной причиной высокого перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в растения при внесении азотных удобрений является возможное подкисление почвенного раствора и в результате этого повышение подвижности в почве элементов питания, в том числе и радионуклидов.

Усиление поглощения ^{137}Cs при внесении азотных удобрений объясняется повышением количества подвижного радионуклида в почве под влиянием гидратированных ионов аммония, имеющих с радиоцезием сходный по величине ионный радиус, и способных вытеснять его из мест сорбции в почвенный раствор [7]. Однако нитратная форма азота также усиливает поглощение ^{137}Cs хотя и в меньшей степени (в среднем в 2 раза), чем азот в аммонийной форме [11]. Предполагается, что повышенное накопление ^{137}Cs в растениях при внесении азота может происходить в результате сдвига в соотношениях элементов в почвенном растворе [12].

Действие азотных удобрений на миграцию радионуклидов в системе почва–растение зависит от

соотношения азота и калия. Увеличение аккумуляции ^{137}Cs в растениях от азотных удобрений наблюдается при сужении соотношения доступных растений азота и калия в почве ниже 1:3–1:4. Внесение калийных удобрений в более высоких дозах, чем азотных, способствует снижению загрязнения продукции. При расширении N:K более 1:3–1:4 существенного уменьшения накопления растениями ^{137}Cs не происходило [13].

Цель работы – изучить влияние соотношений азотного и калийного питания растений при внесении разных доз удобрений на параметры поступления ^{137}Cs в зерно яровой пшеницы на торфяно-минеральной почве.

Материалы и методы исследований

Исследования проводили в 2012–2014 гг. в стационарном полевом опыте на территории земледелия Государственного предприятия «Новое Полесье» Лунинецкого района Брестской области. Объектом исследования являлась торфяно-минеральная почва. Агрохимические показатели пахотного (0–25 см) слоя почвы следующие (средние значения): органическое вещество – 60,4 %, общий азот – 1,71 %, минеральный азот – 112,8 мг/кг почвы (95 кг/га), pH в KCl – 5,44, подвижные формы (в 0,2 М HCl) P_2O_5 – 748 (620 кг/га) и K_2O – 625 мг/кг почвы (520 кг/га). Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs колебалась от 137 до 167 кБк/м² и в среднем составляла 148 кБк/м².

Возделывали яровую пшеницу сорта Ростань. Фосфорные и калийные удобрения вносили перед посевом, азотные удобрения – перед посевом и в подкормку в фазу выхода в трубку растений. Схема опыта приведена в таблице 1.

Размещение делянок в опыте рендомизированное. Повторность вариантов в опыте четырехкратная. Общая площадь делянки составляла 29 м², учетная площадь – 24 м².

Агрохимические показатели почв определяли по методикам: органическое вещество – по Тюрину в модификации ЦИНАО по ГОСТ 26212–91; pH_{KCl} – потенциометрическим методом по ГОСТ 26483–85; подвижные формы фосфора и калия – по ГОСТ 26207–91; общий азот – по ГОСТ 26107–84; N-NH₄ – по ГОСТ 26489–85; N-NO₃ – по ГОСТ 26488–85.

Отбор проб почвы, подготовку почвенных и растительных проб для определения содержания

Таблица 1. – Схема применения удобрений в опыте

ВАРИАНТЫ ОПЫТА	Сроки и дозы внесения азотных удобрений, кг/га		Соотношение азота и калия (N:K)
	перед посевом	в фазу выхода в трубку растений	
1. Контроль (без удобрений)	-	-	0,1
2. P ₆₀ K ₈₀	-	-	1,2
3. P ₆₀ K ₁₂₀	-	-	0,8
4. P ₆₀ K ₁₆₀	-	-	0,6
5. N ₆₀ P ₆₀ K ₁₂₀	60	-	1,3
6. N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	60	30	1,5
7. N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀	60	60	1,8
8. N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀ +Cu ₂₀₀ + PP	90	30	1,8

¹³⁷Cs проводили по методикам [14-16]. Определение удельной активности ¹³⁷Cs (Бк/кг) в почвенных пробах выполняли на γ - β -спектрометре МКС-АТ1315, в растительных образцах – на γ -спектрометрическом комплексе «Canberra-Packard». Основная относительная погрешность измерений при доверительном интервале P = 95 % не превышала 15–30 %. Аппаратурная ошибка измерений не превышала 15 %. Для оценки поступления ¹³⁷Cs из почвы в растения рассчитывали коэффициент перехода (K_n) – отношение удельной активности радионуклида в растениях к плотности загрязнения почвы на единицу площади (Бк/кг : кБк/м²).

Полученные данные обрабатывали методами корреляционно-регрессионного анализа с использованием компьютерного программного обеспечения (Excel 7.0, Statistic 7.0).

Результаты и их обсуждение.

В наших исследованиях при плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs до 5 Ки/км² удельная активность радионуклида в зерне яровой пшеницы даже в варианте без применения удобрений (контроль) не превышала 20 Бк/кг и составила в среднем в 2012 году 6,67 Бк/кг, в 2013 году – 18,15 и в 2014 году – 16,23 Бк/кг. Различия в содержании ¹³⁷Cs по годам составляли 2,7 раза (таблица 2). Более низкие значения отмечались во влажные годы. По степени увлажнения 2012 и 2014 годы характеризовались как влажные – ГТК составили соответственно 1,66 и 2,02, а 2013 год был слабозасушливым – ГТК равен 1,16.

Применение фосфорных и калийных удобрений в дозах P₆₀K₈₀ при содержании в почве P₂O₅ 748 мг/кг и K₂O 625 мг/кг почвы снижало накопление ¹³⁷Cs в зерне по отношению к контролю от 12 до 20% в зависи-

Таблица 2. – Влияние доз азотных и калийных удобрений на содержание ¹³⁷Cs в зерне яровой пшеницы

ВАРИАНТЫ ОПЫТА	Годы			Среднее значение	Процент к контролю
	2012	2013	2014		
Удельная активность ¹³⁷ Cs в зерне, Бк/кг					
1. Контроль	6,67±1,99	18,15±5,44	16,23±4,87	13,68	100
2. P ₆₀ K ₈₀	5,72±1,72	14,60±4,38	14,22±4,34	11,51	86
3. P ₆₀ K ₁₂₀	4,67±1,38	14,07±4,22	12,54±3,76	10,43	76
4. P ₆₀ K ₁₆₀	5,21±1,56	14,20±4,24	11,32±3,39	10,24	75
5. N ₆₀ P ₆₀ K ₁₂₀	8,40±2,52	13,10±3,86	10,58±3,15	10,69	78
6. N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	9,23±3,01	14,10±4,22	10,58±3,10	11,30	83
7. N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀	11,42±3,49	14,61±4,53	8,90±2,71	11,64	85
8. N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀ +Cu ₂₀₀ + PP	7,89±2,47	12,09±3,27	7,05±2,07	9,01	66

мости от года, а в среднем – на 14 %. Дальнейшее повышение доз калия было менее эффективным. Активность ^{137}Cs в зерне при увеличении дозы в 1,5 раза (K_{120}) уменьшилась в среднем на 24 % к контролю и на 8 % к варианту с K_{80} . Удвоение дозы калийных удобрений (K_{160}) практически не способствовало снижению содержания радионуклида в продукции по отношению к варианту $P_{60}K_{120}$.

Влияние азотных удобрений на поступление ^{137}Cs в растения зависело от доз их внесения и метеорологических условий вегетационного периода в годы исследований. В условиях влажного вегетационного периода 2012 года применение перед посевом яровой пшеницы 60 кг/га действующего вещества азотных удобрений (вариант 3) способствовало увеличению удельной активности ^{137}Cs в зерне в 1,8 раза по отношению к фону $P_{60}K_{120}$. Азотная подкормка в фазу выхода в трубку растений в дозе N_{30} (вариант 4) не привела к существенному повышению накопления радионуклида в продукции по сравнению с предпосевным внесением N_{60} , тогда как более высокая доза азота (N_{60}) в эту фазу увеличила содержание ^{137}Cs в зерне в 1,4 раза.

При совместном применении N_{120} дробно (N_{90} перед посевом и N_{30} в фазу выхода в трубку растений), медьсодержащего удобрения (Cu_{200}) и регулятора роста растений наблюдалось некоторое снижение поступления ^{137}Cs в растения по отношению к вариантам с внесением только азотных удобрений.

В условиях слабо засушливого вегетационного периода 2013 года отмечалось более высокое накопление ^{137}Cs яровой пшеницей по сравнению с влажным 2012 годом. На контроле и на фосфорно-калийном фоне это превышение составило 2,7-3,0 раза, а в вариантах с азотными удобрениями – 1,3-1,5 раза. Различия в содержании радионуклида в зерне между фоном $P_{60}K_{120}$ и вариантами с разными дозами азота были незначительные. Удельная активность ^{137}Cs изменялась в пределах 13,10–14,61 Бк/кг. Минимальное накопление радионуклида (в среднем 12,09 Бк/кг) наблюдалось при совместном применении азотных и медьсодержащего удобрения и регулятора роста растений.

В 2014 году (влажные условия вегетационного периода) азотные удобрения способствовали снижению накопления ^{137}Cs в зерне яровой пшеницы по отношению к фосфорно-калийному фону. Ми-

нимальное содержание радионуклида отмечалось в вариантах с внесением N_{120} и при совместном внесении N_{120} , медьсодержащего удобрения и регулятора роста растений, которое составило соответственно 8,90 и 7,05 Бк/кг.

Таким образом, во все годы исследований, за исключением 2012 года, азотные удобрения даже в повышенных дозах (N_{120}) не оказали существенного влияния на увеличение поступления ^{137}Cs в зерно яровой пшеницы. При содержании радионуклида на фосфорно-калийном фоне в среднем за 3 года 10,43 Бк/кг активность его в вариантах с разными дозами и сроками внесения азотных удобрений колебалась в пределах 10,69-11,64 Бк/кг. Применение полного минерального удобрения (NPK) способствовало снижению накопления ^{137}Cs яровой пшеницей по отношению к контролю (без удобрений) на 15–22 %, а при совместном применении минеральных удобрений, медьсодержащего удобрения и регулятора роста растений – на 34 %.

Расчеты коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в зерно яровой пшеницы показали следующее. За годы исследований в зависимости от метеорологических условий вегетационных периодов различия в переходе ^{137}Cs в зерно составили 1,5-1,8 раза. На контрольном варианте коэффициент перехода варьировал по годам от 0,064 до 0,113 Бк/кг: кБк/м², в среднем был равен 0,088 Бк/кг : кБк/м². В варианте с внесением фосфорных и калийных удобрений в дозах соответственно 60 и 80 кг/га он снизился по отношению к контролю в среднем на 14 % и величина его изменялась по годам от 0,058 до 0,086 при среднем значении 0,076 Бк/кг: кБк/м². При внесении K_{120} и K_{160} переход радионуклида уменьшился по отношению к контрольному варианту соответственно на 24 и 25 % и составил в среднем за 3 года исследований 0,067 и 0,066 Бк/кг: кБк/м² (рисунок 1).

Азотные удобрения, вносимые в дозах 60, 90 и 120 кг/га на фоне $P_{60}K_{120}$, не привели к повышению коэффициентов перехода радионуклида в зерно и изменялись в среднем за 3 года опытов в пределах 0,064-0,069, то есть были на уровне фона $P_{60}K_{120}$. Кроме этого дополнительные обработки посевов медьсодержащим удобрением и регуляторами роста растений значительно снижали величину этого показателя.

Изучено влияние соотношения азотного и калийного питания растений на накопление ^{137}Cs яро-

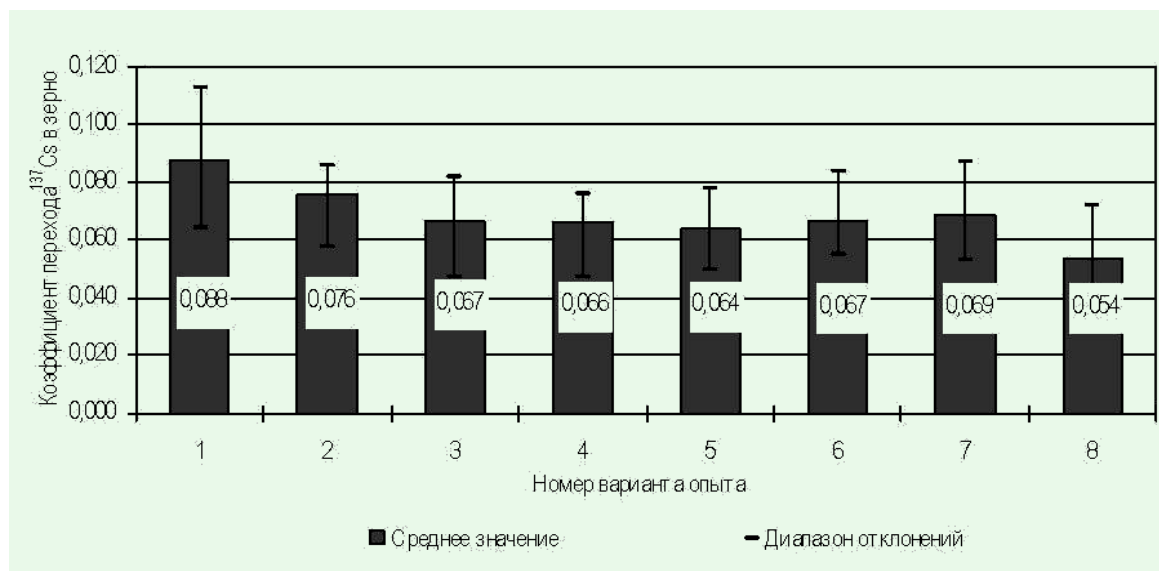


Рисунок 1. – Коэффициенты перехода ^{137}Cs в зерно яровой пшеницы в зависимости от доз азотных и калийных удобрений (Бк/кг: кБк/м²)

вой пшеницей. Содержание доступного растениям азота рассчитывали как сумму минерального азота (азот нитратов, обменного аммония) в пахотном слое почвы и азота удобрений. Уровень калийного питания определялся без внесения калийных удобрений и при внесении их в дозах от 80 до 160 кг/га с интервалом в 40 кг/га действующего вещества. При определении соотношения азота к калию (N:K) за единицу принимали калий. Данное соотношение изменялось в интервале 1:0,1–1,8.

Проведен корреляционно-регрессионный анализ данных соотношения N:K и накопления ^{137}Cs яровой пшеницей. Установлены тесные взаимосвязи соотношения азота и калия в питании растений с удельной активностью ^{137}Cs в зерне ($R=0,85$) и коэффициентами перехода ^{137}Cs в зерно ($R=0,79$). Корреляционные зависимости между анализируемыми показателями описывались квадратичными уравнениями с полиномиальной линией. Минимальное поступление радионуклида в зерно наблюдалось при азотно-калийном соотношении в диапазоне 1:1,0–1,2. При более узком соотношении (1:0,2-0,6) и, следовательно, дефиците в азоте наблюдалось увеличение концентрации ^{137}Cs в зерне в результате снижения урожайности яровой пшеницы. Внесение повышенных доз азотных удобрений на низком фоне калийного питания расширяло соотношение азота к калию, что сопровождалось образованием калийного дефицита и ослаблением дискриминации ^{137}Cs по отношению к калию при поступлении его из почвы в расте-

ния. Увеличение накопления радионуклида в зерно наблюдалось при расширении соотношения азота к калию выше 1:1,5 (рисунок 2).

Следовательно, как показывают результаты исследований, увеличение накопления ^{137}Cs в растениях при внесении азотных удобрений определяется не только повышением их доз, но также зависит от уровня применения калийных удобрений, то есть от сбалансированности азотного и калийного питания растений.

Возделывание сельскохозяйственных культур в соответствии с законодательством Республики Беларусь разрешено на землях с плотностью загрязнения почв ^{137}Cs до 1480 кБк/м² (до 40 Ки/км²) и ^{90}Sr – до 111 кБк/м² (до 3,0 Ки/км²). С целью оптимизации размещения сельскохозяйственных культур по полям и рабочим участкам на загрязненных радионуклидами землях проводится оценка их радиологической пригодности на основе определения предельно допустимой плотности загрязнения почвы ^{137}Cs или ^{90}Sr .

На основании коэффициентов перехода ^{137}Cs в зерно яровой пшеницы, полученных на разных уровнях применения минеральных удобрений, определены допустимые плотности загрязнения почвы (ДПп) при возделывании ее для получения зерна на пищевые и фуражные цели, отвечающего республиканским допустимым уровням (РДУ) и допустимым уровням, принятым в рамках Таможенного союза (ДУТС). Расчеты проводились по формуле:

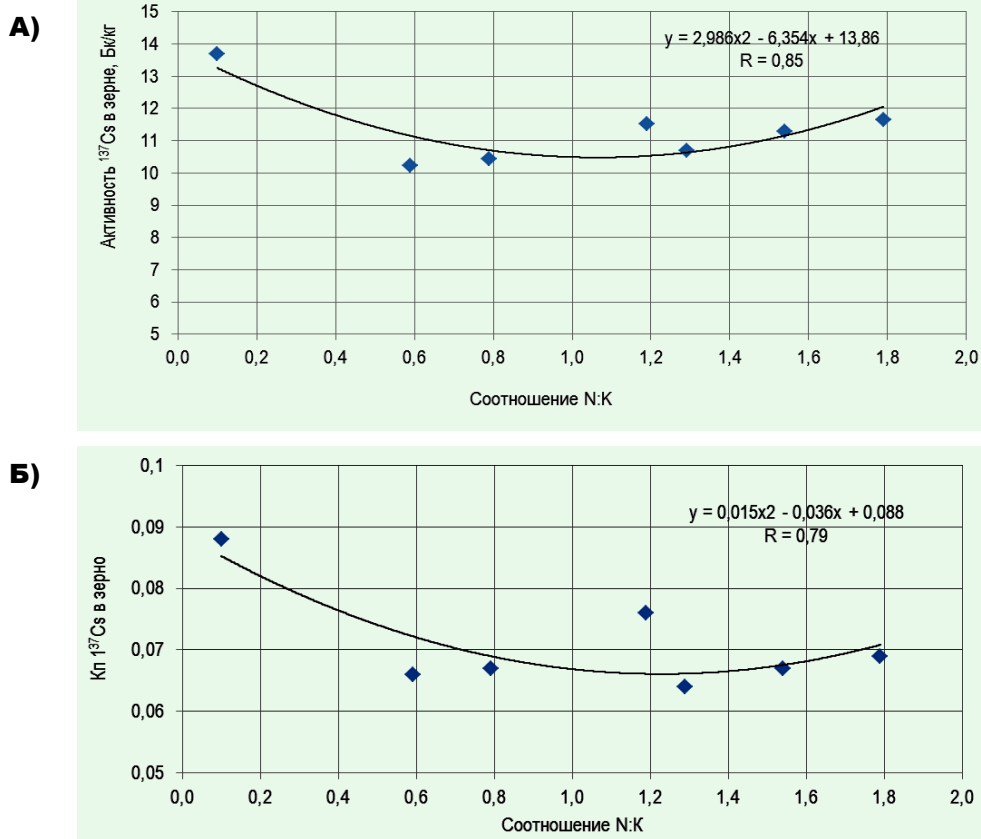


Рисунок 2. – Взаимосвязи соотношения N:K с активностью ¹³⁷Cs в зерне (А) и коэффициентами перехода ¹³⁷Cs в зерно (Б) яровой пшеницы

$$ДП_{п} = \frac{ДУ}{K_{п} \cdot 37}, \quad (1)$$

где $ДП_{п}$ - допустимая плотность загрязнения почвы радионуклидом, Ки/км², $ДУ$ – республиканский допустимый уровень или допустимый уровень в рамках Таможенного союза содержания радионуклида в продукции, Бк/кг, л, $K_{п}$ – коэффициент перехода радионуклида из почвы в растениеводческую продукцию, Бк/кг : кБк/м², 37 – коэффициент пересчета нКи/кг в Бк/кг.

При прогнозе допустимой плотности загрязнения почв учитывалась определенная степень консервативности (прочности прогноза), предусматривающая изменения коэффициентов перехода радионуклидов в растениеводческую продукцию, связанных с особенностями гидротермических условий вегетационных периодов, колебания которых оцениваются в $\pm 30\%$. В наших оценках допустимая плотность загрязнения почв ¹³⁷Cs, где возможно производство продукции изучаемых культур в пределах РДУ или ДУ ТС, принималась на уровне 70 % от расчетной величины.

В условиях радиоактивного загрязнения земель наиболее жестко нормируются по содержанию радионуклидов продовольственные сельскохозяйственные культуры: зерновые (озимая рожь, озимая пшеница ячмень, яровая пшеница, овес), зернобобовые (горох), картофель. В соответствии с Республиканскими допустимыми уровнями (РДУ) содержание ¹³⁷Cs в зерне на пищевые цели не должно превышать 90 Бк/кг, а в зерне на детское питание – 55 Бк/кг [17]. Согласно Техническому регламенту Таможенного союза (ТР ТС 015/2011) «О безопасности зерна» допустимый уровень ¹³⁷Cs в зерне на пищевые цели составляет 60 Бк/кг.

Менее «жесткие» нормативы установлены на содержание ¹³⁷Cs в зерне фуражном. При получении нормативно чистого цельного молока (¹³⁷Cs < 100 Бк/л) допустимый уровень радионуклида в зернофураже составляет 150 Бк/кг, при получении нормативно чистого мяса (¹³⁷Cs < 500 Бк/л) на заключительной стадии откорма – 480 Бк/кг. Техническим регламентом (ТР ТС 021/2011) «О безопасности пищевой продукции» в рамках Таможенного союза установлен более «жесткий» по сравнению с РДУ-99 нор-

матив на содержание ^{137}Cs в мясе, который составляет 200 Бк/кг [18].

На торфяно-минеральной почве с содержанием подвижных форм фосфора и калия 748 и 625 мг/кг почвы соответственно с применением минеральных удобрений яровую пшеницу можно возделывать без ограничений по плотности загрязнения ^{137}Cs для производства фуражного зерна при использовании его для получения цельного молока и мяса, отвечающих нормативным требованиям по содержанию радионуклида (таблица 3).

Более жесткие ограничения установлены в отношении размещения яровой пшеницы на торфяно-минеральных почвах при возделывании ее для полу-

чения зерна на детское питание и зерна на пищевые цели с допустимым содержанием ^{137}Cs , принятом в Таможенном союзе. Получить продовольственное зерно с содержанием радионуклида до 60 Бк/кг возможно при плотности загрязнения почвы до 19,5 Ки/км² и применении невысоких доз азотных удобрений ($\text{N}_{60}\text{P}_{60}\text{K}_{120}$), при внесении повышенных доз (N_{120}) – при плотности загрязнения до 18 Ки/км².

В то же время, совместное применение азотных удобрений в дозе 120 кг/га, медьсодержащих удобрений и регуляторов роста растений позволяет получать зерно на пищевые цели с содержанием ^{137}Cs менее 55-60 Бк/кг при возделывании пшеницы на почвах с плотностью загрязнения до 21,0-23,0 Ки/км².

Таблица 3. – Допустимые плотности загрязнения ^{137}Cs торфяно-минеральной почвы при производстве зерна яровой пшеницы в зависимости от его целевого назначения

ВАРИАНТЫ ОПЫТА	Зерно на пищевые цели			Зерно на фуражные цели		
	РДУ-99, 55 Бк/кг	РДУ-99, 90 Бк/кг	ТР ТС, 60 Бк/кг	РДУ-99 для молока (100 Бк/л)	РДУ-99 для мяса (500 Бк/кг)	ТР ТС для мяса (200 Бк/кг)
1. Контроль	13,0	21,3	14,2	35,6	40,0	40,0
2. $\text{P}_{60}\text{K}_{80}$	15,0	24,6	16,4	40,0	40,0	40,0
3. $\text{P}_{60}\text{K}_{120}$	17,1	28,0	18,6	40,0	40,0	40,0
4. $\text{P}_{60}\text{K}_{160}$	17,3	28,3	18,9	40,0	40,0	40,0
5. $\text{N}_{60}\text{P}_{60}\text{K}_{120}$	17,9	29,3	19,5	40,0	40,0	40,0
6. $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{120}$	17,1	28,0	18,6	40,0	40,0	40,0
7. $\text{N}_{120}\text{P}_{60}\text{K}_{120}$	16,5	27,0	18,0	40,0	40,0	40,0
8. $\text{N}_{120}\text{P}_{60}\text{K}_{120} + \text{Cu}_{200} + \text{PP}$	21,2	34,7	23,2	40,0	40,0	40,0

Выводы

1. Фосфорные и калийные удобрения в дозах $\text{P}_{60}\text{K}_{80}$, при содержании в торфяно-минеральной почве P_2O_5 748 мг/кг и K_2O 625 мг/кг почвы, снижали накопление ^{137}Cs в зерне яровой пшеницы по отношению к контролю на 12–20 % в зависимости от года, в среднем на 14%. Дальнейшее повышение доз калия было менее эффективным. Применение полного минерального удобрения (NPK) уменьшало содержание радионуклида в зерне по отношению к контролю на 15–22 %, а при совместном применении минеральных удобрений, медьсодержащего удобрения и регулятора роста растений – на 34 %.

2. На торфяно-минеральной почве минимальное накопление ^{137}Cs яровой пшеницей отмечается при азотно-калийном соотношении 1:1,0-1,2. При соотношении 1:0,2-0,6 наблюдается дефицит азота и увеличение концентрации радионуклида в зерне из-за

снижения урожайности. Внесение повышенных доз азотных удобрений на низком фоне калийного питания расширяет соотношение N:K, что сопровождается образованием калийного дефицита и ослаблением дискриминации ^{137}Cs по отношению к калию при поступлении в растения. Увеличение накопления радионуклида в зерне наблюдается при соотношении выше 1:1,5.

3. На торфяно-минеральной почве яровую пшеницу можно возделывать без ограничений по плотности загрязнения ^{137}Cs для производства фуражного зерна при использовании его для получения цельного молока и мяса. Размещать культуру для производства зерна на пищевые цели с содержанием ^{137}Cs до 60 Бк/кг возможно при плотности загрязнения почвы до 19,5 Ки/км² и внесении невысоких доз азотных удобрений (N_{60}), а на фоне повышенных доз азотных удобрений (N_{120}) – при плотности загрязне-

ния до 18 Ки/км². Совместное применение азотных удобрений в дозе 120 кг/га, медьсодержащих удобрений и регуляторов роста растений позволяет полу-

чать зерно на пищевые цели с содержанием ¹³⁷Cs менее 55-60 Бк/кг при возделывании пшеницы на почвах с плотностью загрязнения до 21,0-23,0 Ки/км².

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сысоева, А.А. Экспериментальное исследование и моделирование процессов, определяющих подвижность ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в системе почва - растение : автореф. дис. ... канд. биол. наук / А.А. Сысоева. – Обнинск : ВНИИСХРАЭ, 2004. – 29 с.
2. Национальный доклад о состоянии, использовании и охране земельных ресурсов (по сост. на 1 янв. 2011 г) / Гос. ком. по имуществу Респ. Беларусь; под ред. Г.И. Кузнецова. – Минск : РУП «БелНИЦзем», 2011. – 184 с.
3. Мееровский, А.С. Проблемы использования и сохранения торфяных почв. / А.С. Мееровский, В.П. Трибис // Новости науки и технологий. – 2010. – №4 (23). – С. 3-9.
4. Путятин, Ю.В. Минимизация поступления радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в растениеводческую продукцию / Ю.В. Путятин. – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2008. – 268 с.
5. Соколик, Г.А. Действие фульво- и гуминовых кислот на механизмы накопления радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr растительными клетками / Г.А. Соколик // Радиоэкология торфяных почв : материалы Междунар. конф. / Санкт-Петербургский гос. аграр. ун-т. – С-Пб, 1994. – С. 23-24.
6. 20 лет после чернобыльской катастрофы: последствия в Республике Беларусь и их преодоление. Национальный доклад // Под ред. В.Е. Шевчука, В.Л. Гурачевского. – Минск : Комитет по проблемам преодоления последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС при Совете Министров Республики Беларусь, 2006. – 112 с.
7. Алексахин, Р.М. Поведение ¹³⁷Cs 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.
8. Путятин, Ю.В. Влияние кислотности дерново-подзолистой супесчаной почвы и доз калийных удобрений на переход ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в яровую пшеницу / Ю.В. Путятин, Т.М. Серая, О.М. Петрикевич // Почвоведение и агрохимия: сб. науч. тр. Мн.: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2004. – Вып. 33. – С. 163-169.
9. Богдевич, И.М. Урожай и поступление радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в сельскохозяйственные культуры в зависимости от доз калийных удобрений / И.М. Богдевич // Почвенные исследования и применение удобрений : межвед. тематич. сб. – Минск : Ин-т почвоведения и агрохимии, 2003. – Вып. 27. – С. 158-168.
10. Роль химии в реабилитации сельскохозяйственных угодий, подвергшихся радиоактивному загрязнению / Н.И. Санжарова [и др.] // Российский химический журнал. – 2005. – Т. XLIX. – №3. – С. 26-34.
11. Evans, E.J. Effect of nitrogen on caesium-137 in soils and its uptake by oat plants / E.J. Evans, A.J. Dekker // Canadian Journal of Soil Science. – 1968. – Vol. 49. – P. 349-355.
12. Моисеев, И.Т. К вопросу о влиянии минеральных удобрений на доступность ¹³⁷Cs из почвы сельскохозяйственными растениями / И.Т. Моисеев, Л.А. Рерих, Ф.А. Тихомиров // Агрохимия. – 1986. – № 2. – С. 89.
13. Тулина, А.С. Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений на дерново-подзолистых песчаных почвах, загрязненных ¹³⁷Cs : автореф. дис. ... канд. биол. наук. / А.С. Тулина. – М. : ИФХБПП РАН, 2002. – 24 с.
14. Почвы. Отбор проб : ГОСТ 28168-89. – Введ. 01.04.90. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 6 с.
15. Радиационный контроль. Отбор проб сельхозсырья и кормов : СТБ 1056.98. – Введ. 01.07.1998. – Минск : Белстандарт, 1998. – 7 с.
16. Радиационный контроль. Подготовка проб для определения ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs. : СТБ 1059.98. – Введ. 01.07.1998. – Минск : Белстандарт, 1998. – 22 с.
17. Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99) : ГН №10-117-99 : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь № 6 от 26.04. 1999.
18. О безопасности пищевой продукции : технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011 : утв. решением Комиссии Таможенного союза №880 от 9.12. 2011.

Поступила 15.12.2017