



данные об удельной активности радионуклидов в продукции, прогнозных значениях уровней их накопления для планирования размещения культур по полям. Выбор культур для выращивания должен основываться на возможности производства продукции, соответствующей нормативным требованиям по содержанию радионуклидов, с одной стороны, и получения высоких стабильных урожаев хорошего качества при складывающихся климатических условиях, с другой.

Цель исследований – установить плотности загрязнения дерново-подзолистой супесчаной почвы радионуклидами, обеспечивающие производство нормативно чистых зеленых кормов на основе засухоустойчивых культур.

### Основная часть

В качестве объектов исследований использованы засухоустойчивые культуры: сорго сахарное, сорго-суданковый гибрид (ССГ), суданская трава. Экспериментальные исследования проводились в соответствии с методикой полевого опыта [1] на дерново-подзолистой супесчаной почве, загрязнённой радионуклидами чернобыльского происхождения. Средняя плотность загрязнения пахотного горизонта почвы  $^{137}\text{Cs}$  составила 54,2 кБк/м<sup>2</sup> (1,5 Ки/км<sup>2</sup>),  $^{90}\text{Sr}$  – 11,4 кБк/м<sup>2</sup> (0,3 Ки/км<sup>2</sup>).

Схема полевого опыта включала варианты: P<sub>40</sub>K<sub>80</sub>, P<sub>40</sub>K<sub>100</sub>; P<sub>60</sub>K<sub>80</sub>, P<sub>60</sub>K<sub>100</sub>, N<sub>70</sub>P<sub>40</sub>K<sub>80</sub>, N<sub>90</sub>P<sub>40</sub>K<sub>80</sub>; N<sub>70</sub>P<sub>40</sub>K<sub>100</sub>, N<sub>90</sub>P<sub>40</sub>K<sub>100</sub>, N<sub>70</sub>P<sub>60</sub>K<sub>80</sub>, N<sub>90</sub>P<sub>60</sub>K<sub>80</sub>; N<sub>70</sub>P<sub>60</sub>K<sub>100</sub>, N<sub>90</sub>P<sub>60</sub>K<sub>100</sub> и контроль (без удобрений). В качестве удобрений использовались: карбамид, аммонизированный суперфосфат, хлористый калий. Повторность опыта 3-кратная, общая площадь делянки составляла 10 м<sup>2</sup>, учетная – 4 м<sup>2</sup>. Посев широкорядный с шириной междурядий 45 см проводился в начале третьей декады мая, уборка в конце июля, начале августа в период наступления у культур фазы начала выброса метёлки. Определение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в почвенных и растительных образцах выполнялось на  $\gamma$ -спектрометрическом комплексе фирмы Canberra,  $^{90}\text{Sr}$  – радиохимическим методом на низкофоном  $\alpha$ - $\beta$  счетчике Canberra-5S [2]. Для количественной оценки поступления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  из почвы в растения рассчитывали коэффициент перехода – (Кп, Бк/кг:кБк/м<sup>2</sup>) по формуле:

$$\text{Кп} = \text{УА} / \text{П},$$

где УА – удельная активность радионуклида в продукции при стандартной влажности, Бк/кг,  
П – плотность загрязнения почвы радионуклидом, кБк/м<sup>2</sup>.

Предельные допустимые плотности загрязнения почвы для производства нормативно чистых кормов (кБк/м<sup>2</sup>) рассчитывали по формуле:

$$\text{ПДП} = \text{ДУ} / \text{Кп},$$

где ДУ – республиканский допустимый уровень содержания радионуклида в продукции [3], или содержание радионуклида, регламентированное Техническим регламентом Таможенного союза (ТР ТС Корма по [4]) (Бк/кг);

Кп – коэффициент перехода радионуклида из почвы в растениеводческую продукцию (Бк/кг:кБк/м<sup>2</sup>).

Анализируя контрольные варианты, установлено, что средние значения Кп  $^{137}\text{Cs}$  в зеленую массу, убранный в фазу начала выброса метелки, составляют у сорго сахарного  $6,8 \times 10^{-2}$ , ССГ –  $6,5 \times 10^{-2}$  и у суданской травы  $6,4 \times 10^{-2}$  Бк/кг:кБк/м<sup>2</sup>. Отсутствуют существенные различия между культурами по данному показателю. Анализ данных показал, что изменчивость Кп  $^{137}\text{Cs}$  в среднем за 3 года исследований является значительной (коэффициент вариации (V) у сорго сахарного и ССГ 36 и 33 %, соответственно, у суданской травы – 22 %).

Внесение минеральных удобрений обеспечивает достоверное снижение Кп  $^{137}\text{Cs}$  для сорго сахарного до 25 %. Кп  $^{137}\text{Cs}$  в зеленую массу культуры в зависимости от системы удобрений изменяются от  $5,1 \times 10^{-2}$  до  $5,7 \times 10^{-2}$  Бк/кг:кБк/м<sup>2</sup>. Существенных различий между вариантами фосфорно-калийного питания не установлено, однако наибольшее снижение наблюдалось при использовании P<sub>40,60</sub>K<sub>100</sub>. При увеличении дозы калия с 80 до 100 кг/га д.в. Кп  $^{137}\text{Cs}$  в зеленую массу сорго сахарного уменьшается до 7 %. Отмечалось незначительное увеличение Кп  $^{137}\text{Cs}$  в зеленую массу сорго сахарного при использовании азотных удобрений по сравнению с безазотными вариантами. В среднем Кп  $^{137}\text{Cs}$  в зеленую массу ССГ при внесении NPK уменьшается до 31 % по сравнению с контролем. В посевах ССГ при применении азотных удобрений увеличения Кп  $^{137}\text{Cs}$  в зеленую массу культуры не отмечено. Внесение NPK обеспечивает снижение Кп  $^{137}\text{Cs}$  в зеленую массу суданской травы на 13 % по сравнению с контролем и не имеет различий с фонами РК. При использовании полного минерального удобрения минимальное значение Кп  $^{137}\text{Cs}$  в зеленую массу обеспечила система удобрений N<sub>90</sub>P<sub>60</sub>K<sub>100</sub>.

По Кп  $^{90}\text{Sr}$  в зеленую массу сорговые культуры располагаются в следующем ряду (по возрастанию): сорго сахарное 3,74, ССГ – 4,26, суданская трава – 5,93 Бк/кг:кБк/м<sup>2</sup>. Усредненный Кп  $^{90}\text{Sr}$  в зеленую

массу суданской травы на 39 % и 58 % выше, чем в продукцию ССГ и сорго сахарного соответственно. Кп  $^{90}\text{Sr}$  в зеленую массу ССГ на 14 % выше, чем для сорго сахарного.

Изменчивость Кп  $^{90}\text{Sr}$  у сорго сахарного и ССГ незначительная ( $V=10\%$ ), у суданской травы – средняя ( $V=16\%$ ).

Применение минеральных удобрений является эффективным способом снижения (на 23–32 %) поступления  $^{90}\text{Sr}$  в растения сорго сахарного по отношению к контролю. При использовании фосфорно-калийных удобрений наименьший Кп  $^{90}\text{Sr}$  в зеленую массу сорго сахарного получен при внесении  $\text{P}_{60}\text{K}_{80}$ . Увеличение дозы фосфора обеспечивает снижение Кп  $^{90}\text{Sr}$  в вегетативную массу сорго сахарного на 4–5 % на фонах с  $\text{N}_{70}$ ; на 9 % на фонах с  $\text{N}_{90}$ .

Среди вариантов с внесением полного минерального удобрения в посевах сорго сахарного наименьшие Кп  $^{90}\text{Sr}$  в зеленую массу получены при  $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{100}$  и  $\text{N}_{70}\text{P}_{60}\text{K}_{100}$ . Максимальный Кп  $^{90}\text{Sr}$  отмечен при высокой дозе азота и низких фосфора и калия –  $\text{N}_{90}\text{P}_{40}\text{K}_{80}$ . По сравнению с контрольным вариантом применение минеральных удобрений обеспечило уменьшение Кп  $^{90}\text{Sr}$  в зеленую массу ССГ на 12–21 %. Это, в среднем, на 39 % ниже, чем эффективность применения удобрений в посевах сорго сахарного. В варианте с внесением  $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{100}$  в посевах ССГ фиксировался минимальный Кп  $^{90}\text{Sr}$  в зеленую массу. Прослеживалась тенденция снижения интенсивности поступления радионуклида в продукцию суданской травы при увеличении дозы фосфора.

Установленные параметры перехода радионуклидов в продукцию сорговых культур позволяют определить плотность радиоактивного загрязнения почвы и территорию радиоактивного загрязнения, пригодную для производства нормативно чистой зеленой массы сорговых культур (удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  165 Бк/кг и менее для получения цельного молока, не более 600 Бк/кг для получения молока-сырца для переработки, 240 Бк/кг для получения мяса (на заключительной стадии откорма животных);  $^{90}\text{Sr}$  – не более 37 Бк/кг для скормливания КРС и получения цельного молока, 185 Бк/кг – молока-сырца; в соответствии с РДУ и содержание  $^{137}\text{Cs}$  в зеленой массе 100 Бк/кг и менее,  $^{90}\text{Sr}$  – 50 Бк/кг согласно ТР ТС).

Установлено, что даже на контрольных участках ПДП загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  превышают значения, ограничивающие ведение сельскохозяйственного производства в Республике Беларусь (плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  до 1480 кБк/м<sup>2</sup>). Следовательно, на текущий и последующие периоды после чернобыльской катастрофы возделывание сорговых культур на территории радиоактивного загрязнения не ограничивается плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ .

Соответствие нормативным требованиям РДУ для получения молока цельного возможно при скормливание зеленой массы сорго сахарного с неудобренных участков при плотности загрязнения пахотного горизонта почвы  $^{90}\text{Sr}$  не выше 9,9 кБк/м<sup>2</sup> (0,27 Ки/км<sup>2</sup>), ССГ – не более 8,7 кБк/м<sup>2</sup> (0,23 Ки/км<sup>2</sup>) и суданской травы – менее 6,2 кБк/м<sup>2</sup> (0,17 Ки/км<sup>2</sup>) (табл. 1).

Таблица 1. Предельные плотности загрязнения дерново-подзолистой супесчаной почвы  $^{90}\text{Sr}$  для производства зеленой массы сорговых культур для скормливания КРС и получения молока цельного, отвечающей требованиям РДУ

Система удобрений	Сорго сахарное		ССГ		Суданская трава	
	кБк/м <sup>2</sup>	Ки/км <sup>2</sup>	кБк/м <sup>2</sup>	Ки/км <sup>2</sup>	кБк/м <sup>2</sup>	Ки/км <sup>2</sup>
Контроль	9,9	0,27	8,7	0,23	6,2	0,17
$\text{P}_{40}\text{K}_{80}$	13,1	0,36	10,4	0,28	7,7	0,21
$\text{P}_{60}\text{K}_{80}$	14,5	0,39	10,6	0,29	7,9	0,21
$\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	13,5	0,36	10,2	0,28	7,5	0,20
$\text{P}_{60}\text{K}_{100}$	14,0	0,38	10,6	0,29	7,7	0,21
$\text{N}_{70}\text{P}_{40}\text{K}_{80}$	13,4	0,36	10,4	0,28	7,8	0,21
$\text{N}_{70}\text{P}_{60}\text{K}_{80}$	14,1	0,38	10,7	0,29	8,3	0,22
$\text{N}_{70}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	13,7	0,37	9,9	0,27	7,5	0,20
$\text{N}_{70}\text{P}_{60}\text{K}_{100}$	14,2	0,38	10,7	0,29	8,1	0,22
$\text{N}_{90}\text{P}_{40}\text{K}_{80}$	12,9	0,35	10,3	0,28	7,8	0,21
$\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{80}$	14,1	0,38	10,7	0,29	8,2	0,22
$\text{N}_{90}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	13,2	0,36	9,9	0,27	7,4	0,20
$\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{100}$	14,4	0,39	10,9	0,30	8,5	0,23

Для обеспечения нормативных требований ТР ТС плотность загрязнения дерново-подзолистой супесчаной почвы не должна превышать 13 кБк/м<sup>2</sup> (0,36 Ки/км<sup>2</sup>) при возделывании сорго сахарного, 12 кБк/м<sup>2</sup> (0,32 Ки/км<sup>2</sup>) ССГ и 8 кБк/м<sup>2</sup> (0,27 Ки/км<sup>2</sup>) суданской травы (табл. 2). Применение  $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{100}$  позволяет использовать дерново-подзолистые супесчаные почвы с плотностью загрязнения до 14,4 кБк/м<sup>2</sup> (0,39 Ки/км<sup>2</sup>) для выращивания сорго сахарного, отвечающего требованиям РДУ и до 20 кБк/м<sup>2</sup> (0,53 Ки/км<sup>2</sup>), соответствующего ТР ТС. Применение  $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{100}$  в посевах ССГ обеспечивает получение нормативно чистой зеленой массы ССГ при плотности загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  до 10,9 кБк/м<sup>2</sup> (0,30 Ки/км<sup>2</sup>), отвечающей РДУ и ТР ТС, соответственно. При использовании этой же системы

удобрений в посевах суданской травы зеленая масса пригодна для скармливания КРС и получения цельного молока при плотности загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  8,5 кБк/м<sup>2</sup> (0,23 Ки/км<sup>2</sup>) в соответствии с РДУ и до 12 кБк/м<sup>2</sup> (0,31 Ки/км<sup>2</sup>) в соответствии с ТР ТС.

Таблица 2. Предельные плотности загрязнения дерново-подзолистой супесчаной почвы  $^{90}\text{Sr}$  для производства зеленой массы сорговых культур, отвечающей требованиям ТР ТС

Система удобрений	Сорго сахарное		ССГ		Суданская трава	
	кБк/м <sup>2</sup>	Ки/км <sup>2</sup>	кБк/м <sup>2</sup>	Ки/км <sup>2</sup>	кБк/м <sup>2</sup>	Ки/км <sup>2</sup>
Контроль	13	0,36	12	0,32	8	0,23
P <sub>40</sub> K <sub>80</sub>	18	0,48	14	0,38	10	0,28
P <sub>60</sub> K <sub>80</sub>	20	0,53	14	0,39	11	0,29
P <sub>40</sub> K <sub>100</sub>	18	0,49	14	0,37	10	0,27
P <sub>60</sub> K <sub>100</sub>	19	0,51	14	0,39	10	0,28
N <sub>70</sub> P <sub>40</sub> K <sub>80</sub>	18	0,49	14	0,38	11	0,29
N <sub>70</sub> P <sub>60</sub> K <sub>80</sub>	19	0,52	14	0,39	11	0,30
N <sub>70</sub> P <sub>40</sub> K <sub>100</sub>	19	0,50	13	0,36	10	0,27
N <sub>70</sub> P <sub>60</sub> K <sub>100</sub>	19	0,52	14	0,39	11	0,30
N <sub>90</sub> P <sub>40</sub> K <sub>80</sub>	17	0,47	14	0,37	11	0,29
N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>80</sub>	19	0,52	14	0,39	11	0,30
N <sub>90</sub> P <sub>40</sub> K <sub>100</sub>	18	0,48	13	0,36	10	0,27
N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>100</sub>	20	0,53	15	0,40	12	0,31

Ограничения по плотности загрязнения дерново-подзолистой супесчаной почвы  $^{90}\text{Sr}$  для производства зелёной массы, идущей на корм дойному стаду с целью производства молока-сырья, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Предельные плотности загрязнения дерново-подзолистой супесчаной почвы  $^{90}\text{Sr}$  для производства зеленой массы сорговых культур для скармливания КРС для получения молока-сырья на переработку на масло

Система удобрений	Сорго сахарное		ССГ		Суданская трава	
	кБк/м <sup>2</sup>	Ки/км <sup>2</sup>	кБк/м <sup>2</sup>	Ки/км <sup>2</sup>	кБк/м <sup>2</sup>	Ки/км <sup>2</sup>
Контроль	49	1,34	43	1,17	31	0,84
P <sub>40</sub> K <sub>80</sub>	66	1,78	52	1,40	38	1,04
P <sub>60</sub> K <sub>80</sub>	73	1,96	53	1,43	40	1,07
P <sub>40</sub> K <sub>100</sub>	67	1,82	51	1,38	37	1,01
P <sub>60</sub> K <sub>100</sub>	70	1,89	53	1,44	39	1,04
N <sub>70</sub> P <sub>40</sub> K <sub>80</sub>	67	1,81	52	1,41	39	1,06
N <sub>70</sub> P <sub>60</sub> K <sub>80</sub>	71	1,91	53	1,44	41	1,12
N <sub>70</sub> P <sub>40</sub> K <sub>100</sub>	69	1,86	50	1,34	38	1,02
N <sub>70</sub> P <sub>60</sub> K <sub>100</sub>	71	1,92	54	1,45	40	1,09
N <sub>90</sub> P <sub>40</sub> K <sub>80</sub>	64	1,74	51	1,39	39	1,06
N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>80</sub>	71	1,91	54	1,45	41	1,10
N <sub>90</sub> P <sub>40</sub> K <sub>100</sub>	66	1,78	49	1,33	37	1,00
N <sub>90</sub> P <sub>60</sub> K <sub>100</sub>	72	1,95	55	1,48	43	1,15

Для получения молока-сырья пригодны дерново-подзолистые супесчаные почвы с плотностью загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  менее 49 кБк/м<sup>2</sup> (1,34 Ки/км<sup>2</sup>) для возделывания на фоне без удобрений сорго сахарного, менее 43 кБк/м<sup>2</sup> (1,17 Ки/км<sup>2</sup>) для выращивания ССГ и менее 31 кБк/м<sup>2</sup> (0,84 Ки/км<sup>2</sup>) для производства суданской травы.

Применение N<sub>90</sub>P<sub>60</sub>K<sub>100</sub> позволяет использовать дерново-подзолистые супесчаные почвы с плотностью загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  до 72 кБк/м<sup>2</sup> (1,95 Ки/км<sup>2</sup>) для выращивания сорго сахарного, 55 кБк/м<sup>2</sup> (1,48 Ки/км<sup>2</sup>) ССГ. При использовании вышеуказанной системы удобрений в посевах суданской травы зеленая масса пригодна для скармливания КРС и получения молока-сырья при плотности загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  не более 43 кБк/м<sup>2</sup> (1,15 Ки/км<sup>2</sup>).

Таким образом в Гомельской области для выращивания сорго сахарного, зеленая масса которого отвечает требованиям РДУ для получения молока цельного, пригодно 188,7 тыс. га земель, ССГ – 166,0 тыс. га, суданской травы – 115 тыс. га; для получения молока-сырья на переработку – 261,2 тыс. га, 260,4 тыс. га и 256,8 тыс. га соответственно. Непригодными для выращивания сорговых культур с радиологической точки зрения являются всего 374,2 га земель сельскохозяйственного назначения, плотность загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  которых находится в пределах 1,97–3,0 Ки/км<sup>2</sup>. Это является основанием для заключения о возможности включения сорговых культур в структуру посевных площадей на территории радиоактивного загрязнения.

#### Заключение

Сравнительная оценка сорговых культур по интенсивности миграции радионуклидов в звене почва-растение свидетельствует об отсутствии существенных различий по Кп  $^{137}\text{Cs}$  в зеленую массу, убранную в фазу начала выброса метелки. Кп  $^{137}\text{Cs}$  в зеленую массу находятся на уровне у сорго сахарного  $6,8 \times 10^{-2}$ ,

ССГ –  $6,5 \times 10^{-2}$ , у суданской травы  $6,4 \times 10^{-2}$  Бк/кг:кБк/м<sup>2</sup>. По Кп <sup>90</sup>Sr в зеленую массу сорговые культуры достоверно различаясь, располагаются в следующем возрастающем ряду: сорго сахарное 3,74, ССГ – 4,26, суданская трава – 5,93 Бк/кг:кБк/м<sup>2</sup>.

Фактором, сдерживающим поступление радионуклидов в растения, является применение минеральных удобрений, позволяющим снизить Кп <sup>137</sup>Cs в зеленую массу сорго сахарного до 25 %, ССГ – до 31 %, суданской травы – до 17 % по сравнению с контролем. При увеличении дозы калия Кп <sup>137</sup>Cs в зеленую массу сорговых культур уменьшается на 4–8 %. При использовании N<sub>90</sub>P<sub>60</sub>K<sub>100</sub> в посевах всех изучаемых культур Кп <sup>137</sup>Cs в зеленую массу наименьший.

Внесение минеральных удобрений обеспечивает уменьшение Кп <sup>90</sup>Sr в зеленую массу сорго сахарного по сравнению с контролем до 32 %, ССГ – до 21 %, суданской травы – до 27 %. При увеличении дозы фосфора Кп <sup>90</sup>Sr снижается на 3 и 7 %. Минимальный Кп <sup>90</sup>Sr в зеленую массу сорго сахарного, ССГ и суданской травы обеспечивает N<sub>90</sub>P<sub>60</sub>K<sub>100</sub>.

Плотность загрязнения дерново-подзолистой почвы, характеризующейся среднекислой реакцией среды, средним содержанием гумуса и калия и высоким фосфора, не ограничивает возделывание сорговых культур на зеленую массу (фаза начала выброса метелки). Для сорго сахарного наименьшие ограничения по плотности загрязнения почвы <sup>90</sup>Sr 14,4 кБк/м<sup>2</sup> для получения молока цельного и 72 кБк/м<sup>2</sup> для молока-сырца на переработку на масло; для ССГ – 10,9 кБк/м<sup>2</sup> и 55 кБк/м<sup>2</sup>, соответственно, для суданской травы – 8,5 кБк/м<sup>2</sup> и 43 кБк/м<sup>2</sup>, соответственно, обеспечивает N<sub>90</sub>P<sub>60</sub>K<sub>100</sub>.

1. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

2. Методические указания по определению <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs в почвах и растениях / Центр. науч.-исслед. ин-т агрохим. обслуживания сел. хоз-ва; А. В. Кузнецов [и др.]. – М.: ЦИНАО, 1985. – 64 с.

3. Рекомендации по ведению сельскохозяйственного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2021–2025 годы / Нац. акад. наук Беларуси, М-во сел. хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь, Ин-т почвоведения и агрохимии; Н. Н. Цыбулько [и др.]. – Минск: ИВЦ Минфина, 2021. – 144 с.

4. О безопасности кормов и кормовых добавок: ТР 201\_/00\_/ТС [Электронный ресурс] / Комис. Тамож. союза. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200083875>. – Дата доступа: 09.04.2020.