

## **Тема. Применение удобрений на почвах, загрязненных радионуклидами**

Источниками радиоактивного загрязнения природной среды и сельскохозяйственных угодий в мирное время являются аварии на ядерных реакторах, а также утечки радиоактивных отходов при нарушении условий их хранения. По оценкам специалистов, в результате катастрофы на четвертом блоке Чернобыльской АЭС было выброшено не менее 180 Ки радиоактивных веществ, две трети которых выпало на территорию Беларуси. Радиоактивному загрязнению подверглись 45,6 тыс. км<sup>2</sup>, или 23% территории республики, в том числе более 1,856 млн. га сельхозугодий.

Наибольшую опасность представляют стронций-90 и цезий-137. У стронция период полураспада 28, у цезия – 30 лет.

**Радиоактивные изотопы стронция и цезия являются химическими аналогами кальция и калия.** Стронций и цезий отличаются высокой биологической подвижностью и легко поступают в растения. Наблюдается прямая зависимость между их содержанием в почве и поступлением в растения.

80 – 90% долгоживущих радионуклидов сосредоточены в зоне расположения основной массы корней сельскохозяйственных культур и будут доступны растениям еще долгое время. Возможно вторичное загрязнение угодий из-за горизонтальной миграции радионуклидов и в результате ветровой и водной эрозии.

Для организации сельскохозяйственного производства на загрязненных территориях большое значение имеют не только плотность загрязнения, но и **формы радионуклидов, степень их подвижности и доступности.** Долгоживущие радионуклиды цезий-137 и стронций-90 по-разному сорбируются почвами. Стронций-90 в основном закрепляется в почве по типу ионного обмена, цезий-137 более прочно фиксируется твердой фракцией почвы по типу необменной формы в кристаллических решетках почвенных минералов.

Наиболее доступен растениям стронций-90, который в большинстве автоморфных почв представлен обменными формами (60 – 90 %). Доля фиксированных форм стронция-90 невелика и имеет тенденцию к снижению. Особенно высокая подвижность стронция-90 в кислых дерново-подзолистых глеевых песчаных почвах. Почвы с высоким содержанием гумуса (глеевые, перегнойно-глеевые, дерново-глеевые и торфяно-болотные) связывают радиостронций достаточно прочно. Хотя обменные формы стронция достигают 80 % общего его количества, десорбция его происходит очень медленно, что свидетельствует о нахождении стронция-90 в прочносвязанной потенциально доступной форме. Чем выше содержание гумуса в почве, тем прочнее связан в ней радиостронций. Поэтому при известковании загрязненных почв и вне-

сении высоких доз органических удобрений снижается поступление радиостронция в растения.

За период, прошедший после аварии, количество прочносвязанного цезия-137 в основных типах почв значительно увеличилось. В дерново-подзолистых суглинистых почвах с высоким содержанием глинистых минералов за 20-летний период после аварии на Чернобыльской АЭС доля доступных для растений форм цезия-137 значительно уменьшилось и не превышает 5 %. В дерново-подзолистых супесчаных и песчаных почвах доля доступных форм цезия-137 лежит в пределах 10 – 20 %. **Гранулометрический состав** почвы влияет на прочность закрепления радионуклидов. В тяжелых почвах поглощенные радионуклиды, особенно цезий-137, закрепляются сильнее, чем в легких. С уменьшением размеров фракций почвы прочность закрепления стронция-90 и цезия-137 повышается. Наиболее прочно радионуклиды закрепляются илистой фракцией.

Стронция-90 в растения поступает, как правило, примерно в 10 раз больше, чем цезия-137. Только на дерново-подзолистых почвах легкого гранулометрического состава и торфяных радиоцезия поступает в растения больше, чем стронция-90. На поступление радионуклидов в растения большое влияние оказывает **уровень плодородия почвы**. Так, с увеличением содержания гумуса в супесчаной почве с 1 – 1,5 до 2,1 – 3,0 % цезия-137 в многолетние злаковые травы поступает в 1,3 раза меньше, а стронция-90 – в 1,2 раза. При увеличении содержания в почве подвижного калия с 50 – 80 до 141 – 200 мг/кг переход цезия-137 и стронция-90 в многолетние злаковые травы снижался в 1,8 раза.

На поступление радионуклидов в растения большое влияние оказывают **гранулометрический состав и водный режим почв**. На песчаных почвах многолетние травы поглощали их в 1,4 раза, зернобобовые культуры – в 2 раза, озимая рожь, ячмень и овес – в 3 раза больше по сравнению с посевами этих культур на суглинках. Переход радиоцезия в многолетние травы в 10 – 27 раз выше на дерново-глеевых и дерново-подзолисто-глеевых почвах по сравнению с автоморфными разновидностями этих почв.

**На накопление радионуклидов в растениеводческой продукции влияют продолжительность вегетационного периода, видовые и сортовые особенности питания** и другие биологические особенности растений. Различия в накоплении цезия-137 растениями разных видов (в расчете на сухое вещество) могут достигать 20 – 180 раз, стронция-90 – до 30 раз. Озимые зерновые культуры (рожь, пшеница), как правило, накапливают стронция-90 и цезия-137 в 2 – 2,5 раза меньше, чем яровые (пшеница, овес, ячмень). Поэтому увеличение посевов озимых культур и сокращение яровых в известной мере может снизить уровень загрязнения растениеводческой продукции.

Поздние сорта обычно накапливают радионуклидов в 1,5 – 2 раза меньше, чем ранние.

Бобовые культуры сильнее накапливают стронций-90. Из овощных больше всего стронция-90 накапливают корнеплоды столовой свеклы и моркови, меньше всего его содержат плоды томатов и клубни картофеля, что объясняется разной концентрацией кальция в этих частях растений. Накопление цезия-137 и стронция-90 может различаться в 1,5 – 3 раза в зависимости от сорта одной и той же культуры. Поздние сорта, как отмечалось, меньше накапливают радионуклидов.

Задачей земледелия на загрязненных территориях является получение продукции с содержанием радионуклидов в безопасных для здоровья человека количествах. Для прогнозирования возможной степени загрязнения сельскохозяйственных культур, выращиваемых на почвах, содержащих радионуклиды, разработаны **коэффициенты пропорциональности**, определяемые как отношение между уровнем загрязнения почвы и растений. Такие коэффициенты помогают рационально размещать культуры по полям, с тем, чтобы получать растениеводческую продукцию с минимально возможным уровнем содержания радионуклидов.

При возделывании сельскохозяйственных культур на загрязненных радионуклидами территориях используются агромероприятия, направленные на снижение поступления радионуклидов в растения.

На загрязненных территориях должны выращиваться культуры, накапливающие радионуклидов меньше, чем другие. Меньше радионуклидов накапливают растения с более низким содержанием кальция и калия.

По количеству накапливаемого цезия-137 на единицу сухого вещества сельскохозяйственные культуры располагаются (по убывающей) в следующей последовательности: разнотравье естественных сенокосов и пастбищ, люпин; многолетние злаковые травы, клевер, рапс, горох, зеленая масса кукурузы, солома овса, однолетние злаково-бобовые смеси, картофель, зерно овса, солома ячменя, зерно озимой ржи, зерно ячменя.

По содержанию стронция-90 в сухом веществе сельскохозяйственные культуры располагаются в аналогичной последовательности так: клевер, горох, рапс, люпин, однолетние злаково-бобовые смеси, разнотравье естественных сенокосов и пастбищ, многолетние злаковые травы, солома ячменя, солома овса, зеленая масса кукурузы и озимой ржи, солома озимой ржи, кормовая свекла, зерно ячменя, овса, озимой ржи, клубни картофеля.

Как показали исследования, на всех загрязненных территориях, где допускается проживание людей и ведение сельскохозяйственного производства (плотность загрязнения радиоцезием до 185 кБк/м<sup>2</sup>, стронцием-90 – 12,3 кБк/м<sup>2</sup>), используя рекомендуемые агроприемы, можно получать основную

продукцию зерновых культур и картофеля с содержанием радионуклидов в пределах нормы (РДУ-92).

На дерново-подзолистых почвах легкого гранулометрического состава (песчаных и супесчаных), а также торфяных с плотностью загрязнения стронцием-90 более  $0,3 \text{ Ки/км}^2$ , картофель на пищевые цели возделывать не рекомендуется, но можно выращивать его на фураж, а также технический.

Кормовые корнеплоды, кукурузу на зеленый корм, выращенные на почвах с плотностью загрязнения стронцием-90 свыше  $1 \text{ Ки/км}^2$ , можно использовать на корм откармливаемому поголовью и не рекомендуется использовать для дойного стада. При степени загрязненности дерново-подзолистых почв цезием-137  $5 - 15 \text{ Ки/км}^2$  и стронцием-90  $- 0,3 - 0,1 \text{ Ки/км}^2$  лучше высевать клеверо-злаковые травосмеси, требующие минимальных доз азота. Высев только злаковых травосмесей требует внесения повышенных доз азота, а это усиливает загрязнение растений цезием-137.

Садово-огородные культуры также в разной степени накапливают радионуклиды. В силу своих биологических особенностей наиболее «чистыми» являются картофель, огурцы, помидоры, редис и капуста, затем столовая свекла и морковь. Интенсивнее других накапливают радионуклиды горох, фасоль, бобы, из зеленных культур – щавель.

Наиболее «чистыми» ягодными культурами являются земляника, крыжовник, малина. В большей мере загрязняются радионуклидами черная и красная смородина. Относительно мало радионуклидов накапливают семечковые и косточковые культуры (яблоки, груши, вишни, сливы и т.д.).

*Существенно* снизить поступление радионуклидов помогают следующие *агрохимические мероприятия*: известкование, внесение органических удобрений и сапропелей, повышенных доз фосфорных и калийных удобрений, минимизация доз азотных удобрений по данным почвенно-растительной диагностики. Если соотношение основных элементов питания будет нарушено в сторону увеличения азотного питания, это может привести к усиленному накоплению растениями цезия-137.

Система удобрения сельскохозяйственных культур в зоне радиационного загрязнения предусматривает также расчет оптимальных доз удобрений, обеспечивающих сбалансированное минеральное питание растений и, как следствие, увеличение урожайности. Тем самым происходит «разбавление» содержания радионуклидов на единицу массы урожая. Как отмечалось, поступление в растения стронция можно значительно снизить известкованием, усилив в почвенном растворе конкуренцию между ионами стронция и кальция, которые являются антагонистами. При нейтрализации кислотности в 1,5 – 3,0 раза снижается поступление стронция-90 и цезия-137 в растения. Особенно благоприятно известкование загрязненных почв сказывается при посе-

ве кормовых трав и овощных культур. Дозы извести дифференцируются в зависимости от плотности загрязнения почв. Дозы известковых удобрений для известкования кислых почв, загрязненных радионуклидами, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Дозы известковых удобрений на загрязненных радионуклидами землях

Почвы	рН в КС1	Доза СаСО <sub>3</sub> на незагрязненных землях, т/га	Доза СаСО <sub>3</sub> (т/га) при плотности загрязнения, (Ку/км <sup>2</sup> )	
			<sup>137</sup> Cs 1 – 5, <sup>90</sup> Sr 0,15 – 0,30	<sup>137</sup> Cs >5, <sup>90</sup> Sr > 0,3
Пахотные земли				
Дерново-подзолистые: суглинистые	< 4,5	8,5	8,5	15,0
	4,6 – 5,0	7,5	7,5	13,0
	5,1 – 5,5	6,5	6,5	11,0
	5,6 – 6,0	4,5	4,5	7,0
супесчаные	< 4,5	6,5	6,5	11,5
	4,6 – 5,0	5,5	5,5	9,5
	5,1 – 5,5	4,5	4,5	7,0
	5,6 – 6,0	-	3,0	4,0
песчаные	< 4,5	5,5	5,5	8,5
	4,6 – 5,0	4,5	4,5	6,5
	5,1 – 5,5	3,5	3,5	4,5
торфяно-болотные	< 4,0	12	19,0	19,0
	4,1 – 4,5	7,0	11,0	11,0
	4,6 – 5,0	4,0	6,0	6,0
Улучшенные луговые земли				
Дерново-подзолистые: суглинистые	< 4,5	9,0	9,0	15,5
	4,6 – 5,0	8,0	8,0	13,5
	5,1 – 5,5	6,5	6,5	11,5
	5,6 – 6,0	4,5	4,5	7,5
супесчаные	< 4,5	7,0	7,0	11,5
	4,6 – 5,0	6,0	6,0	10,0
	5,1 – 5,5	4,5	4,5	7,5
	5,6 – 6,0	-	3,5	5,0
песчаные	< 4,5	6,0	6,0	9,0
	4,6 – 5,0	5,0	5,0	7,0
	5,1 – 5,5	4,0	4,0	5,0
торфяно-болотные	< 4,0	12,0	19,0	19,0
	4,1 – 4,5	7,0	11,0	11,0
	4,6 – 5,0	4,0	6,5	6,5

При небольшой плотности загрязнения 1 – 5 Ку/км<sup>2</sup> по цезию-137 и 0,15 – 0,3 Ку/км<sup>2</sup> по стронцию-90 дозы извести увеличиваются только на торфяных почвах и дополнительно известкуются рыхлосупесчаные почвы с рН 5,51 – 5,71, связно-супесчаные – с рН 5,51 – 6,00.

При более высокой плотности загрязнения 5 – 40 Ку/км<sup>2</sup> по цезию-137 или 0,3 – 3,0 Ку/км<sup>2</sup> по стронцию-90 дозы известковых удобрений повыша-

ются из расчета доведения реакции почвенной среды до оптимального уровня за один прием. В случае, когда разовая доза превышает 8 т/га, известь вносится в два приема: 0,5 дозы под вспашку и 0,5 дозы под культивацию. На сенокосах и пастбищах известь вносится под предпосевную культивацию при Perezalужении или коренном улучшении. Первоочередному известкованию подлежат почвы I и II группы кислотности в связи с высоким переходом радионуклидов из почвы в растение.

Работы по известкованию супесчаных почв с pH 5,51 – 6,0 и торфяных с pH 5,0 и ниже при плотности загрязнения земель по цезию-137 1 – 5 Ки/км<sup>2</sup> и 0,2 – 0,3 Ки/км<sup>2</sup> по стронцию-90, а также на всех кислых почвах с плотностью загрязнения 5 – 40 Ки/км<sup>2</sup> по цезию-137 или 0,3 – 3,0 Ки/км<sup>2</sup> по стронцию-90 финансируются за счет средств, направляемых на преодоление последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС.

При внесении фосфорных удобрений происходит фиксация стронция фосфатами и снижается его поступление в растения. Поэтому на почвах с низким содержанием подвижных фосфатов дополнительно вносятся фосфорные удобрения. Дозы основного и дополнительного применения фосфорных удобрений дифференцируются по сельскохозяйственным угодьям, типам почв, содержанию фосфора в почве и плотности загрязнения цезием-137 и стронцием-90 (табл. 2).

Внесение калийных удобрений уменьшает поступление цезия-137 в растения примерно в два раза. Это объясняется тем, что калий и цезий являются катионами-антагонистами.

При плотности загрязнения 1 – 2 Ки/км<sup>2</sup> на пахотных минеральных почвах дополнительно вносят от 15 до 50 кг/га калийных удобрений (в зависимости от обеспеченности калием), на сенокосах и пастбищах – 15 – 40 кг/га, при плотности загрязнения от 5 до 15 Ки/км<sup>2</sup> соответственно от 30 до 100 кг/га на пашне и 30 – 80 – на кормовых угодьях, при загрязнении от 15 до 40 Ки/км<sup>2</sup> – от 45 до 150 и от 45 до 120 кг/га (табл. 3).

Таблица 2. Нормативы основной и дополнительной потребности в фосфорных удобрениях на загрязненных радионуклидами землях

Почва	Содержание P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг почвы	Основная потребность P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , кг/га	Дополнительная потребность P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (кг/га) при плотности загрязнения, Ки/км <sup>2</sup>		
			<sup>137</sup> Cs 1–4,9 <sup>90</sup> Sr 0,15–0,29	<sup>137</sup> Cs 5–14,9 <sup>90</sup> Sr 0,30–0,99	<sup>137</sup> Cs 15–40 <sup>90</sup> Sr 1,00–3,00
<b>Пашня</b>					

Дерново-подзолистая	Менее 60	45	15	30	45
	61–100	40	10	20	30
	101–150	35	5	10	15
	151–250	20	–	5	10
	251–400	10	–	–	–
Торфяные	Менее 200	60	20	40	60
	201–300	45	15	30	45
	301–500	30	10	20	30
	501–800	20	–	5	10
	800–1200	10	–	–	–
<b>Сенокосы и пастбища</b>					
Дерново-подзолистые, дерновые	Менее 60	35	15	30	45
	61–100	30	10	20	30
	101–150	25	5	10	15
	151–250	10	–	5	10
	251–400	–	–	–	–
Торфяно-болотная	Менее 200	55	15	30	45
	201–300	40	10	20	30
	301–500	35	5	10	15
	501–800	20	–	5	10
	801–1200	–	–	–	–

Таблица 3. Нормативы основной и дополнительной потребности в калийных удобрениях на загрязненных радионуклидами землях

Почва	Содержание $K_2O$ , мг/кг почвы	Основная потребность $P_2O_5$ , кг/га	Дополнительная потребность $K_2O$ (кг/га) при плотности загрязнения, $Ku/km^2$		
			$^{137}Cs$ 1–54,9 $^{90}Sr$ 0,15–0,29	$^{137}Cs$ 5–14,9 $^{90}Sr$ 0,30–1,99	$^{137}Cs$ 15–40 $^{90}Sr$ 2,00–3,00
<b>Пашня</b>					
Дерново-подзолистая	Менее 80	100	50	100	150
	81–140	90	30	60	90
	141–200	80	20	40	60
	201–300	55	15	30	45
	Более 300	25	–	–	–
Торфяные	Менее 200	140	40	80	120
	201–400	120	30	60	90
	401–600	100	20	40	60
	601–1000	60	10	20	30
	Более 1000	30	–	–	–
<b>Сенокосы и пастбища</b>					
Дерново-подзолистые, дерновые	Менее 80	80	40	80	120
	81–140	70	30	60	90
	141–200	60	20	40	60
	201–300	45	15	30	45
	Более 300	20	–	–	–
Торфяно-болотная	Менее 200	100	40	80	120
	201–400	90	30	60	90
	401–600	80	20	40	60
	601–1000	60	10	20	30
	Более 1000	30	–	–	–

Высокие дозы азотных удобрений на загрязненных почвах, особенно при несбалансированном их соотношении с фосфорными и калийными, как отмечалось, повышает накопление радионуклидов в сельскохозяйственных культурах. Избыточное азотное питание растений повышает 1,2 – 1,3 раза поступление радионуклидов в растения по сравнению с оптимальными. Поэтому дозы азотных удобрений должны быть оптимальными. Для зерновых

культур они корректируются по данным почвенно-растительной диагностики.

Для регулирования соотношения азота, фосфора и калия, вносимых с удобрениями, а также минимизации влияния азота на накопление радионуклидов и нитратов в растениеводческой продукции введены предельно допустимые дозы азотных удобрений под сельскохозяйственные культуры (табл. 4).

Таблица 4. Максимальные дозы азотных удобрений под сельскохозяйственные культуры на минеральных почвах

Культура	Органические удобрения, т/га (фон)	Максимальная годовая доза азотных удобрений, кг/га д.в.
Картофель	60 – 70	110
Озимые зерновые	20 – 30	110
Яровые зерновые	–	110
Сахарная свекла	70 – 80	120
Кормовая свекла	75 – 100	150
Кукуруза на зеленую массу	60 – 70	150
Многолетние злаковые травы (сено)	–	180
Капуста	70	120
Морковь	–	90
Томаты	40	90
Огурцы	120	90
Столовая свекла	40	90
Лук-репка	40	90
Зеленые культуры	40	60

Важным звеном оптимизации азотного питания растений является применение новых медленнодействующих азотных удобрений с добавками гуматов и других биологически активных компонентов, выпускаемых ОАО «Гродно-Азот». Применение медленнодействующих азотных удобрений позволяет повысить на 20 % их окупаемость прибавкой урожая при одновременном уменьшении содержания радионуклидов на 15 – 30 %, а также снижения накопления нитратов в картофеле, овощах и кормовых корнеплодах. Карбамид медленнодействующий с гуматсодержащими добавками рекомендуется к применению на почвах разного гранулометрического состава, но в первую очередь на рыхлых почвообразующих породах под все полевые и овощные культуры в обычных дозах.

Микроэлементы выполняют важные функции в процессах жизнедеятельности растений и являются необходимым звеном системы удобрения сельскохозяйственных культур. Недостаточное их содержание в почве зача-

стую является фактором, лимитирующим формирование урожая и качества продукции сельскохозяйственных культур. Прибавка урожая от применения борных, цинковых и марганцевых удобрений достигает 10 – 15%, улучшается качество продукции, ее хранение, товарный вид. Экономически выгодным и экологически безопасным приемом является применение микроудобрений в виде некорневых подкормок. Целесообразно, в целях энергосбережения, совмещать применение микроудобрений со средствами защиты растений, регуляторами роста, подкормками азотом.

Микроудобрения следует применять, прежде всего, на почвах первой и второй группы обеспеченности на известкованных почвах ( $pH_{КСI}$  6,0 и выше), так как на таких почвах доступность ряда микроэлементов снижается. Очень важно своевременно предупредить проявление недостатка микроэлементов для растений путем проведения некорневой подкормки в фазе самой высокой потребности и максимального усвоения микроэлемента. Рекомендуемые дозы и сроки некорневых подкормок сельскохозяйственных культур микроэлементами те же, что и на незагрязненных радионуклидами почвах.