

УДК 631.811:633.1:539.16.04

Н. Н. ЦЫБУЛЬКО¹, Д. В. КИСЕЛЕВА²

ВЛИЯНИЕ УРОВНЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ АЗОТНЫХ И КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ НА НАКОПЛЕНИЕ ¹³⁷CS В РАСТЕНИЯХ И ПРОДУКТИВНОСТЬ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

¹Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС,

²Могилевский филиал Института радиологии

(Поступила в редакцию 19.02.2009)

Введение. Тема снижения дозовых нагрузок на население наиболее актуальна в комплексе чернобыльских проблем. По экспертным оценкам, около 70% коллективной дозы формируется за счет поступления радионуклидов в организм человека с продуктами питания [1]. В то же время за послеаварийный период переход радиоцезия из почвы в продукцию снизился более чем на порядок: около 55% снижения обусловлено проведением контрмер, 45% – природными факторами распада и фиксации его почвой [2].

Основным агрохимическим приемом, снижающим поступление ¹³⁷Cs в растения, является внесение калийных удобрений. Калий, являясь химическим аналогом радиоцезия, конкурирует с ним в процессе минерального питания растений. Снижение миграции ¹³⁷Cs в системе почва – растение при применении калийных удобрений связано, с одной стороны, с антагонистическим характером отношения цезия и калия в почвенном растворе, а с другой – эффектом разбавления в надземной массе растений.

Установлено, что интенсивность поступления ¹³⁷Cs в растения зависит от режима азотного питания, однако механизм воздействия азота до конца не изучен. Усиление поглощения ¹³⁷Cs при внесении азотных удобрений связывают с увеличением количества подвижных форм радионуклида в почве под влиянием гидратированных ионов аммония, имеющих с цезием сходный по величине ионный радиус и способных вытеснять его из мест сорбции [3–5]. Однако NH₄⁺ и K⁺ десорбируют ¹³⁷Cs как с поверхности почвенных частиц, так и с поверхности корней, при этом применение калия существенно снижает содержание цезия в растениях, а внесение азота увеличивает [6–8]. Нитратные формы азота также усиливают поглощение ¹³⁷Cs растениями, хотя и в меньшей степени (в среднем в 2 раза), чем азот в аммонийной форме [9].

Существует предположение, что увеличение поступления ¹³⁷Cs из почвы в растения может происходить в результате изменения соотношения элементов в почвенном растворе при внесении азотных удобрений [5]. Исследования некоторых авторов показывают, что азотные удобрения обладают мобилизующим действием на ¹³⁷Cs почвы [10].

Наряду с вопросами снижения загрязнения растениеводческой продукции актуальным является повышение эффективности ее производства. Сохраняющаяся необходимость проведения масштабных контрмер негативно отражается на конкурентоспособности производимой продукции. В определенной степени это объясняется тем, что дорогостоящие защитные меры (известкование кислых почв, внесение повышенных доз фосфорных и калийных удобрений) применяются на фоне низких уровней азотных удобрений, что приводит к несбалансированности между элементами минерального (NPK) питания растений, снижению урожайности сельскохозяйственных культур и качества продукции.

Цель настоящей работы – изучить параметры перехода ¹³⁷Cs из почвы в товарную продукцию зерновых культур в зависимости от азотного и калийного питания растений и определить опти-

мальные уровни азотных и калийных удобрений, обеспечивающие минимальное накопление ^{137}Cs в товарной части урожая и наиболее эффективное применение удобрений.

Объекты и методика исследований. Исследования проводили в 2006–2007 гг. в полевом опытном стационаре, расположенном на территории землепользования СПК «Зарянский» Славгородского района Могилевской области. Почва опытного участка – дерново-подзолистая супесчаная на водно-ледниковых рыхлых супесях, подстилаемых песками с глубины 0,3 м и моренными суглинками с глубины 0,7 м. Агрохимические показатели пахотного горизонта почвы: pH_{KCl} 5,74–6,24; гумус – 1,71–2,34%, $\text{N}_{\text{общ}}$ – 960–1000 мг/кг почвы, P_2O_5 – 241–305, K_2O – 213–294 мг/кг почвы. Удельная активность ^{137}Cs в верхнем гумусовом горизонте почвы составляла 1665–2192 Бк/кг, плотность загрязнения почвы – 500–660 кБк/м².

Метеорологические условия вегетационных периодов 2006–2007 гг. характеризовались повышенной влажностью: гидротермический коэффициент в 2006 г. составил 1,7, в 2007 г. – 2,1.

Исследования проводили в полевом опыте. Общая площадь делянок 72 м², учетная площадь 45 м². Повторность опыта четырехкратная. В 2006 г. возделывали яровой ячмень (*Hordeum distichum* L.) сорта Тюрингия, в 2007 г. – озимую рожь (*Secale cereale* L.) сорта Игуменская.

В соответствии со схемой опыта фосфорные (аммофосфат) и калийные (калий хлористый) удобрения вносили перед посевом культур. Сроки применения азотных удобрений (карбамид): N^{I} – под ячмень перед посевом, под озимую рожь при возобновлении весенней вегетации; N^{II} – под ячмень и озимую рожь в фазу выхода в трубку растений (таблица).

Удельную активность ^{137}Cs в почвенных и растительных образцах определяли на γ - β -спектрометре МКС-АТ1315. Средняя ошибка измерения ^{137}Cs в растительных образцах 2,0 Бк/кг. Основная относительная погрешность измерений активности $\pm 30\%$. В пахотном горизонте почвы определяли: гумус – по методу Тюрина, $\text{N}_{\text{общ}}$ – по Кьельдалю-Иодльбауеру, P_2O_5 и K_2O – по Кирсанову. Полученные данные обрабатывали статистическими методами дисперсионного и корреляционного анализов с использованием стандартного компьютерного программного обеспечения (*Excel 7.0*, *Statistic 7.0*).

Результаты и их обсуждение. В стационарном полевом опыте на окультуренной дерново-подзолистой супесчаной почве изучено действие разных уровней азотного и калийного питания на поступление ^{137}Cs в растения ячменя и озимой ржи. В результате исследований установлены закономерности перехода радиоцезия из почвы в растения при сочетании разных доз азотных и калийных удобрений.

Удельная активность ^{137}Cs зерна ячменя в варианте без удобрений (контроль) и при внесении $\text{P}_{60}\text{K}_{90}$ составила 7,5 Бк/кг, на фоне $\text{P}_{60}\text{K}_{120}$ снизилась незначительно – до 6,3 Бк/кг ($\text{НСР}_{0,05} = 1,2$ Бк/кг). Применение более высокой дозы калийных удобрений (K_{150}) также не способствовало достоверному снижению поступления ^{137}Cs в зерно ячменя (рис. 1).

Изучение азотных удобрений показало, что при внесении повышенных доз (90 кг/га и более) наблюдается существенное увеличение накопления радиоцезия в растениях. Так, при активности ^{137}Cs в зерне на фоне $\text{P}_{60}\text{K}_{90}$ 7,5 Бк/кг с повышением доз азота от 90 до 120 кг/га она возрос-

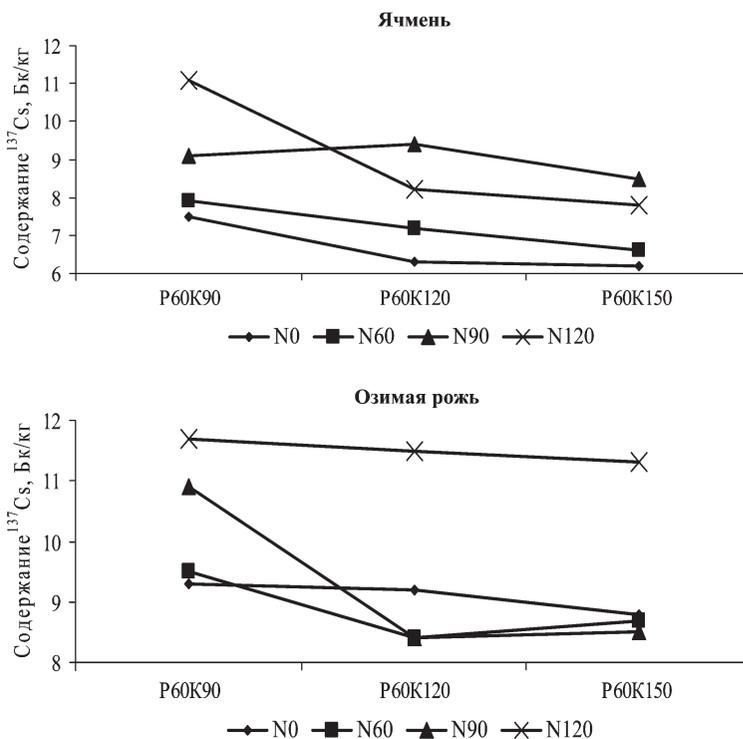


Рис. 1. Зависимость накопления ^{137}Cs в зерне ячменя и озимой ржи от уровней азотного и калийного питания

ла от 9,1 до 11,1 Бк/кг. На фонах с более высокими уровнями применения калия (K_{120} и K_{160}) отрицательное воздействие азотных удобрений снижалось. Так, активность ^{137}Cs в зерне была практически одинаковой (7,8–7,9 Бк/кг) при внесении N_{60} на фоне $P_{60}K_{90}$ и N_{120} – на фоне $P_{60}K_{150}$.

Установлено [11, 12], что ячмень характеризуется более высокими параметрами перехода радионуклидов по сравнению с озимой рожью. В наших исследованиях в связи с более высокой увлажненностью вегетационного периода 2007 г. активность ^{137}Cs в зерне озимой ржи была несколько выше, чем в зерне ячменя, возделываемого в 2006 г.

В варианте с внесением под озимую рожь $P_{60}K_{90}$ удельная активность ^{137}Cs в зерне составляла 9,3 Бк/кг, а в вариантах с более высокими дозами калийных удобрений ($K_{120-150}$) снизилась несущественно.

При внесении азотных удобрений в дозах от 60 до 120 кг/га наблюдалась только тенденция к увеличению перехода ^{137}Cs в растения. Так, на фоне $P_{60}K_{90}$ содержание радиоцезия в зерне составило 9,3 Бк/кг, а в вариантах с N_{90} и N_{120} – 10,9 и 11,7 Бк/кг соответственно.

На фоне с применением калия в дозе 120 кг/га отрицательное воздействие азотных удобрений на озимой ржи снижалось. При более высоком уровне внесения калийных удобрений (K_{150}) не наблюдалось дальнейшего положительного влияния калия. Так, удельная активность ^{137}Cs в зерне была практически одинаковой (8,4–8,7 Бк/кг) при внесении N_{60} и N_{90} на фоне $P_{60}K_{120}$ и на фоне $P_{60}K_{150}$.

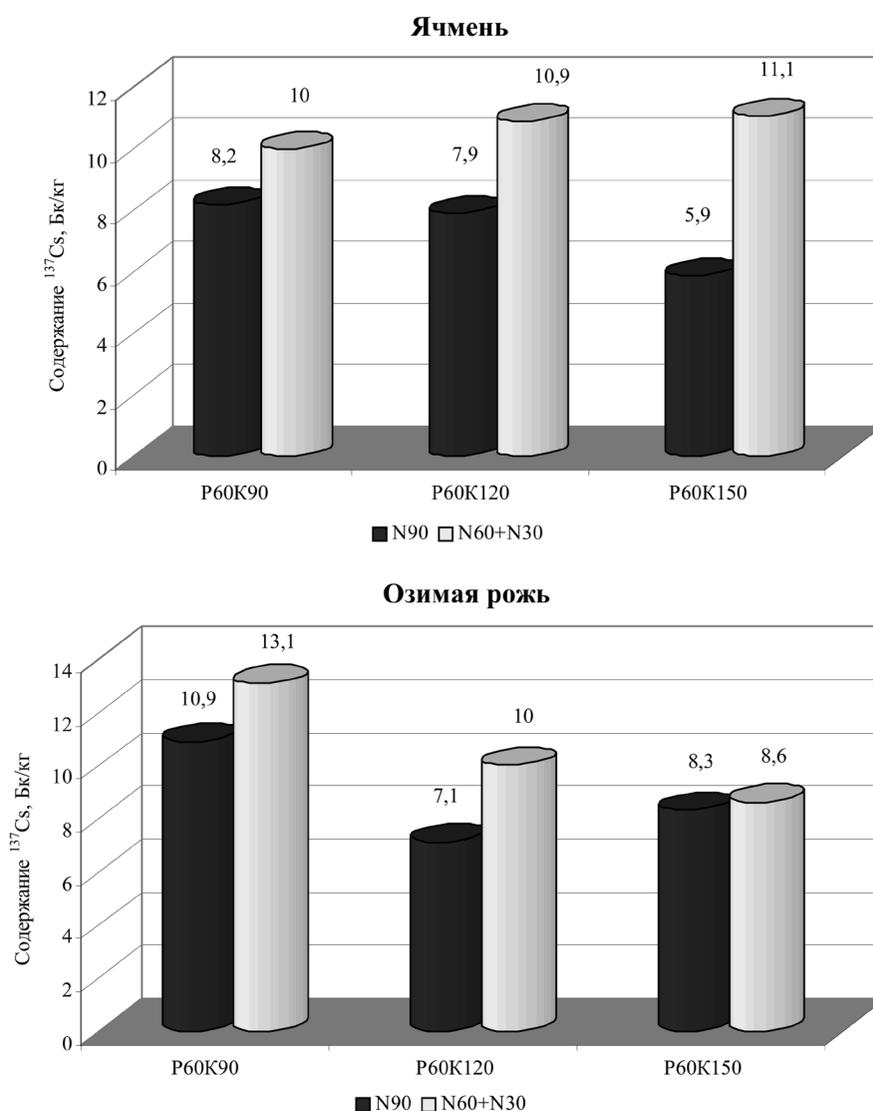


Рис. 2. Влияние дробного внесения азотных удобрений на накопление ^{137}Cs в зерне ячменя и озимой ржи

Установлено более интенсивное поступление радиоцезия в растения ячменя при дробном внесении азотных удобрений (рис. 2). Так, при внесении на фонах $P_{60}K_{90}$, $P_{60}K_{120}$ и $P_{60}K_{150}$ перед посевом 90 кг/га азота содержание ^{137}Cs в зерне составило 8,2, 7,9 и 5,9 Бк/кг соответственно. При дробном применении этой же дозы (N_{60} перед посевом + N_{30} в начале фазы выхода в трубку) – 10,0, 10,9 и 11,1 Бк/кг соответственно при $HCP_{0,95} = 1,4$ Бк/кг.

На озимой ржи достоверное увеличение перехода ^{137}Cs в зерно при дробном применении азота установлено только на фонах $P_{60}K_{90}$ и $P_{60}K_{120}$. Так, при внесении N_{90} в период возобновления весенней вегетации посевов содержание ^{137}Cs в зерне на этих фонах составило 10,9, и 7,1 Бк/кг соответственно, а при дробном применении этой же дозы (N_{60} при возобновлении весенней вегетации + N_{30} в начале фазы выхода в трубку растений) – 13,1 и 10,0 Бк/кг ($HCP_{0,95} = 1,5$ Бк/кг). На $P_{60}K_{150}$ различия были несущественными.

Эффективность доз и сроков внесения минеральных удобрений под зерновые культуры

Вариант опыта	Урожайность, ц/га зерна			Прибавка к контролю, ц/га	Прибавка к фону РК, ц/га	Окупаемость удобрений прибавкой зерна, кг/га		
	ячмень	озимая рожь	среднее			РК	N	NPK
I. Контроль – без удобрений	24,7	29,4	27,0	–	–	–	–	–
II. Фон 1 ($P_{60}K_{90}$)	31,3	35,4	33,3	6,3	–	4,2	–	–
III. Фон 1 + N_{60}^I	45,4	47,3	46,4	19,4	13,1	–	21,8	9,2
IV. Фон 1 + N_{90}^I	49,0	50,2	49,6	22,6	16,3	–	18,1	9,4
V. Фон 1 + $N_{60}^I + N_{30}^{II}$	49,8	54,3	52,1	25,1	18,8	–	20,9	10,5
VI. Фон 1 + $N_{90}^I + N_{30}^{II}$	50,1	57,3	53,7	26,7	20,4	–	17,0	9,9
VII. Фон 2 ($P_{60}K_{120}$)	33,2	35,5	34,3	7,3	–	4,1	–	–
VIII. Фон 2 + N_{60}^I	49,6	47,4	48,5	21,5	14,2	–	23,7	9,0
IX. Фон 2 + N_{90}^I	51,5	50,8	51,2	24,2	16,9	–	18,8	9,0
X. Фон 2 + $N_{60}^I + N_{30}^{II}$	51,7	55,2	53,5	26,5	19,2	–	21,3	9,8
XI. Фон 2 + $N_{90}^I + N_{30}^{II}$	53,0	57,9	55,5	28,5	21,2	–	17,7	9,5
XII. Фон 3 – $P_{60}K_{150}$	33,6	37,0	35,3	8,3	–	3,9	–	–
XIII. Фон 3 + N_{60}^I	49,8	49,8	49,8	22,8	14,5	–	24,2	8,4
XIV. Фон 3 + N_{90}^I	51,1	51,6	51,4	24,4	16,1	–	17,9	8,1
XV. Фон 3 + $N_{60}^I + N_{30}^{II}$	53,4	57,1	55,3	28,3	20,0	–	22,2	9,4
XVI. Фон 3 + $N_{90}^I + N_{30}^{II}$	54,9	57,8	56,4	29,4	21,1	–	17,6	8,9
$HCP_{0,05}$	2,7	2,9	2,8	–	–	–	–	–

Результаты исследований, представленные в таблице, показывают, что влияние доз и сроков применения азотных удобрений на урожайность зерновых культур зависело от уровней калийного питания. При возделывании ячменя без удобрений получена урожайность зерна 24,7 ц/га. Применение фосфорных и калийных удобрений в дозах $P_{60}K_{90}$ обеспечило прибавку 6,6 ц/га, а при более высоких дозах (варианты VII и XII) – 8,5 и 8,9 ц/га соответственно.

Применение перед посевом азотных удобрений в дозе 60 кг/га д.в. обеспечило прибавку зерна 21,1 ц/га к контролю и 14,1 ц/га – к фону $P_{60}K_{90}$. При увеличении дозы предпосевного внесения азота до 90 кг/га наблюдалось повышение урожайности, которая составила 49,0 ц/га (прибавка к контролю – 24,3 ц/га, к фону $P_{60}K_{90}$ – 17,7 ц/га). Дробное применение N_{90} (N_{60} – перед посевом и N_{30} – в фазу выхода в трубку) было более эффективным по сравнению с однократным. Внесение азота в дозе 120 кг/га не обеспечило достоверного повышения урожайности.

Увеличение уровня калийного питания (K_{120} и K_{150}) повышало эффективность азотных удобрений. Одинаковые дозы и сроки внесения азота обеспечили прибавки зерна ячменя по отношению к фону $P_{60}K_{90}$ на фоне $P_{60}K_{120}$ 1,9–3,8 ц/га, на фоне $P_{60}K_{150}$ – 2,5–4,8 ц/га.

При возделывании озимой ржи урожайность на контроле составила 29,4 ц/га, в вариантах $P_{60}K_{90}$ и $P_{60}K_{120}$ прибавки зерна составили 6,0–6,1 ц/га, в варианте $P_{60}K_{150}$ – 7,6 ц/га. Внесение при возобновлении весенней вегетации посевов азота в дозе 60 кг/га д. в. обеспечило прибавку зерна 17,9 ц/га к контролю и 11,9 ц/га к фону $P_{60}K_{90}$. Азотная подкормка в дозе 90 кг/га увеличила урожайность до 50,2 ц/га (прибавка к контролю – 20,8 ц/га, к фону $P_{60}K_{90}$ – 14,8 ц/га).

Дробное применение 90 кг/га азота удобрений (N_{60} – при возобновлении весенней вегетации и N_{30} – в фазу выхода в трубку растений) было более эффективным по сравнению с однократным внесением: прибавка зерна составила 4,1 ц/га. Дробное внесение N_{120} обеспечило прибавку зерна 3,0 ц/га по отношению к варианту с дробным применением 90 кг/га азота.

На фоне $P_{60}K_{150}$ прибавки зерна озимой ржи от азотных удобрений были несущественно выше, чем на фонах $P_{60}K_{90}$ и $P_{60}K_{120}$, – на 0,5–0,8 и 0,9–1,2 ц/га.

Окупаемость фосфорных и калийных удобрений колебалась в пределах 3,9–4,2 кг зерна. Наблюдалась тенденция снижения эффективности удобрений при увеличении доз калия от 90 до 150 кг/га.

На всех изучаемых фонах РК самая высокая окупаемость азотных удобрений, которая колебалась от 21,8 (на фоне $P_{60}K_{90}$) до 24,2 кг зерна (на фоне $P_{60}K_{150}$), получена при дозе азота 60 кг/га. Увеличение дозы однократного применения азота до 90 кг/га привело к снижению его окупаемости на 3,7–6,3 кг зерна по сравнению с N_{60} . Окупаемость дробного внесения N_{90} была на 2,5–4,3 кг зерна выше по сравнению с однократным. При повышении уровня калийного питания наблюдалось повышение эффективности азотных удобрений.

В целом наилучшую окупаемость полного минерального удобрения (NPK), которая составила 10,5 кг зерна, обеспечил вариант с дробным применением 90 кг/га азота на фоне $P_{60}K_{90}$. При более высоких дозах калийных удобрений окупаемость NPK снижалась.

Заключение. На дерново-подзолистой супесчаной почве с плотностью загрязнения ^{137}Cs 500–660 кБк/м² и повышенным содержанием (201–300 мг/кг) K_2O в пахотном слое применение калийных удобрений в дозе 90 кг/га снижало поступление ^{137}Cs в зерно ячменя и озимой ржи. Более высокие уровни калия (K_{120} и K_{150}) не способствовали существенному уменьшению перехода радиоцезия из почвы в растения. Азотные удобрения усиливали миграцию ^{137}Cs в системе почва – растение. Прослеживалась тенденция более интенсивного поступления радиоцезия в зерно при дробном применении азотных удобрений. Отрицательное влияние возрастающих доз азота снижалось на фоне повышенных (K_{120}) и высоких (K_{150}) доз калийных удобрений.

Существенный рост продуктивности зерновых культур отмечался при увеличении дозы азотных удобрений до 90 кг/га. Дробное применение N_{90} достоверно повышало урожайность по отношению к однократному только на озимой ржи: прибавки зерна составили 4,1–5,5 ц/га. Наблюдалась тенденция к увеличению окупаемости внесенного азота прибавкой зерна на фонах с более высокими уровнями калийного питания и снижение – при повышении доз азотных удобрений. Эффективность дробного применения азотных удобрений повышалась при увеличении уровня калийного питания. Самая высокая окупаемость минеральных (NPK) удобрений (10,5 кг зерна) получена при дробном применении 90 кг/га азота на фоне $P_{60}K_{90}$.

Литература

1. 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 последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС при Совете Министров Республики Беларусь, 2006. – 112 с.
2. Роль защитных мероприятий в реабилитации загрязненных территорий / Алексахин Р. М. [и др.] // Чернобыль 20 лет спустя. Стратегия восстановления и устойчивого развития пострадавших регионов: материалы междунар. конф., 19–21 апр. 2006 г., Минск // Комитет по проблемам последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС при Совете Министров Республики Беларусь. – Минск: Беларусь, 2006. – С. 103–108.
3. Радиоактивность и пища человека // под ред. Р. С. Рассела; пер. с англ., под ред. В. М. Клечковского. – М.: Атомиздат, 1971.

4. А л е к с а х и н, Р. М. Поведение ^{137}Cs в системе почва – растение и влияние внесения удобрений на накопление радионуклидов в урожае / Р. М. Алексахин, И. Т. Моисеев, Ф. А. Тихомиров // *Агрохимия*. – 1992. – № 8. – С. 127–138.
5. М о и с е е в, 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.
6. Б а к у н о в, Н. А. Влияние свойств почв и почвообразующих минералов на поступление цезия-137 в растения: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – М.: ТСХА, 1967. – 19 с.
7. Г у л я к и н, И. В. Сельскохозяйственная радиобиология / И. В. Гулякин, Е. В. Юдинцева. – М.: Колос, 1973. – 272 с.
8. Ю д и н ц е в а, Е. В. О роли калия в доступности ^{137}Cs растениям / Е. В. Юдинцева, Э. М. Левина // *Агрохимия*. – 1982. – № 4. – С. 75–81.
9. E v a n s, E. J. Effect of nitrogen on caesium-137 in soils and its uptake by oat plants / E. J. Evans, A. J. Dekker // *Canadian J. Soil Sci.* – 1969. – N 49. – P. 349–355.
10. К оценке влияния минеральных удобрений на динамику обменного ^{137}Cs в почвах и доступность его овощным культурам / И. Т. Моисеев [и др.] // *Агрохимия*. – 1988. – № 5. – С. 86–92.
11. Рекомендации по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 72 с.
12. А г е е ц, В. Ю. Система радиэкологических контрмер в агрофере Беларуси / В. Ю. Агеец. – Минск, 2001. – 168 с.

N. N. TSYBULKO, D. V. KISELEVA

INFLUENCE OF THE LEVELS OF APPLICATION OF NITRIC AND POTASH FERTILIZERS ON ^{137}CS ACCUMULATION IN PLANTS AND THE EFFICIENCY OF GRAIN CROPS

Summary

In researche on sod-podsolic sandy soil with the pollution density of ^{137}Cs 500–660 kBk/m² it is established that the application of potash fertilizers in a dose of 90 kg/ha leads to the receipt reduction of ^{137}Cs in plants of barley and winter rye. Higher levels of potash food (K_{120} and K_{150}) did not promote a further essential decrease in ^{137}Cs accumulation. Nitric fertilizers led to the migration strengthening of ^{137}Cs in the “soil-plant” system. Its more intensive receipt in plants was observed at fractional application of nitric fertilizers. A negative influence of increasing doses of nitrogen decreased against raised (K_{120}) and high (K_{150}) levels of application of potash fertilizers.