

УДК 633.1:631.84:631.445.24:631.438.2

Н. Н. ЦЫБУЛЬКО¹, Д. В. КИСЕЛЕВА², И. И. ЖУКОВА³

**ОПТИМИЗАЦИЯ АЗОТНОГО ПИТАНИЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР
ПРИ РАЗНОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ПОДВИЖНЫМ КАЛИЕМ
ЗАГРЯЗНЕННЫХ ¹³⁷Cs ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ СУПЕСЧАНЫХ ПОЧВ**

¹Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС,
Минск, Республика Беларусь, e-mail: Tsybulka@komchern.org.by

²Могилевский государственный университет им. А. А. Кулешова, Республика Беларусь

³Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка, Минск, Республика Беларусь

(Поступила в редакцию 10.04.2012)

Введение. Биологическая доступность радионуклидов определяется содержанием их мобильных форм в почвенном профиле, физиологическими особенностями растений, генезисом и свойствами почв. Основным агрохимическим приемом, снижающим аккумуляцию ¹³⁷Cs в растениях, является применение калийных удобрений. Сокращение миграции ¹³⁷Cs в системе «почва – растение» при внесении калийных удобрений связано, с одной стороны, с антагонистическим характером отношения цезия и калия в почвенном растворе, а с другой – с эффектом «разбавления» в надземной массе растений и повышением урожайности сельскохозяйственных культур на бедных калием почвах.

На почвах разного генезиса под влиянием калийных удобрений поступление ¹³⁷Cs в сельскохозяйственные культуры может уменьшаться от 2 до 20 раз [1]. Особенно эффективно внесение их на легких по гранулометрическому составу почвах [2, 3].

Установлено [4], что уровень содержания подвижного калия в почве, превышение которого не снижает накопление ¹³⁷Cs в растениях, составляет 240–260 мг/кг почвы. Внесение высоких доз калийных удобрений (K_{180–240}) на слабо обеспеченных почвах (150 мг/кг) снижает в 1,5–2,7 раза содержание ¹³⁷Cs. На почвах с повышенным (250 мг/кг) и высоким (350 мг/кг) содержанием калия внесение повышенных доз калийных удобрений малоэффективно.

Предложены агроэкологические оптимумы содержания подвижного калия в почве, при которых наблюдается минимальное накопление радионуклидов в растениях. В зависимости от биологических особенностей культур минимальный переход радионуклидов отмечается в интервале содержания K₂O в почве 370–490 мг/кг [5].

В отличие от калия, повышенные дозы азотных удобрений усиливают поступление ¹³⁷Cs в сельскохозяйственные культуры. Повышение поглощения ¹³⁷Cs объясняется увеличением подвижности его в почве под влиянием гидратированных ионов аммония, имеющих с ¹³⁷Cs сходный по величине ионный радиус и способных вытеснять его из мест сорбции в почвенный раствор [2, 6]. Однако и NH₄⁺, и K⁺ десорбируют ¹³⁷Cs как с поверхности почвенных частиц, так и с поверхности корней [7], но при применении калия содержание ¹³⁷Cs в растениях многократно уменьшается [8], а при применении азота – увеличивается.

Отмечается [9], что прочную связь между ¹³⁷Cs⁺ и илистыми частицами почвы может разрушить избыток ионов NH₄⁺, поэтому внесение аммонийных азотных удобрений может по-разному влиять на загрязнение культур. С одной стороны, избыток NH₄⁺ в почве приводит к разбавлению ¹³⁷Cs⁺, что снижает поглощение, в то же самое время избыток этого катиона может привести к десорбции уже связанного ¹³⁷Cs⁺, что увеличивает поглощение. С другой сторо-

ны, внесение нитратной формы азота также усиливает поглощение ^{137}Cs растениями, хотя и в меньшей степени (в среднем в 2 раза), чем азот в аммиачной форме [10].

Предполагается [6], что увеличение поступления ^{137}Cs в растения происходит в результате сдвига в соотношениях элементов в почвенном растворе при внесении азота. Результаты исследований некоторых авторов показывают, что азотные удобрения обладают мобилизующим действием на ^{137}Cs почвы [11].

Увеличение накопления растениями ^{137}Cs на удобренных вариантах объясняется также усилением минерализации, ведущей к росту доступного растениям азота в почве, сужению отношения $\text{N} : \text{K}$ и высвобождению ^{137}Cs из легкоминерализуемых органических компонентов почвы, а также активизацией поглотительной деятельности корневой системы [12].

Цель работы – установить зависимости между активностью ^{137}Cs и содержанием азота и калия в растениях и определить оптимальное соотношение азота и калия в почве, обеспечивающее минимальное накопление ^{137}Cs в зерновых культурах.

Объекты и методы исследований. Исследования проводили в СПК «Зарянский» Славгородского района Могилевской области в условиях полевого опыта на дерново-подзолистой супесчаной почве в 2006–2008 гг. Удельная активность ^{137}Cs в пахотном горизонте почвы составляла в среднем 1930 Бк/кг, плотность загрязнения – 554 кБк/м² (15,0 Ки/км²). Почва характеризовалась слабокислой реакцией среды ($\text{pH}_{\text{KCl}} - 5,93$), средним содержанием гумуса (2,03%), повышенным содержанием подвижного фосфора (218 мг/кг почвы) и средним содержанием подвижного калия (173 мг/кг почвы) в пахотном горизонте. Содержание минерального азота в почве (N_{min}) составляло 30,1 мг/кг, в том числе $\text{N-NH}_4 - 8,8$, $\text{N-NO}_3 - 14,2$ мг/кг почвы, потенциально усвояемого азота ($\text{N}_{\text{усв}}$) – 46 мг/кг почвы.

Схема опыта включала следующие варианты:

- | | |
|---|--|
| 1. Контроль – без удобрений | 9. Фон 2 + N_{90} |
| 2. Фон 1 – $\text{P}_{60}\text{K}_{90}$ | 10. Фон 2 + $\text{N}_{60} + \text{N}_{30}^{\prime\prime}$ |
| 3. Фон 1 + N_{60} | 11. Фон 2 + $\text{N}_{90} + \text{N}_{30}^{\prime\prime}$ |
| 4. Фон 1 + N_{90} | 12. Фон 3 – $\text{P}_{60}\text{K}_{150}$ |
| 5. Фон 1 + $\text{N}_{60} + \text{N}_{30}^{\prime\prime}$ | 13. Фон 3 + N_{60} |
| 6. Фон 1 + $\text{N}_{90} + \text{N}_{30}^{\prime\prime}$ | 14. Фон 3 + N_{90} |
| 7. Фон 2 – $\text{P}_{60}\text{K}_{120}$ | 15. Фон 3 + $\text{N}_{60} + \text{N}_{30}^{\prime\prime}$ |
| 8. Фон 2 + N_{60} | 16. Фон 3 + $\text{N}_{90} + \text{N}_{30}^{\prime\prime}$ |

Общая площадь делянок в опыте 72 м², учетная площадь – 45 м². Повторность опыта – четырехкратная, размещение делянок – рендомизированное.

В 2006 г. возделывали яровой ячмень (*Hordeum distichum* L.) сорта Тюрингия, в 2007 г. – озимую рожь (*Secale cereale* L.) сорта Игуменская, в 2008 г. – овес (*Avena sativa* L.) сорта Богач. Технологии возделывания культур соответствовали отраслевым регламентам [13]. Фосфорные (суперфосфат аммонизированный) и калийные (калий хлористый) удобрения вносили перед посевом культур, азотные удобрения в форме карбамида согласно схеме опыта в следующие сроки: N – перед посевом ячменя и овса, в ранневесеннюю подкормку озимой ржи; $\text{N}^{\prime\prime}$ – в фазы выхода в трубку растений зерновых культур. Дозы удобрений приведены в килограммах действующего вещества на гектар.

Метеорологические условия вегетационных периодов существенно различались. По степени увлажнения 2006 и 2007 гг. характеризовались в целом хорошим увлажнением – ГТК составили 1,6 и 1,2 соответственно, 2008 г. – избыточной увлажненностью, ГТК равен 2,0.

Удельную активность ^{137}Cs в почвенных пробах определяли на γ - β -спектрометре МКС-АТ1315, в растительных – на спектрометрических комплексах «Tennelec» и «Canberra» [14]. Аппаратурная ошибка измерений не превышала 15–20 %. В почвенных пробах определяли гумус – по Тюрину в модификации ЦИНАО по ГОСТ 26212–91 [15]; pH_{KCl} – потенциометрическим методом [16]; подвижные формы фосфора и калия – по Кирсанову [17]; потенциально усвояемый азот – по методу Семененко [18]; N-NH_4 – по ГОСТ 26489–85 [19]; N-NO_3 – по ГОСТ 26488–85 [20]. Содержание общего азота в растениях определяли по методу ЦИНАО [21]. Полученные данные обра-

батывали методами дисперсионного и корреляционно-регрессионного анализа по Б. А. Доспехову [22] с использованием стандартного компьютерного программного обеспечения (*Excel 7.0, Statistic 7.0*).

Результаты и их обсуждение. На дерново-подзолистой супесчаной почве с плотностью загрязнения ^{137}Cs 554 кБк/м² (15,0 Ки/км²), средним содержанием в пахотном слое подвижного калия (173 мг/кг почвы) и повышенным содержанием фосфора (218 мг/кг почвы) на контрольном варианте (без применения удобрений) удельная активность ^{137}Cs в зерне у ячменя колебалась от 10,4 до 12,8 Бк/кг (в среднем 11,7), озимой ржи – от 11,2 до 14,1 (в среднем 12,9) и в зерне овса от 17,1 до 19,4 Бк/кг (в среднем 18,4). Фосфорные и калийные удобрения оказали положительное влияние на снижение поступления ^{137}Cs из почвы в растения. Применение калийных удобрений в дозе 90 кг/га на фоне P_{60} обеспечило достоверное уменьшение активности зерна ячменя, озимой ржи и овса. Так, содержание ^{137}Cs в зерне ячменя снизилось на 4,3 Бк/кг (37%) при $\text{HCP}_{05} = 2,3$, в зерне озимой ржи – на 3,9 Бк/кг (30%) при $\text{HCP}_{05} = 1,6$ и в зерне овса – на 4,5 Бк/кг (25%) при $\text{HCP}_{05} = 3,5$. Внесение более высоких доз калийных удобрений (K_{120} и K_{150}) на том же фоне фосфора (P_{60}) не привело к дальнейшему достоверному снижению накопления ^{137}Cs в продукции всех изучаемых зерновых культур. Удельная активность его колебалась в пределах ошибки опыта (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Влияние доз и сроков внесения азотных удобрений на содержание ^{137}Cs в зерне

| Дозы и сроки внесения азотных удобрений | Уровень применения калийных удобрений | | |
|---|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | $\text{P}_{60}\text{K}_{90}$ | $\text{P}_{60}\text{K}_{120}$ | $\text{P}_{60}\text{K}_{150}$ |
| <i>Ячмень</i> | | | |
| N_0 | 7,4 | 7,1 | 6,6 |
| N_{60} | 9,1 | 8,6 | 6,9 |
| N_{90} | 11,5 | 9,9 | 7,6 |
| $\text{N}_{60} + \text{N}_{30}^{\text{II}}$ | 11,5 | 11,1 | 9,8 |
| $\text{N}_{90} + \text{N}_{30}^{\text{II}}$ | 12,9 | 11,9 | 10,6 |
| $\text{HCP}_{05} = 2,3$ | | | |
| <i>Озимая рожь</i> | | | |
| N_0 | 9,0 | 8,6 | 8,1 |
| N_{60} | 11,4 | 10,8 | 8,4 |
| N_{90} | 12,0 | 10,9 | 8,4 |
| $\text{N}_{60} + \text{N}_{30}^{\text{II}}$ | 12,8 | 12,5 | 8,6 |
| $\text{N}_{90} + \text{N}_{30}^{\text{II}}$ | 13,2 | 13,0 | 10,9 |
| $\text{HCP}_{05} = 1,7$ | | | |
| <i>Овес</i> | | | |
| N_0 | 13,9 | 12,9 | 10,9 |
| N_{60} | 15,6 | 14,8 | 12,6 |
| N_{90} | 22,2 | 18,6 | 14,0 |
| $\text{N}_{60} + \text{N}_{30}^{\text{II}}$ | 20,9 | 16,8 | 13,9 |
| $\text{N}_{90} + \text{N}_{30}^{\text{II}}$ | 24,9 | 19,4 | 14,4 |
| $\text{HCP}_{05} = 3,5$ | | | |

Результаты изучения разных доз и сроков внесения азотных удобрений на поступление ^{137}Cs в зерновые культуры показали, что за годы исследований удельная активность ^{137}Cs в зерне даже при повышенных дозах азота (120 кг/га) не превысила 30 Бк/кг. При допустимом уровне на зерно для переработки на пищевые цели 90 Бк/кг, на зерно на детское питание – 55 Бк/кг, т. е. была ниже в 3,0 и 1,8 раза соответственно.

Влияние азотных удобрений на содержание ^{137}Cs в продукции зависело от уровней калийного питания растений – с повышением доз калийных удобрений отрицательное действие азота снижалось. В зерне ячменя содержание ^{137}Cs колебалось по вариантам опыта с азотными удоб-

рениями от 6,9 до 12,9 Бк/кг. Активность его на фоне $P_{60}K_{90}$ составила 7,4 Бк/кг. В варианте с предпосевным внесением 60 кг/га азота удобрений на фоне $P_{60}K_{90}$ содержание ^{137}Cs в продукции было достоверно ниже (на 22 %) по отношению к контролю, а различие с вариантом $P_{60}K_{90}$ было несущественным – 1,7 Бк/кг при $HCP_{05} = 2,5$ Бк/кг. При повышении доз азотных удобрений наблюдалось увеличение накопления ^{137}Cs в растениях. В варианте с внесением перед посевом N_{90} содержание его в зерне было значительно (в 1,5 раза) выше по сравнению с фоном $P_{60}K_{90}$, но не существенно по сравнению с вариантом $N_{60} P_{60}K_{90}$.

По накоплению ^{137}Cs в продукции дробное применение азота (N_{60} – перед посевом + N_{30} – в подкормку в начале фазы выхода в трубку) не отличалось от однократного (N_{90} – перед посевом) внесения той же дозы. При дробном внесении азотных удобрений в дозе 120 кг/га удельная активность ^{137}Cs в зерне ячменя увеличилась в 1,7 раза по сравнению с фоном $P_{60}K_{90}$, в 1,4 раза – по сравнению с вариантом $N_{60} P_{60}K_{90}$, однако была несущественно выше вариантов с однократным и дробным применением 90 кг/га азота удобрений.

С повышением уровня калийного питания растений ячменя до 120 и 150 кг/га калия отрицательное влияние азотных удобрений на накопление ^{137}Cs в зерне снижалось, хотя тенденция к увеличению поступления его в растения с повышением доз азота сохранялась. Так, если на фоне $P_{60}K_{90}$ содержание радионуклида в зерне в вариантах с применением азотных удобрений составляло 9,1–12,9 Бк/кг, то на фонах $P_{60}K_{120}$ и $P_{60}K_{150}$ – 8,6–11,9 и 6,9–10,6 Бк/кг соответственно. На фоне $P_{60}K_{120}$ достоверное повышение накопления ^{137}Cs в зерне ячменя от азотных удобрений наблюдалось при внесении N_{90} и выше, а на фоне $P_{60}K_{150} - N_{120}$.

В зерне озимой ржи активность ^{137}Cs на первом фоне фосфора и калия ($P_{60}K_{90}$) составила в среднем 9,0 Бк/кг, а по вариантам опыта, где вносили азотные удобрения, колебалась от 8,4 до 13,2 Бк/кг. Ранневесенняя подкормка азотом в дозе 60 кг/га привела к существенному (на 2,4 Бк/кг при $HCP_{05} = 1,7$) увеличению содержания ^{137}Cs в зерне по отношению к варианту $P_{60}K_{90}$. С повышением доз азотных удобрений до 90 и 120 кг/га наблюдалось увеличение накопления радионуклида к фону РК на 33–47 % соответственно, однако оно было не существенным по отношению к варианту $N_{60}P_{60}K_{90}$.

На озимой ржи, как и на ячмене, на фонах с повышенными дозами калийных удобрений (K_{120} и K_{150}) наблюдалось снижение поступления ^{137}Cs в зерно по всем вариантам с азотными удобрениями. Особенно это хорошо проявилось на фоне $P_{60}K_{150}$. Применение азота в дозах от 60 до 90 кг/га не привело к достоверному увеличению по отношению к фосфорно-калийному фону удельной активности ^{137}Cs в продукции. Только в варианте с дробным внесением 120 кг/га азота (N_{90} – в ранневесеннюю подкормку + N_{30} – в подкормку в начале фазы выхода в трубку) различия были существенными.

Следует также отметить, что на первом (K_{90}) и втором (K_{120}) уровнях калия проявилась тенденция к повышению содержания ^{137}Cs в зерне при дробном применении азота (N_{60} – в ранневесеннюю подкормку + N_{30} – в начале фазы выхода в трубку) по сравнению с однократным внесением той же дозы. На фоне $P_{60}K_{150}$ такая тенденция не прослеживалась.

Овес характеризовался более высоким накоплением ^{137}Cs по сравнению с ячменем и озимой рожью. С одной стороны, это обусловлено биологическими особенностями данной культуры, а с другой – более высокой увлажненностью вегетационного периода 2008 г. (ГТК = 2,0). Удельная активность ^{137}Cs в зерне овса колебалась по вариантам опыта с азотными удобрениями от 12,6 до 24,9 Бк/кг. При содержании радионуклида 13,9 Бк/кг на фоне $P_{60}K_{90}$ предпосевное внесение под овес 60 кг/га азота на этом же фоне фосфора и калия незначительно (на 12 %) увеличило накопление ^{137}Cs в продукции. В то же время более высокие дозы азотных удобрений (90 и 120 кг/га) привели к существенному повышению загрязнения продукции. Так, при внесении перед посевом овса 90 кг/га азота удельная активность ^{137}Cs в зерне существенно увеличилась как по отношению к фону $P_{60}K_{90}$ (на 8,3 Бк/кг, или на 60 %), так и по отношению к варианту $N_{60}P_{60}K_{90}$ (на 6,6 Бк/кг, или на 40 %). Аналогичным было и действие дробного применения N_{90} (N_{60} – до посева + N_{30} – в начале фазы выхода в трубку).

Самое высокое накопление ^{137}Cs отмечено в варианте с дробным внесением 120 кг/га азота (90 кг/га перед посевом и 30 кг/га в подкормку в фазу выхода в трубку), которое составило

24,9 Бк/кг, что в 1,8 раза выше, чем в варианте с применением только фосфорных и калийных удобрений ($P_{60}K_{90}$).

На более высоком фоне калийного питания растений ($P_{60}K_{120}$) общий уровень содержания ^{137}Cs в зерне в вариантах с разными дозами и сроками применения азота снизился по сравнению с аналогичными вариантами на фоне $P_{60}K_{90}$, однако закономерности действия азотных удобрений сохранились.

Отрицательное влияние азотных удобрений на загрязнение продукции значительно уменьшилось при внесении их совместно с калийными удобрениями в дозе 150 кг/га. Удельная активность ^{137}Cs в зерне на фоне $P_{60}K_{150}$ при внесении N_{60} несущественно отличалась от варианта РК. Применение N_{90} в один прием и дробно, а также N_{120} дробно способствовали достоверному повышению содержания ^{137}Cs в зерне овса. В то же время различия между разными дозами и сроками внесения азота были несущественными.

В результате статистической обработки результатов исследований установлена тесная обратно пропорциональная зависимость между концентрацией K_2O и удельной активностью ^{137}Cs в зерне ячменя, озимой ржи и овса. Повышение содержания калия в растениях способствовало существенному уменьшению накопления ^{137}Cs . Корреляционная зависимость между анализируемыми показателями описывалась квадратичным уравнением. Индексы детерминации (R^2) для ячменя, озимой ржи и овса получены соответственно 0,86, 0,80 и 0,84. Минимальное содержание ^{137}Cs отмечалось при концентрации K_2O в зерне ячменя и озимой ржи – 0,80–0,85%, в зерне овса – 0,60–0,70% (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Зависимость удельной активности ^{137}Cs от содержания калия в зерне ячменя, озимой ржи и овса

| Культура | Уравнение регрессии | R^2 |
|-------------|------------------------------------|-------|
| Ячмень | $y = 122,9x^2 - 211,47x + 96,551$ | 0,86 |
| Озимая рожь | $y = 197,09x^2 - 318,77x + 137,09$ | 0,80 |
| Овес | $y = 236,54x^2 - 303,02x + 107,63$ | 0,84 |

Установлены зависимости между удельной активностью ^{137}Cs и концентрацией общего азота в зерне возделываемых культур, позволяющие определить пороговые значения содержания этого макроэлемента, до которых наблюдаются снижение или увеличение радионуклида в урожае зерновых культур. Зависимость между концентрацией общего азота ($N_{общ}$) и удельной активностью ^{137}Cs в зерне наиболее тесно описывалась квадратичным уравнением с полиномиальной линией тренда.

Взаимосвязь средней силы ($R^2 = 0,58$) установлена между содержанием $N_{общ}$ и активностью ^{137}Cs в зерне ячменя (рис. 1). Как показывают данные, повышенное накопление его в зерне наблюдалось как при низком, так и при высоком содержании азота в растениях ячменя. Низкая концентрация $N_{общ}$ обуславливает, как правило, низкую урожайность, что способствует увеличению активности ^{137}Cs в продукции. Высокий уровень азотного питания растений приводит к увеличению поглощения азота и цезия растениями. Минимальное накопление радионуклида наблюдалось в диапазоне содержания общего азота в зерне ячменя – от 2,0 до 2,50%.

Более слабая корреляционная зависимость ($R^2 = 0,32$) между содержанием общего азота и концентрацией ^{137}Cs в зерне получена на озимой ржи. Повышенное накопление его в растениях отмечалось при содержании $N_{общ}$ при низком диапазоне от 1,35 до 1,50% и высоком диапазоне – от 1,70 до 1,85%. Минимальной удельной активностью ^{137}Cs отличалось зерно при содержании общего азота в пределах 1,50–1,65%.

Сильная связь ($R^2 = 0,67$) между содержанием $N_{общ}$ и удельной активностью ^{137}Cs в зерне установлена на овсе. Наиболее низкая удельная активность радионуклида в зерне отмечена при содержании общего азота в интервале 1,5–1,6%. При повышении концентрации $N_{общ}$ до 2,00 % и более наблюдалось увеличение поступления ^{137}Cs в зерно.

Как показывают результаты исследований, увеличение накопления ^{137}Cs в зерновых культурах при внесении азотных удобрений определяется не только повышением их доз, но также зависит от уровня применения калийных удобрений, т. е. от сбалансированности азотного и калийного питания растений.

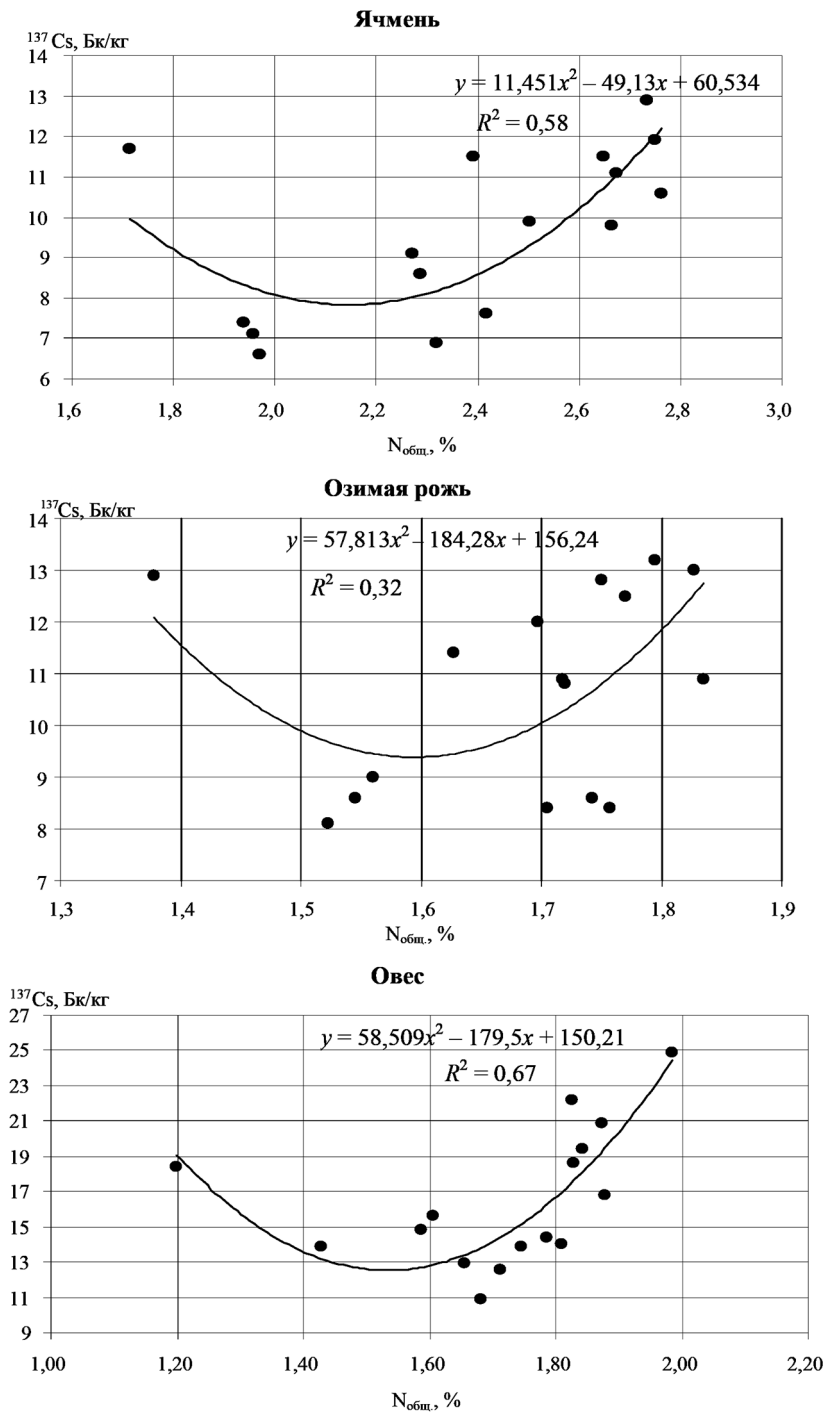


Рис. 1. Зависимость удельной активности ^{137}Cs от содержания общего азота в зерне ячменя, озимой ржи и овса

В своих исследованиях мы провели оценку влияния соотношения доступных растениям соединений азота и калия в почвенном профиле на параметры поступления ^{137}Cs в продукцию зерновых культур. Общее содержание доступного растениям K_2O в почве определяли как сумму подвижного калия в слое 0–25 см почвы на начало вегетации и калия вносимых калийных удобрений. Содержание доступного растениям азота рассчитывали как сумму потенциально усвояемого азота, включающего азот нитратов, обменного аммония и минерализуемых в течение вегетационного периода органических соединений, в пахотном слое почвы и азота удобрений. При определении соотношения азота и калия (N : K) за единицу принимался азот.

Между соотношением N : K, с одной стороны, удельной активностью ^{137}Cs в зерне и коэффициентами перехода радионуклида в зерновые культуры, с другой стороны, рассчитаны корреляционные зависимости. Как показывают полученные результаты, установлена обратно пропорциональная зависимость между поступлением ^{137}Cs из почвы в зерновые культуры и соотношением N : K в почве. Корреляционная зависимость между анализируемыми показателями описывалась квадратичными уравнениями (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Зависимость поступления ^{137}Cs из почвы в зерновые культуры от соотношения N : K в почве

| Культура | Уравнение регрессии | R^2 |
|---|------------------------------------|-------|
| <i>Удельная активность ^{137}Cs в зерне</i> | | |
| Ячмень | $y = 1,0558x^2 - 9,9036x + 29,674$ | 0,83 |
| Озимая рожь | $y = 1,116x^2 - 9,9667x + 30,306$ | 0,78 |
| Овес | $y = 2,5707x^2 - 22,522x + 60,807$ | 0,70 |
| <i>Коэффициенты перехода ^{137}Cs в зерно</i> | | |
| Ячмень | $y = 0,0022x^2 - 0,0199x + 0,057$ | 0,70 |
| Озимая рожь | $y = 0,0028x^2 - 0,0239x + 0,0653$ | 0,68 |
| Овес | $y = 0,0049x^2 - 0,0422x + 0,1129$ | 0,61 |

Была установлена высокая обратная зависимость между удельной активностью ^{137}Cs в зерне ячменя, озимой ржи и овса и соотношением N : K в почве. Индексы детерминации (R^2) составили соответственно 0,83, 0,78 и 0,70. Между соотношением N : K в почве и коэффициентами перехода ^{137}Cs в зерновые культуры также высокая связь получена на ячмене и озимой ржи R^2 составил 0,70 и 0,68 соответственно. На овсе установлена заметная связь $R^2 = 0,61$.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что накопление ^{137}Cs в растениях при внесении азотных удобрений действительно обусловлено соотношением доступных для растений форм азота и калия в почве.

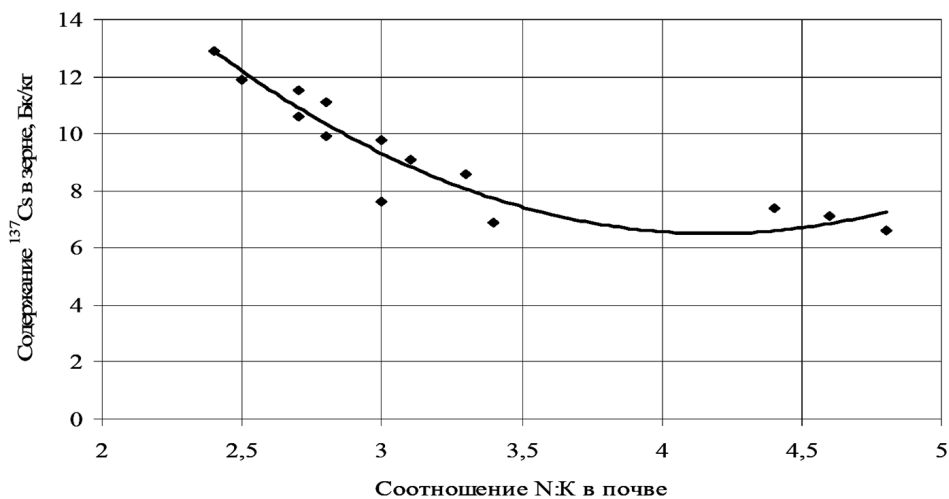
Минимальное поступление ^{137}Cs в зерновые культуры отмечалось при соотношении N : K в почве в диапазоне 1 : (3,8–4,2). Внесение повышенных доз азотных удобрений на низком фоне калийных удобрений сужало это соотношение. Заметное увеличение накопления ^{137}Cs наблюдалось при сужении соотношения азота к калию менее чем 1 : 3,5 (рис. 2). Сужение соотношения доступного растениям азота и калия в почве ниже 1 : 3,5 сопровождается образованием калийного дефицита в питании растений и ослаблением дискриминации ^{137}Cs по отношению к калию при поступлении из почвы в растения. Близкие данные получены на загрязненных радионуклидами дерново-подзолистых песчаных почвах Брянской области [23].

На основании установленных тесных связей между соотношением N : K в почве и удельной активностью ^{137}Cs в зерне изучаемых зерновых культур определены агроэкологические оптимумы содержания потенциально усвояемого азота в пахотном слое дерново-подзолистой супесчаной почвы, при которых наблюдается минимальное накопление ^{137}Cs в продукции, в зависимости от обеспеченности почвы в условиях опыта подвижным калием (содержание подвижного калия в опыте изменялось по годам и вариантам от 150 до 210 мг/кг почвы). Как показывают полученные нами результаты, с увеличением обеспеченности почвы подвижным калием агроэкологический оптимум содержания потенциально усвояемого азота в почве колеблется от 35 до 55 мг/кг почвы: 150 мг/кг – 37,5 мг/кг почвы, 180 мг/кг – 45,0 и 210 мг/кг – 52,5 мг/кг почвы.

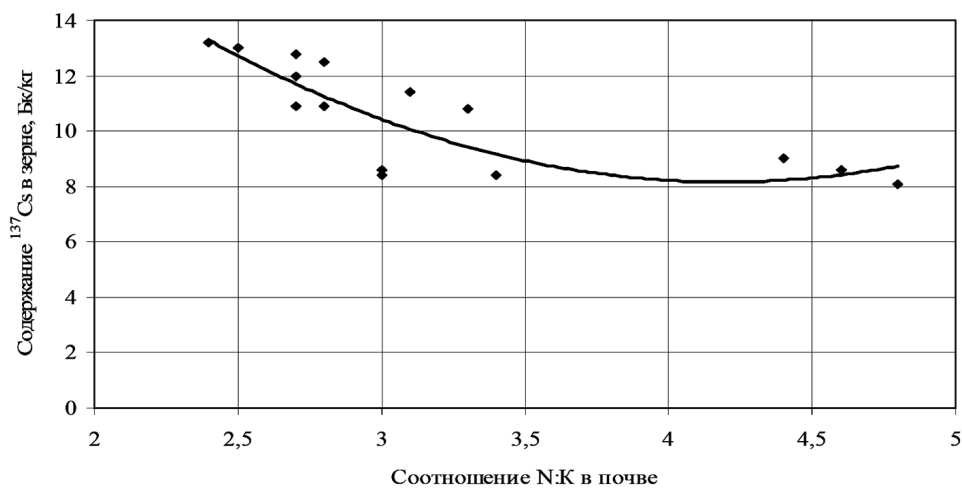
В настоящее время разработаны агроэкологические оптимумы кислотности почвы и содержания в ней подвижного калия для дерново-подзолистых почв Беларуси [24].

На основе установленных агроэкологических оптимумов определены интервалы оптимального содержания и запасов потенциально усвояемого и минерального азота в слое 0–25 см супесчаной почвы, обеспечивающие минимальное накопление ^{137}Cs в продукции (табл. 4).

Ячмень



Озимая рожь



Овес

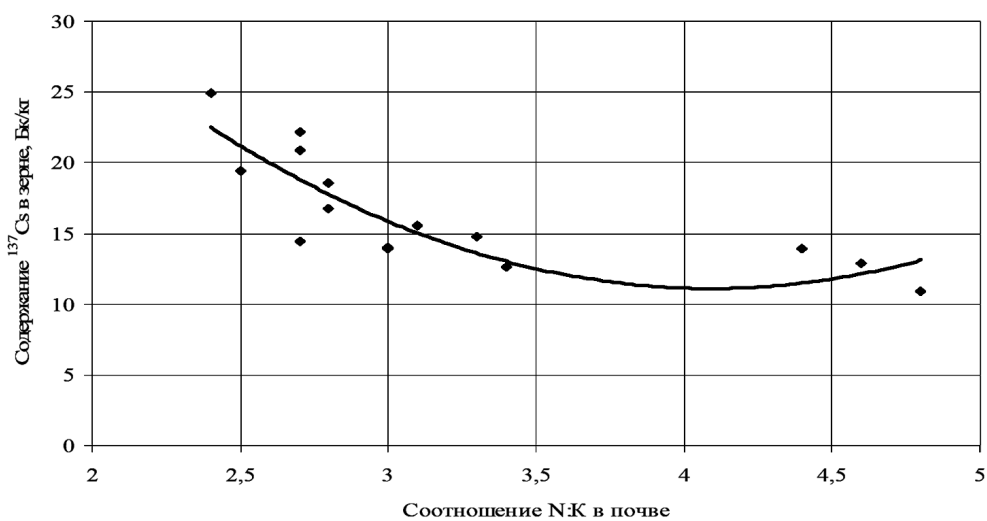


Рис. 2. Зависимость удельной активности ^{137}Cs в зерне возделываемых культур от соотношения N : K в почве

Т а б л и ц а 4. Оптимальное содержание и запас азота в пахотном слое дерново-подзолистых супесчаных почв в зависимости от обеспеченности подвижным калием

| Содержание K ₂ O, мг/кг почвы | Потенциально усвояемый азот | | Минеральный азот | |
|--|-----------------------------|---------|------------------|-----------|
| | мг/кг почвы | кг/га | мг/кг почвы | кг/га |
| 150–180 | 37,5–45,0 | 125–145 | 18,5–22,5 | 62,5–72,5 |
| 181–210 | 45,1–52,5 | 150–170 | 22,6–26,5 | 75,0–85,0 |

По данным Н. Н. Семененко [25], запас усвояемого азота в наиболее насыщенном (0–40 см) слое дерново-подзолистых почв колеблется в пределах 60–450 кг/га и более, чаще 100–200 кг/га, а в среднем составляет 140–150 кг/га. Относительно более низким содержанием N_{усв} характеризуются песчаные и рыхлосупесчаные почвы, более высоким – суглинистые и связносупесчаные почвы. Агрономический оптимум запаса усвояемого азота перед посевом зерновых культур составляет 180 кг/га в песчаных и супесчаных почвах, 200 кг/га – в суглинистых почвах.

Анализ полученных данных показывает, что на типичных для условий радиоактивного загрязнения дерново-подзолистых супесчаных почвах с содержанием усвояемого азота 145–155 кг/га (в нашем случае запас усвояемого азота составлял 150 кг/га) при средней обеспеченности K₂O наблюдается недостаток в калии и избыток в азоте (узкое соотношение N : K), при повышенной обеспеченности складывается близкое к оптимуму и оптимальное соотношение данных элементов в почве, а при высокой обеспеченности K₂O наблюдается дефицит азота.

Параметры оптимального содержания доступного растениям азота в почве предложены в качестве основы для дифференцированного применения азотных удобрений под зерновые культуры на загрязненных радионуклидами землях. Методология установления доз азотных удобрений базируется на принципах почвенной диагностики азотного питания сельскохозяйственных культур, разработанных ранее для незагрязненных радионуклидами почв Беларуси [26]. Доза азота по каждому конкретному полю (участку) для внесения перед посевом яровых и в ранневесеннюю подкормку озимых зерновых культур рассчитывается как разность между нормативом оптимального и фактического содержания доступного растениям азота в почве по следующей формуле:

$$N_{уд} = N_{опт} - N_{факт}$$

где N_{уд} – доза азота удобрений, кг/га д.в.; N_{опт} и N_{факт} – оптимальное и фактическое содержание азота в почве, кг/га.

Отбор почвенных проб и определение содержания потенциально усвояемого азота в почве проводится согласно методике [27].

Заключение. Применение калийных удобрений в дозе 90 кг/га на фоне P₆₀ на дерново-подзолистой супесчаной почве с содержанием в пахотном слое подвижного калия 173 мг/кг почвы снижает по отношению к контролю переход ¹³⁷Cs в зерно ячменя на 30%, озимой ржи – на 27, овса – на 20%. Более высокие их дозы (K₁₂₀ и K₁₅₀) незначительно (на 5–12%) уменьшают переход ¹³⁷Cs в зерновые культуры.

Азотные удобрения усиливают миграцию ¹³⁷Cs в системе «почва – растение». Отрицательное действие их снижается при повышении уровня калийного питания растений. Дробное применение азота по накоплению ¹³⁷Cs в продукции несущественно отличается от однократного внесения той же дозы. Усиление поступления ¹³⁷Cs в зерно наблюдается как при низком, так и при высоком содержании азота в растениях. Низкая концентрация общего азота обуславливает низкую урожайность и, соответственно, увеличение активности ¹³⁷Cs в продукции. Высокий уровень азотного питания растений приводил к увеличению поглощения азота и ¹³⁷Cs растениями. Минимальное накопление радионуклида наблюдалось при содержании общего азота в зерне ячменя 2,0–2,50%, озимой ржи – 1,5–1,65, овса – 1,50–1,60%.

Поступление ¹³⁷Cs в растения зависит от соотношения азота и калия в почве. Минимальное поступление его в зерновые культуры отмечалось при соотношении N : K в почве в диапазоне 1 : (3,8–4,2). Внесение повышенных доз азотных удобрений на низком фоне калийных удобрений

ний сужало это соотношение. Заметное увеличение накопления ^{137}Cs в зерне наблюдалось при сужении соотношения азота к калию менее чем 1 : 3,5. С увеличением обеспеченности почвы подвижным калием от 150 мг/кг почвы (среднее содержание) до 210 мг/кг почвы (повышенное содержание) агроэкологический оптимум содержания потенциально усвояемого азота в почве колеблется от 37,5 до 52,5 мг/кг почвы.

Литература

1. Фокин, А. Д. Сельскохозяйственная радиология: учебник для вузов / А. Д. Фокин, А. А. Лурье, С. П. Торшин. – М. : Дорфа, 2005. – 367 с.
2. Алексахин 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.
3. Бондарь, П. Ф. Особенности применения минеральных удобрений в условиях загрязнения почвы радиоактивными изотопами цезия / П. Ф. Бондарь, Н. А. Лоцилов, А. И. Дутов // *Nuclear Techniques for Sustainable Agriculture and Environmental Preservation*. – Vienna, 1995. – P. 571–581.
4. Урожай и поступление радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в сельскохозяйственные культуры в зависимости от доз калийных удобрений / И. М. Богдевич [и др.] // *Почвенные исследования и применение удобрений : межвед. темат. сб. / Ин-т почвоведения и агрохимии ; под ред. И. М. Богдевича*. – Минск, 2003. – Вып. 27. – С. 158–168.
5. Путятин, Ю. В. Динамика радиологической эффективности калийных удобрений и обеспеченности почв подвижным калием на накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr сельскохозяйственными культурами / Ю. В. Путятин // *Почвоведение и агрохимия*. – 2008. – № 2 (41). – С. 224–234.
6. 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.
7. Handly, R. Effect of various cations upon absorption of carrier-free cesium / R. Handly, R. Overstreet // *Plant Physiology*. – 1961. – N 36. – P. 66–69.
8. Юдинцева, Е. В. О роли калия в доступности ^{137}Cs растениям / Е. В. Юдинцева, Э. М. Левина // *Агрохимия*. – 1982. – № 4. – С. 75–81.
9. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиэкология после Чернобыля / Л. Дж. Апплби [и др.] ; под ред. Ф. Уорнера, Р. Харрисона; пер. с англ. – М. : Мир, 1999. – 512 с.
10. Evans, 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.
11. 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.
12. Тулина, А. С. Закономерности поступления ^{137}Cs в растения из дерново-подзолистой песчаной почвы при внесении азотных удобрений / А. С. Тулина, Н. Г. Ставрова, В. М. Семенов // *Агрохимия*. – 2007. – № 11. – С. 61–70.
13. Организационно-технологические нормативы возделывания сельскохозяйственных культур : сб. отрасл. регламентов / Ин-т аграр. экономики НАН Беларуси; рук. разработ. : В. Г. Гусаков [и др.]. – Минск : Беларус. наука, 2005. – 460 с.
14. Методические указания по определению ^{90}Sr и ^{137}Cs в почвах и растениях / А. В. Кузнецов [и др.]. – Минск : ЦИНАО, 1985. – 64 с.
15. Почвы. Определение органического вещества в модификации ЦИНАО : ГОСТ 26212–91. – Введ. 1993.07.01. – Минск : Изд-во стандартов, 1992. – 6 с.
16. Почвы. Подготовка солевой вытяжки и определение pH по методу ЦИНАО : ГОСТ 26483–85. – Введ. 07.01.86. – Минск : Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1987. – 4 с.
17. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО : ГОСТ 26207–91. – Введ. 07.01.93. – Минск : Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1992. – 6 с.
18. Почвы. Метод определения потенциально усвояемого азота. РСТ Беларуси 908–91 / МСХП РБ. – Минск, 1991. – 14 с.
19. Почвы. Определение обменного аммония по методу ЦИНАО : ГОСТ 26489–85. – Введ. 01.07.86. – Минск : Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1986. – 6 с.
20. Почвы. Определение нитратов по методу ЦИНАО : ГОСТ 26488–85. – Введ. 01.07.86. – Минск : Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1986. – 5 с.
21. Методические указания по анализу почв, кормов и удобрений. – М.: ЦИНАО, 1976. – 56 с.
22. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов. – 5-е изд. – М. : Агропромиздат, 1985. – 351 с.
23. Тулина, А. С. Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений на дерново-подзолистых песчаных почвах, загрязненных ^{137}Cs : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 06.01.04 / А. С. Тулина ; ИФХБПП РАН. – М., 2002. – 24 с.
24. Путятин, Ю. В. Минимизация поступления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в растениеводческую продукцию / Ю. В. Путятин. – Минск : РУП «Институт почвоведения и агрохимии», 2008. – 255 с.
25. Семененко, Н. Н. Адаптивные системы применения азотных удобрений / Н. Н. Семененко. – Минск : БИТ «Хата», 2003. – 164 с.

26. Адаптивные системы применения азотных удобрений под зерновые культуры : метод. рекомендации. – Минск, 2005. – 28 с.

27. Методические указания по проведению комплексной почвенно-растительной диагностики азотного питания зерновых культур в БССР / Н. Н. Семененко [и др.]. – Минск : Ураджай, 1988. – 32 с.

N. N. TSYBULKO, D. V. KISELEVA, I. I. ZHUKOVA

OPTIMIZATION OF NITROGENOUS NUTRITION OF GRAIN CROPS WHEN THE CONTENT OF MOBILE POTASSIUM IN POLLUTED ¹³⁷Cs SOD-PODSOLIC SANDY SOILS IS DIFFERENT

Summary

The researches have established that nitrogen fertilizers on sod-podsolic sandy soils raise the migration of ¹³⁷Cs in the system "soil-plant". With the increase of potassium nutrition level their negative influence decreases. The minimum accumulation of ¹³⁷Cs is observed when the content of nitrogen in barley grains is 2.0–2.50 %, in winter rye grains – 1.5–1.65, oat grains – 1.50–1.60 %. Penetration of ¹³⁷Cs into plants depends also on the balance of nitrogen and potassium in soil. Its minimum penetration into grain crops is observed when the balance of N:K is within the range 1 : (3.8–4.2). A significant increase of accumulation of ¹³⁷Cs in grain is observed with the reduction of the proportion of nitrogen to potassium is less than 1 : 3.5. With the increase of mobile potassium content in soils from 150 (the average content) to 210 mg/kg of soil (the raised content) the agroecological optimum of the content of potentially assimilable nitrogen in soils changes from 37.5 to 52.5 mg/kg of soil.