

УДК 631.811.1.632.118.3

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОСТУПЛЕНИЯ ^{137}Cs В РАСТЕНИЯ ИЗ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ ПРИ ВНЕСЕНИИ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ*

© 2007 г. А. С. Тулина, Н. Г. Ставрова¹, В. М. СеменовИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Пуцино, Московская обл., Россия, atulina@yandex.ru¹Новозыбковская государственная сельскохозяйственная опытная станция ВНИИА
243020, Новозыбков, Брянская обл., Россия

Поступила в редакцию 14.03.2007 г.

В полевых опытах, проведенных на фонах с различным содержанием в почве обменного калия и общего азота, и в вегетационном опыте с использованием стабильного изотопа ^{15}N изучены закономерности поступления ^{137}Cs из дерново-подзолистой песчаной почвы в биомассу овса при внесении азотных удобрений. Установлено, что увеличение удельной аккумуляции ^{137}Cs удобренными азотом растениями могло быть обусловлено сужением соотношения доступных N:K в почвенном растворе, усилением минерализационных процессов в почве, ведущих к росту запасов доступного азота и высвобождению радионуклидов из легкоминерализуемых органических компонентов почвы, а также активизацией поглотительной деятельности корневой системы растений.

ВВЕДЕНИЕ

Дерново-подзолистая песчаная почва характеризуется крайне низкой обеспеченностью элементами минерального питания растений и, в первую очередь, азотом, поэтому возделывание на этой почве большинства культур невозможно без использования азотных удобрений. Однако в условиях загрязнения почвенного покрова ^{137}Cs одностороннее применение минерального азота служит причиной увеличения накопления радионуклидов в растениях [1–5]. При этом речь идет не об увеличении выноса радиоцезия вследствие увеличения урожая, а об увеличении аккумуляции этого радионуклида в единице массы растениеводческой продукции – его удельной аккумуляции (удельного накопления).

Причины такого феномена до конца не ясны. Предполагается, что увеличение накопления радиоцезия растениями при внесении азотных удобрений вызвано увеличением количества подвижного ^{137}Cs в почве под влиянием гидратированных ионов аммония, имеющих с радиоцезием сходный по величине ионный радиус и способных вытеснять его из мест сорбции на почвенных коллоидах [6, 7]. Известно [8], что ион аммония не только дискриминирует сорбцию ^{137}Cs на поверхности почвенных частиц, но и, подобно калию и другим катионам, препятствует его сорбции на корнях растений. Кроме того, внесение азота в нитратной форме также увеличивает поглощение радио-

цезия растениями [9], хотя и в меньшей степени, чем внесение аммонийного азота. В ряде работ отмечается несоответствие между содержанием в почве обменного цезия и его накоплением в растениях [10, 11]. Таким образом, природа усиления поглощения ^{137}Cs растениями при внесении азотных удобрений полностью не ясна и необходимо продолжение исследований этого явления.

Основным агрохимическим приемом ограничения поступления ^{137}Cs из почвы в растения является внесение калийных удобрений [12–19]. Помимо снижения загрязнения растений, внесение калийных удобрений повышает урожайность сельскохозяйственных культур. В вышеописанных условиях особое внимание следует уделять сбалансированности азотного и калийного питания растений. Исследований, посвященных изучению влияния соотношения азота и калия в почве на поступление радиоцезия в растения недостаточно, а потребность в таких исследованиях очевидна.

Целью работы было установление причин увеличения удельной аккумуляции ^{137}Cs растениями при внесении азотных удобрений на дерново-подзолистой песчаной почве, загрязненной Чернобыльскими выпадениями. В задачи исследований входило: определить влияние соотношения азота и калия в почве и удобрениях на накопление ^{137}Cs растениями и выявить зависимости между доступностью растениям азота почвы и азота удобрений и содержанием ^{137}Cs в урожае при разных дозах калийных удобрений.

* Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ, проект № 06-04-81043-Бел_а.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на дерново-слабо-подзолистой песчаной почве, загрязненной цезием-137, на территории Новозыбковского филиала ВИАУ (Брянская область). Содержание физической глины в пахотном слое почвы составляет 5.7%, а физического песка – 94.3%. Минералогический состав почвы более чем на 80% представлен кварцем. Вторая по распространенности группа минералов – полевые шпаты. Из глинистых минералов преобладает каолинит. Как следствие, дерново-слабоподзолистая песчаная почва характеризуется низкой поглотительной способностью, невысокой насыщенностью основаниями и промывным водным режимом. Агрохимическая характеристика почвы следующая: $C_{орг}$ 0.52–0.64%, pH_{KCl} 4.0, $N_{общ}$ 500 мг/кг, $N_{мин}$ ($NH_4^+ + NO_3^-$) 10 мг/кг, обменный калий и фосфор по Кирсанову 35–45 и 100–150 мг/кг соответственно, сумма поглощенных оснований 15–20 мг экв/кг почвы, гидролитическая кислотность 25–30 мг экв/кг, степень насыщенности основаниями 38–40%.

В вегетационном опыте изучали действие доз меченой ^{15}N кальциевой селитры (^{15}N – 26.7 ат. %) на потребление азота растениями и накопление в них ^{137}Cs в зависимости от уровней калийного питания. $N_{скл}$ и K_x вносили в дозах 0, 40, 80 и 160 мг/кг почвы. Повторность опыта 3-кратная. Сосуды Митчерлиха вмещали 5 кг воздушно-сухой почвы. Полив производили до промачивания. Просочившаяся в поддон вода выливалась обратно в сосуд.

Мелкоделяночный полевой опыт 1 проводили на делянках многолетнего полевого стационарного опыта на фонах с содержанием обменного калия 42, 81 и 122 мг/кг по Кирсанову. Удобрения (N_{aa} и K_x) вносили согласно следующей схеме: NOK_0 , $N60K_0$, $N90K_0$, $N120K_0$, $N90K180$. Повторность в опыте трехкратная. Размер делянок 1.5×2 м.

Мелкоделяночный полевой опыт 2 проводили на делянках длительного полевого опыта, варианты которого отличались по содержанию обменного калия (от 48 до 236 мг/кг) и общего азота (от 467 до 711 мг/кг). Дозы N_{aa} составляли 0, 45, 90 и 135 кг/га. Повторность трехкратная. Площадь опытных делянок 1.5×2 м.

Нами было осуществлено подробное картирование почвенных участков полевых мелкоделяночных опытов 1 и 2, на которых проводили исследования. Результаты показали, что загрязнение почвенной поверхности ^{137}Cs было достаточно равномерным и составило 34.7 ± 4.6 Ки/км².

Для проведения вегетационного опыта была взята почва с участка полевого мелкоделяночного опыта 1 из пахотного слоя (0–20 см) с фона с содержанием обменного калия 40 мг/кг. Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs , использованной в вегетационном опыте, была равна 30.5 ± 1.2 Ки/км² или

4030 ± 160 Бк/кг. Перед набивкой сосудов почву тщательно перемешивали, просеивали и высушивали до воздушно-сухого состояния.

Во всех опытах выращивали овес сорта Скакун.

Агрохимические характеристики почвы определяли классическими методами [20, 21]. Содержание общего и минерального азота в почве и общий азот в растениях определяли колориметрически с помощью фенолят-гипохлоритной реакции [22–24]. Измерение ^{15}N в анализируемых образцах почвы и растений производили на эмиссионном спектрометре NOI-5.

Определение содержания ^{137}Cs в растениях полевых опытов и в почве проводили на гамма-спектрометре 1С (средняя ошибка измерения для растительных образцов составила 5.6%, для почвенных образцов – 0.5%), а в растительных образцах вегетационного опыта – на гамма-спектрометре Сanbeta средняя ошибка измерения – 12%.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили дисперсионным методом [25] с использованием программы Microsoft Excel 2000.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При поступлении ^{137}Cs из почвы в растения важную роль играют избирательность корневой системы растений (обсуждение которой не являлось целью работы и осталось за рамками дискуссии в данной статье), физико-химические процессы в системе почвенный раствор – ППК и сорбция радионуклидов на корнях растений.

Поступление K и ^{137}Cs из почвы в растения имеет некоторое сходство, при этом наблюдается очень большая дискриминация ^{137}Cs относительно калия. С внесением K в почву дискриминация ^{137}Cs усиливается, что отчасти объясняется дополнительным разбавлением микроколичеств ^{137}Cs макроколичествами калия, в результате чего снижается аккумуляция радиоцезия в растительной биомассе. Эта закономерность отчетливо проявилась в вегетационном опыте, в котором внесение калийного удобрения привело к снижению загрязнения растений радионуклидами в 3.3–9.0 раз в зависимости от уровня азотного питания (табл. 1). При этом следует отметить, что увеличение доз K_x больше 80 мг/кг сопровождалось существенным замедлением темпов снижения содержания ^{137}Cs в растениях, а на фоне $N1$ – не приводило к дальнейшему снижению содержания ^{137}Cs в растениях (рис. 1), что согласуется с мнением других авторов [26], полагающих, что существует некий “оптимум” содержания калия в почве, которым ограничивается его деконтаминирующее воздействие. Возможно, это может быть связано с известным фактом, состоящим в том, что ионы калия дискриминируют сорбцию радиоцезия не только на корнях растений, но и на почвенных частицах

[27–30], в результате чего увеличивается абсолютное количество радионуклидов в подвижном состоянии, которые, в условиях промывного водного режима, могут даже мигрировать вниз по почвенному профилю [31].

При внесении N1 продуктивность растений возрастала в 1.8–2.4 раза, а удельное накопление радиоцезия при этом увеличивалось в 1.3–7.1 раза в зависимости от доз калия. Дальнейшее увеличение доз азотных удобрений не обеспечивало существенного роста урожайности культур, но способствовало резкому увеличению накопления в них ¹³⁷Cs. Увеличение аккумуляции ¹³⁷Cs в растениях при внесении азотных удобрений могло быть результатом изменения соотношения азота и калия в почве. С внесением азота это соотношение сужалось, возрастала способность удобренного растения поглощать калий и другие катионы. При уменьшении концентрации калия в почвенном растворе дискриминация цезия относительно калия при сорбции на корнях уменьшалась, сопровождаемая резким увеличением аккумуляции ¹³⁷Cs в растениях. Помимо того, что калийный дефицит приводит к увеличению загрязнения продукции растениеводства, он становится причиной ухудшения минерального питания растений и, в результате, снижения урожайности культур. Следовательно, обеспечение сбалансированности азотного и калийного питания растений является важной составляющей эффективного производства экологически чистой продукции на загрязненных радионуклидами почвах.

Роль соотношения азота и калия в удобрении в ограничении накопления цезия в урожае особенно отчетливо проявляется при низкой обеспеченности почвы обменным калием (около 40 мг/кг). В вегетационном опыте сужение отношения азота к калию в удобрении ниже единицы приводило к усилению поглощения растениями ¹³⁷Cs – в 1.6 раза при N:K 1:0.5 и в 2.9 раза при соотношении 1:0.25. Наоборот, увеличение этого отношения позволяло снизить загрязнение растений радиоцезием в 1.8 и 1.6 раза при N:K, равных 1:2 и 1:4 соответственно. Оптимальным отношением N:K в удобрении

Таблица 1. Влияние азотных и калийных удобрений на биомассу овса и накопление ¹³⁷Cs (вегетационный опыт)

Вариант	Биомасса, г/сосуд		Накопление ¹³⁷ Cs, Бк/кг	
	зерно	солома	зерно	солома
K ₀ N ₀	4.1	10.8	1440	2140
K ₀ N ₁	7.3	17.1	1820	2730
K ₀ N ₂	6.9	21.0	3510	3450
K ₀ N ₃	9.0	21.3	5920	5600
K ₁ N ₀	4.5	11.0	620	1130
K ₁ N ₁	11.0	16.7	1080	2190
K ₁ N ₂	10.5	19.9	1820	2820
K ₁ N ₃	10.9	23.8	3150	3930
K ₂ N ₀	4.8	12.2	210	578
K ₂ N ₁	11.8	16.3	691	1580
K ₂ N ₂	11.7	21.5	1060	2190
K ₂ N ₃	10.8	24.1	1460	2140
K ₃ N ₀	5.0	10.3	77	242
K ₃ N ₁	12.2	17.9	544	854
K ₃ N ₂	12.9	26.9	657	1160
K ₃ N ₃	12.9	29.8	841	1170
HCP ₀₅	0.6	1.9		

было 1:2. Дальнейшее расширение этого отношения посредством повышения дозы калия не приводило к дополнительному уменьшению аккумуляции ¹³⁷Cs в растениях, приводя при этом к угнетению их роста.

В условиях мелкоделяночного опыта 1, проведенного на фонах с различной обеспеченностью почвы обменным калием, изучали одностороннее действие возрастающих доз азотных удобрений и азотно-калийного удобрения (N90K180) с соотношением N:K 1:2 на урожай овса и аккумуляцию ¹³⁷Cs в растениях. С увеличением обеспеченности почвы калием урожай зерна овса на контроле

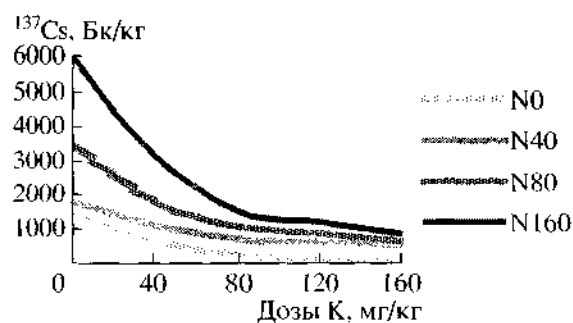
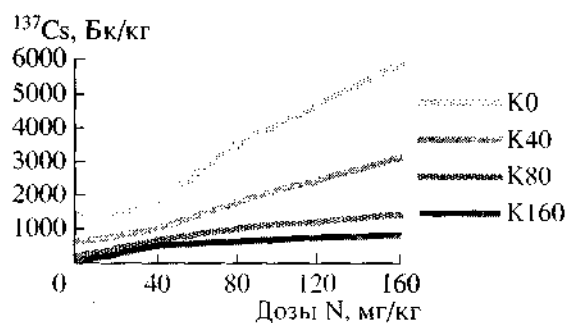


Рис. 1. Влияние возрастающих доз азотных и калийных удобрений на накопление ¹³⁷Cs в зерне овса (вегетационный опыт (содержание обменного калия в почве – 40 мг/кг).

Таблица 2. Влияние азотных и калийных удобрений на урожайность овса и накопление ^{137}Cs в растениях в зависимости от содержания в почве обменного калия (полевой мелкоделяночный опыт 1)

$K_{\text{обм}}$ МГ/КГ ПОЧВЫ	Вариант	Урожайность, ц/га		Накопление ^{137}Cs , Бк/кг	
		зерно	солома	зерно	солома
41	N0K0	20.8	24.0	269	759
	N60K0	24.5	28.6	415	831
	N90K0	26.6	32.5	498	807
	N120K0	30.7	33.3	574	1010
	N90K180	30.2	46.9	196	740
80	N0K0	25.0	38.5	185	546
	N60K0	31.3	57.8	189	563
	N90K0	32.3	67.7	203	565
	N120K0	33.4	63.6	280	565
	N90K180	35.0	64.1	189	570
122	N0K0	29.7	38.0	179	502
	N60K0	34.9	61.5	182	524
	N90K0	35.0	63.0	194	552
	N120K0	35.4	62.0	204	570
	N90K180	36.5	59.9	169	507
НСР ₀₅		2.2	2.6		

возрастал с 20.8 до 29.7 ц/га (табл. 2). Прибавки урожая от внесения N60, N90 N120 составили 3.7, 5.8 и 9.9 ц/га, 6.3, 7.3 и 8.4 ц/га, 5.2, 5.3 и 5.7 ц/га, а от внесения K180 – 3.6, 2.7 и 1.6 ц/га на фонах с содержанием $K_{\text{обм}}$ 41, 80 и 122 мг/кг соответственно. Видно, что повышение содержания обменного калия в почве увеличивало урожай и снижало влияние на урожайность азотных и калийных удобрений, а также уменьшало различия в урожайности при внесении повышающихся доз азота.

Удельное накопление цезия в хозяйственно-ценной части продукции при повышении содержания $K_{\text{обм}}$ от 41 до 80 мг/кг уменьшалось в среднем по вариантам опыта в 1.9 раза, от 41 до 122 мг/кг – в 2.1 раза, а от 80 до 122 мг/кг – в 1.1 раза, что согласуется с описанными выше результатами вегетационного опыта, указывающими на нелинейную отрицательную зависимость между концентрацией калия в почве и накоплением цезия в растениях.

Внесение N60, N90 и N120 на фоне 41 мг/кг обменного калия в почве приводило к увеличению накопления радиоцезия в зерне в 1.5, 1.9 и 2.1 раза соответственно. Внесение N90K180, напротив, способствовало снижению аккумуляции радионуклидов в 1.4 раза по сравнению с контролем и в 2.5 раза по сравнению с односторонним применением азота. При более высокой обеспеченности почвы $K_{\text{обм}}$ (80 и 122 мг/кг) увеличение загрязне-

ния растительной продукции в 1.5 и 1.1 раза наблюдалось лишь при одностороннем внесении 120 кг/га $N_{\text{об}}$, а во всех остальных вариантах опыта различия в накоплении ^{137}Cs практически отсутствовали.

Из изложенного следует, что увеличение содержания в почве обменного калия до 80–122 мг/кг способствовало росту урожайности, ограничивало накопление радионуклидов в продукции при применении возрастающих доз азотных удобрений, но вместе с тем уменьшало положительное влияние калийных удобрений на снижение накопления радиоцезия в урожае.

На основании вышеизложенного можно утверждать, что размеры аккумуляции ^{137}Cs в урожае зависят не только от количества вносимых с удобрениями азота и калия, но и от их содержания в почве в доступных растениям формах. В связи с этим мы попытались оценить влияние соотношения доступного растениям азота и калия в почве на накопление радиоцезия в растениях. Запасы доступного растениям азота рассчитывали как сумму минерального азота в почве на начало вегетации и азота, вносимого с азотным удобрением, а запасы доступного калия – как сумму обменного калия почвы на начало вегетации и калия удобрений. Было принято допущение, что минеральный азот почвы и азот удобрений, с одной стороны, и обменный калий почвы и калий удобрений, с другой стороны, одинаково доступны растениям.

В полевом мелкоделяночном опыте 2 с возрастающими дозами азотных удобрений, проведенном на делянках длительного стационарного опыта с удобрениями, соотношения доступного азота и калия в почве составили от 0.7 до 11.8. Полученные данные (рис. 2) свидетельствуют о том, что, действительно, сужение соотношения доступных азота и калия в почве способствует увеличению накопления ^{137}Cs в растениях. При этом увеличение накопления в растениях ^{137}Cs наступало уже при соотношении N:K около 1:3, а при дальнейшем сужении этого соотношения до 0.7 возрастало в 5.5 раза в зерне и в 7.7 раза в соломе. При расширении соотношения доступных N:K от 1:3 до 1:11.8 происходило уменьшение накопления растениями радиоцезия, но не столь значительное – в зерне в 2.3 раза, а в соломе в 1.7 раза. Этот факт подтверждается результатами корреляционного анализа данных (табл. 3). Зависимости между накоплением цезия в растениях и соотношениями азота к калию были значительно более тесными при N:K от 0.7 до 3, чем при N:K от 3 до 11.8 и для всего массива данных.

Влияние азотных удобрений на состояние азотного питания овса хорошо демонстрируется результатами опыта с ^{15}N (табл. 4). С увеличением дозы $N_{\text{скл}}$ использование растениями азота удобрений увеличивалось, а размеры закрепления в почве

Таблица 4. Баланс азота удобрений в системе почва-растение при внесении $\text{Ca}({}^{15}\text{NO}_3)_2$ в зависимости от внесения калийных удобрений (вегетационный опыт)

Доза K_2O KCl	Доза N $\text{Ca}({}^{15}\text{NO}_3)_2$	Поглощено растениями N	Газообразные потери N	Осталось в почве	
				$\text{N}_{\text{общ}}$	$\text{N}_{\text{мин}} (\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)$
мг/кг почвы					
0	40	$\frac{13}{32.5}$	$\frac{7}{17.5}$	$\frac{20}{50.0}$	Следы
0	80	$\frac{31}{38.8}$	$\frac{22}{27.5}$	$\frac{27}{33.7}$	»
0	160	$\frac{101}{63.1}$	$\frac{26}{16.2}$	$\frac{33}{20.7}$	»
40	40	$\frac{14}{35.0}$	$\frac{7}{17.5}$	$\frac{19}{47.5}$	»
40	80	$\frac{45}{56.3}$	$\frac{18}{22.5}$	$\frac{17}{21.3}$	»
40	160	$\frac{111}{69.4}$	$\frac{22}{13.7}$	$\frac{27}{16.9}$	»
80	40	$\frac{13}{32.5}$	$\frac{14}{35.0}$	$\frac{13}{32.5}$	»
80	80	$\frac{38}{47.5}$	$\frac{26}{32.5}$	$\frac{16}{20.0}$	»
80	160	$\frac{106}{66.2}$	$\frac{31}{19.4}$	$\frac{23}{14.4}$	»
160	40	$\frac{10}{25.0}$	$\frac{21}{52.5}$	$\frac{9}{22.5}$	»
160	80	$\frac{37}{46.2}$	$\frac{30}{37.5}$	$\frac{13}{16.3}$	»
160	160	$\frac{113}{70.6}$	$\frac{27}{16.9}$	$\frac{20}{12.5}$	»

Примечание: Над чертой – мг/кг почвы, под чертой – % от дозы.

и сорбируется почвой менее прочно [36]. Однако повышение доли хлора по сравнению с долей нитрата в почвенном растворе приводит к поступлению относительно большего количества ионов хлора к положительно заряженным центрам на ППК, что блокирует доступ нитрата к сорбционным поверхностям. Кроме того, хлорид, будучи балластным ионом, не используется растениями, а концентрация нитрата в почве с ростом растений снижается, поэтому доля хлорида дополнительно возрастает, и закрепление нитрата уменьшается в еще большей степени. Чем больше в почву поступало хлора с K_x , тем меньше закреплялось азота удобрений ($r^2 = -0.807 \dots -0.841$).

Как упоминалось выше, калий имел предел своего воздействия на снижение накопления радиоцезия в растительной массе ("оптимум" составлял около 80–120 мг/кг), тогда как внесение азотных удобрений повышало его поступление в растения при таких концентрациях калия в почве, когда о проявлении калийного дефицита в питании растений говорить не приходилось, и невозможно было объяснить это явление сужением соотношения доступных растениям азота и калия в почве.

Известно, что одной из причин дополнительного накопления растениями азота почвы при внесении минерального азота может быть активизация поглотительной функции удобрённых

Таблица 5. Минерализация азота почвы, закрепление азота удобрений в дерново-подзолистой песчаной почве и накопление ¹³⁷Cs в растениях (вегетационный опыт)

Доза K ₂ O KCl мг/кг почвы	Доза N Ca(NO ₃) ₂ мг/кг почвы	Компенсация минерализо- ванного азота почвы азотом удобрений*, %	Экстра-азот** мг/кг почвы	Дополнитель- ное накопление в растениях ¹³⁷ Cs*** Бк/соуд
0	40	71	7	35
0	80	87	9	73
0	160	71	24	119
40	40	76	8	51
40	80	50	17	81
40	160	54	30	174
80	40	45	11	26
80	80	46	18	44
80	160	41	39	44
160	40	36	9	3
160	80	38	19	19
160	160	43	32	11

* Компенсацию минерализованного азота почвы остаточным азотом удобрений рассчитывали как отношение закрепленного в почве азота удобрений и поглощенного растениями азота почвы ($N_{уд. иммоб}/N_{п. в раст} \times 100\%$).

** Экстра-азот рассчитывали как разницу между поглощением растениями (зерно + солома + корни) азота почвы на удобренном и неудобренном азотом вариантах опыта.

*** Дополнительное накопление в растениях ¹³⁷Cs рассчитывали как разницу между накоплением радионуклида биомассой растений (зерно + солома + корни) в удобренном и неудобренном азотом вариантах опыта.

растений [37, 38]. При применении минерального азота увеличивается вынос растениями не только элементов минерального питания, но и так называемых "балластных" элементов, не требующих-

ся для роста и развития растений, например, такого загрязнителя, как Cd [39]. Такое же действие азотные удобрения оказывали и на поглощение растениями ¹³⁷Cs. Увеличение накопления радиоцезия в растениях при внесении азотных удобрений, таким образом, было связано не только с увеличением количества доступного растениям ¹³⁷Cs, но и с усилением способности растений к его накоплению, что отчасти объясняет несоответствие в ряде случаев между содержанием в почве обменного цезия и его накоплением в растениях.

Следует заметить, что при расчете доступного азота мы учитывали количество минерального азота лишь на начало вегетации. Однако известно, что внесение азотных удобрений оказывает довольно продолжительное влияние на трансформацию почвенного азота и, в первую очередь, на минерализационно-иммобилизационную его обратимость [40, 41]. ¹³⁷Cs может в значительных количествах накапливаться в телах микроорганизмов, а после их отмирания и минерализации, которой в некоторой степени может способствовать внесение азотных удобрений, переходить в доступное для растений состояние [42-44]. Последнее предположение хорошо согласуется с данными, полученными в полевом мелкоделяночном опыте 2 (табл. 6). При практически равном содержании обменного калия (108 и 106 мг/кг) в почве варианта NP + навоз (содержание N_{общ} 689 мг/кг) загрязнение зерна и соломы овса радиоцезием было в 1.4 и в 1.6 раза выше, чем в варианте NPK (N_{общ} 564 мг/кг). Такую же закономерность нам удалось выявить в вариантах с содержанием K_{обм} 58 мг/кг – на неудобренном контроле (N_{общ} 467 мг/кг) накопление радионуклидов было в 1.3 раза ниже в зерне и в 1.5 раза – в соломе овса по сравнению с вариантом NP (N_{общ} 564 мг/кг). Увеличение поглощения растениями

Таблица 6. Влияние соотношения доступных растениям азота и калия на накопление ¹³⁷Cs в зерне овса (полевой мелкоделяночный опыт 2)

Фон предыдущего внесения удобрений	N _{общ}	N _{мин}	K _{обм}	Дозы N _{аа} , кг/га			
				0	45	90	135
				накопление ¹³⁷ Cs в зерне овса, Бк/кг			
Без удобрений (контроль)	467	15	58	156	336	615	524
N	502	24	48	209	461	724	624
NK	520	17	116	85	78	111	160
NP	564	14	58	189	405	701	746
NPK	564	17	108	77	87	168	228
PK	448	14	125	56	46	75	153
Навоз	502	21	90	116	164	339	381
N + навоз	667	20	66	119	254	351	401
NK + навоз	644	21	158	67	64	95	156
NP + навоз	689	19	106	100	154	303	351
NPK + навоз	711	23	205	56	66	77	132
PK + навоз	481	20	236	54	85	103	165

Таблица 7. Влияние соотношения азота и калия, доступного растениям, на урожайность зерна овса (полевой мелкоделяночный опыт 2)

Фон предыдущего внесения удобрений	N _{общ}	N _{мин}	K _{обм}	Дозы N _{аа} , кг/га			
				0	45	90	135
	мг/кг			урожайность зерна овса, ц/га			
Без удобрений (контроль)	467	15	58	19.1	33.8	32.5	33.7
N	502	24	48	24.3	33.9	35.6	33.6
NK	520	17	116	30.0	44.3	42.7	44.2
NP	564	14	58	25.3	32.1	35.2	39.5
NPK	564	17	108	31.7	46.4	48.9	52.0
PK	448	14	125	19.7	38.8	42.5	48.4
Навоз	502	21	90	22.4	37.4	42.6	37.4
N + навоз	667	20	66	26.4	34.2	34.7	37.3
NK + навоз	644	21	158	33.5	45.5	42.9	48.0
NP + навоз	689	19	106	27.0	33.2	33.6	39.3
NPK + навоз	711	23	205	33.5	42.3	47.3	51.2
PK + навоз	481	20	236	25.7	37.7	37.8	41.3
HCP ₀₅				1.1			

радионуклидов сопровождалось как увеличением, так и снижением урожайности (табл. 7). Можно предположить, что с увеличением запасов общего азота в почве также увеличилось и содержание потенциально минерализуемого азота, трансформация которого в минеральные формы приводила к более резкому, чем это можно было судить по исходному количеству N_{мин}, сужению соотношения N:K в почве, усиливая эффект накопления растениями ¹³⁷Cs при внесении азотных удобрений. Именно степень подвижности почвенного азота является, по-видимому, тем ключевым фактором, который контролирует то или иное влияние азотных удобрений на размеры накопления радиоцезия в растениях.

ВЫВОДЫ

1. Поступление ¹³⁷Cs из почвы в растения стимулировалось азотом и ограничивалось калием, причем влияние последнего на уменьшение накопления радионуклидов проявлялось до определенной концентрации доступного калия в почве. Эффект уменьшения накопления ¹³⁷Cs в растениях под влиянием калийных удобрений был значительно выше, чем влияние азотных удобрений на увеличение аккумуляции радионуклидов в урожае.

2. Внесение азотных удобрений способствовало сужению соотношения азота к калию в почве и увеличению накопления ¹³⁷Cs в растениях. На почве с содержанием обменного калия около 40 мг/кг оптимальным было применение азотно-

калийного удобрения с соотношением N:K 1:2. Повышение содержания обменного калия в почве до 80–120 мг/кг значительно уменьшало воздействие азотных удобрений на увеличение аккумуляции радиоцезия в растительной биомассе и сглаживало эффект от возрастающих концентраций азота.

3. Установлена тесная положительная связь между дополнительным накоплением растениями азота почвы и ¹³⁷Cs под влиянием внесения азотных удобрений. Увеличение накопления радиоцезия удобрениями азотом растениями могло быть обусловлено усилением минерализационных процессов в почве, ведущих к росту запасов доступного растениям азота, сужению отношения N:K и высвобождению радионуклидов из легкоминерализуемых органических компонентов почвы, а также активизацией поглотительной деятельности корневой системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключковский В.М., Гулякин И.В. Поведение в почвах и растениях микроколичеств стронция, цезия, рутения и циркония // Почвоведение, 1958, № 3, С. 1–16.
2. Радиоактивность и пища человека / Под ред. Р. Рассела. Пер. с англ. Р.М. Алексахина и Ф.А. Тихомирова / Под ред. В.М. Ключковского. М.: Атомиздат, 1971. 375 с.
3. Светов В.А. Агропромышленное производство на загрязненных радионуклидами территориях РСФСР // Химизация сел. хоз-ва, 1991, № 11, С. 9–13.

4. Рекомендации по ведению сельского хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения территории в результате аварии на Чернобыльской АЭС на период 1991–1995 гг. / Под ред. Р.М. Алексахина. М.: 1991. 58 с.
5. Руководство по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 1997–2000 гг. Минск, 1997. 73 с.
6. Моисеев И.Т., Рерих Л.А., Тихомиров Ф.А. К вопросу о влиянии минеральных удобрений на доступность ^{137}Cs из почвы сельскохозяйственным растениям // Агрохимия. 1986. № 2. С. 89–94.
7. Алексахин Р.М., Моисеев И.Т., Тихомиров Ф.А. Поведение ^{137}Cs в системе почва–растение и влияние внесения удобрений на накопление радионуклида в урожае // Агрохимия. 1992. № 8. С. 127–138.
8. Handly R., Overstreet R. Effect of various cations upon absorption of carrier-free cesium // Plant Physiology. 1961. № 36. P. 66–69.
9. Evans E.J., Dekker A.J. Effect of nitrogen on caesium-137 in soils and its uptake by oat plants // Canadian J. of Soil Sci. 1969. № 49. P. 349–355.
10. Юдинцева Е.В. Влияние систематического применения удобрений на размеры перехода радиоактивных элементов в растения // Агрохимия. 1984. № 4. С. 83–87.
11. Моисеев И.Т., Тихомиров Ф.А., Мартюшов В.Э., Рерих Л.А. К оценке влияния минеральных удобрений на динамику обменного ^{137}Cs в почвах и доступность его овощным культурам // Агрохимия. 1988. № 5. С. 86–91.
12. Гулякин И.В., Юдинцева Е.В., Левина Э.М., Кожемякина Т.А. Накопление радиоцезия в урожае сельскохозяйственных культур в зависимости от применения калийных удобрений // Агрохимия. 1977. № 6. С. 111–116.
13. Тулин С.А., Ставрова Н.Г., Воробьев Г.Т., Прищеп Н.И., Коровяковская С.О. Калий на почвах, загрязненных радиоактивным цезием // Химия в сел. хоз-ве. 1994. С. 12–14.
14. Тулин С.А., Тулина А.С. Рекомендации по эффективному применению азота в зоне, загрязненной радионуклидами. Информ. листок. Центр научн.-тех. Информ. Брянск, 1994. № 131–94.
15. Tulin S.A., Stavrova N.G., Koroviakovskaya S.O., Tulina A.S. The effects of potassium fertilizers on ^{137}Cs uptake and yield of crops on Bryansk soddy podzolic sandy soils contaminated by the Chernobyl Disaster // Potash Review. IPI. Basel, Switzerland., № 2/1995. 3/6. P. 1–5.
16. Тулина А.С., Ставрова Н.Г. Система применения удобрений в зернокармном звене севооборота на дерново-подзолистых песчаных почвах, загрязненных цезием-137 // Агрохимия. 1999. № 8. С. 18–24.
17. Санжарова Н.И. Радиоэкологический мониторинг агроэкосистем и ведение сельского хозяйства в зоне воздействия атомных электростанций: Дис. ... д-ра биол. наук. Обнинск, 1997. 366 с.
18. Агеец В.Ю. Система мер снижения поступления радионуклидов в урожай – основа реабилитации загрязненных территорий Беларуси: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Минск, 2001. 42с.
19. Zhy Y.-G., Shaw G., Nisbet A.F., Wilkins B.T. Effect of potassium (K) supply on the uptake of ^{137}Cs by spring wheat (*Triticum aestivum* cv. Tonic): a lysimeter study // Radiat. Environ. Biophysics. 2000. V. 39. P. 283–290.
20. Агрохимические методы исследования почв / Под ред. Соколова А.В. М.: Наука, 1975. 656 с.
21. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 488 с.
22. Кудеяров В.Н. Колориметрическое определение аммонийного азота в почвах и растениях феноловым методом // Агрохимия. 1965. № 6. С. 146–150.
23. Бочкарев А.Н., Кудеяров В.Н. Определение нитратов в почве, воде и растениях // Химия в сел. хоз-ве. 1982. № 4. С. 49–51.
24. Кудеяров В.Н. К методике определения общего азота в почвах и растениях // Агрохимия. 1972. № 11. С. 121–125.
25. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М: Колос, 1979. 416 с.
26. Гулякин И.В., Юдинцева Е.В. Сельскохозяйственная радиобиология. М.: Колос, 1973. 272 с.
27. Титлянова А.А. О поведении цезия и рубидия в почвах // Почвоведение. 1962. № 3. С. 53–62.
28. Титлянова А.А., Тимофеева И.А. О подвижности соединений кобальта, стронция и цезия в почве // Почвоведение. 1959. № 3. С. 86–90.
29. Schulz R.K., Overstreet R., Barshad I. On the soil chemistry of cesium-137 // Soil Sci. 1960. V. 89. № 1. P. 16–27.
30. Coleman N.T., Lewis R.J., Craig D. Sorption of cesium by soils and its displacement by salt solutions // Soil Sci. Soc. Amer. Proceed. 1963. V. 27. № 3. P. 290–294.
31. Харкевич Л.П. Миграция ^{137}Cs по профилю почвы под влиянием минеральных удобрений и известкования // Бюл. ВИАУ. № 114. 2001. С. 172.
32. Семенов В.М. Образование «экстра-азота» в удобренных почвах и его роль в питании растений // Агрохимия. 1999. № 8. С. 5–12.
33. Кудеяров В.Н., Биелек П. Характеристика процессов азотного цикла в почве в связи с превращением в ней азота удобрений // Баланс азота и трансформация азотных удобрений в почвах. Пушино: ОНТИ, 1986.
34. Семенов В.М. Слагаемые эффективности азотных удобрений в системе почва–растение и критерии их количественной оценки // Агрохимия. 1999. № 5. С. 25–32.
35. Soil Chemistry. A. Basic Elements / Eds G.H. Bolt, M.G.M. Bruggenwert. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam – Oxford – N. Y., 1976. 282 p.
36. Пинский Д.Л. Ионнообменные процессы в почвах. Пушино. ОНТИ ПНЦ РАН, 1997. 166 с.
37. Семенов В.М., Мергель А.А., Розонова Л.Н., Кузнецова Т.В., Кудеяров В.Н. Количественная оценка процессов азотного цикла при внесении возрастающих доз азотных удобрений. Сообщение 2. // Агрохимия. 1992. № 5. С. 3–10.
38. Jenkinson D.S., Fox R.H., Rayner J.H. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen the so-called “priming” effect // J. Soil Sci. 1985. V. 36. № 3. P. 425–444.

39. Mitchell L.D., Grant C.A., Racz G.J. Effect of nitrogen application on concentration of cadmium and nutrient ions in soil solution and in durum wheat // *Can. J. Soil Sci.* 2000. V. 80. № 1. P. 107–115.
40. Кудеяров В.Н. Цикл азота в почве и эффективность удобрений. М.: Наука, 1989. 216 с.
41. Руделев Е.В. Минерализация-иммобилизация азота в основных типах почв России и эффективность азотных удобрений: Автореф. ... д-ра биол. наук. М.: 1992. 34 с.
42. Абатуров Ю.Д., Гегемян Г.В., Тюрюканов А.Н. К вопросу о роли микроорганизмов в накоплении и перераспределении некоторых радионуклидов // Симп. "Миграция радиоактивных элементов в наземных биогеоценозах". Радиобиология. Информ.-бюл. Вып. 13. Москва, 9–12 декабря 1968 г. М., 1971.
43. Сельскохозяйственная радиозкология / Под ред. Алексахина Р.М. и Корнеева Н.А. М.: Экология. 1991. 397 с.
44. Baumann A., Schimmack W., Steindl H., Bunzl K. Association of fallout radiocesium with soil constituents: effect of sterilization of forest soils by fumigation with chloroform // *Radiat. Environ. Biophys.* 1996. V. 35. P. 229–233.

¹³⁷Cs Uptake by Plants from Sandy Soddy-Podzolic Soil under Nitrogen Fertilization

A. S. Tulina*, N. G. Stavrova*, and V. M. Semenov

Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences, ul. Institutskaya 2, Pushchino, Moscow oblast, 142290 Russia

E-mail: atulina@yandex.ru

**Novozybkov State Agricultural Experimental Station of the VIUA, Novozybkov, Bryansk oblast, 243020 Russia*

Regularities of ¹³⁷Cs input to the oat biomass from sandy soddy-podzolic soil under nitrogen fertilization were studied in field experiments on plots with different contents of exchangeable potassium and total nitrogen and in a pot experiment using the stable ¹⁵N isotope. It was found that the increase in the specific accumulation of ¹³⁷Cs by nitrogen-fertilized plants can be due to the decrease in the available N : K ratio in the soil solution, the enhancement of mineralization in the soil (which increases the reserve of plant-available nitrogen and the release of radionuclides from readily mineralizable organic soil components), and the activation of the uptaking capacity of plant roots.