

УДК 63:577.391.631.41

МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ K^+ И NH_4^+ НА НАКОПЛЕНИЕ ^{137}Cs
ДВУХНЕДЕЛЬНЫМИ РАСТЕНИЯМИ ЯЧМЕНЯ
ИЗ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ*

© 2005 г. С. В. Круглое, Л. Г. Суслина, В. С. Анисимов, Р. М. Алексахин

ВНИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии РАСХН, 249020, Обнинск

Поступила в редакцию 18.09.2003 г.

При выращивании двухнедельных растений ячменя (*Hordeum vulgare* L., cv *Zaversky 85*) на загрязненной ^{137}Cs дерново-подзолистой песчаной почве с внесением К в четырех дозах и N в аммонийной форме в трех дозах показано, что добавление минеральных удобрений приводит к уменьшению накопления ^{137}Cs растениями, но эффект не пропорционален дозе удобрения и зависит от обеспеченности почвы обменными K^+ и NH_4^+ . Существует также пороговая концентрация обменных катионов (2–2,5 и 2–Л мг-экв K^+ и NH_4^+ соответственно), после превышения которой добавление К в целях снижения накопления ^{137}Cs растениями менее эффективно, а дальнейший рост концентрации NH_4^+ в почве ингибирует эффект К и увеличивает поглощение ^{137}Cs корнями. Обсуждается механизм влияния возрастающих концентраций ионов K^+ и NH_4^+ на корневое поглощение ^{137}Cs .

ВВЕДЕНИЕ

Поглощение растениями радиоцезия, как и любого химического элемента, включает ряд процессов, протекающих в почве, на границе раздела почва-корни и в самом растении. В качестве промежуточной среды между твердой фазой почвы и корнями растений выступает почвенный раствор. Распределение радионуклида между твердой и жидкой фазами почвы является физико-химическим процессом и контролируется сорбционно-десорбционными и ионообменными равновесиями в почве. Поглощение его из почвенного раствора корнями - процесс биологический и контролируется физиологическими реакциями в растении [2]. Оба типа процессов подвержены влиянию концентраций основных катионов в составе жидкой фазы почв и ППК. При этом состав ионов, влияющих на селективность сорбции твердой фазой почв и поглощение радиоцезия корнями растений из почвенного раствора, практически совпадает. В первую очередь к ним относятся распространенные катионы почвенных систем K^+ , NH_4^+ , Na^+ , H^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} , всегда присутствующие в больших количествах. Это в значительной степени осложняет исследования, направленные на выявление и более четкое понимание механизмов, регулирующих перенос радиоцезия из почвы в растения.

Удерживание ^{137}Cs почвой контролируется ионным обменом на высокоселективных центрах сорбции [10], расположенных, главным образом, в клиновидных зонах кристаллической решетки частиц глинистых минералов, подвергшихся выветриванию. При этом значительная часть цезия, находящегося в твердой фазе, недоступна для обмена с почвенным раствором. Ионы NH_4^+ , K^+ и Cs^+ образуют гомологическую серию, характеризующуюся чрезвычайно высокой степенью физико-химического подобия [9, 15, 16], хотя и не являются аналогами в физиологическом отношении [7, 9]. Поэтому K^+ и NH_4^+ играют важную роль в сорбционно-десорбционных и ионообменных процессах с участием радиоцезия, а конкретный эффект, который каждый из ионов оказывает на перенос радиоцезия из почвы в растения, является результатом баланса между их конкуренцией за адсорбцию глинистыми почвенными минералами и поглощение корнями растений [16].

Влиянию К на биологическую доступность радиоцезия в почве и его накоплению растениями из почвы или питательного раствора посвящены многочисленные исследования. Установлено, что калий эффективно подавляет накопление радиоцезия культурами [1, 4, 5]. Но эффект не пропорционален повышению концентрации К в среде произрастания, и существует "критическая" концентрация K^+ [9, 12, 19, 21, 22, 25, 26], выше кото-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 00-04-49310а).

рой дальнейшее увеличение обеспеченности К не приводит к существенному снижению поглощения Cs растениями. Для объяснения ингибирующего эффекта калия предложены различные механизмы [18, 26], включая ионное разбавление и прямое конкурентное взаимодействие [4, 5, 16, 19], селективное конкурентное вытеснение, изменение кинетики поглощения Cs [17, 16, 7] и смену доминирующей транспортной системы, осуществляющей перенос ионов K^+ и Cs^+ через биологические мембраны [17, 25, 26].

Значительно меньше работ, в которых рассматривается влияние на поглощение радиоцезия NH_4^+ и, особенно, совместный эффект ионов K^+ и NH_4^+ при разном соотношении их концентраций в почве или питательном растворе [11, 15, 16, 19, 20, 23], причем результаты работ более противоречивы. Сообщалось как об увеличении [15], так и уменьшении [16, 19, 20, 22] поглощения радиоцезия с ростом концентрации NH_4^+ , а в работе Смолдерса с соавт. [23] отмечается, что с точки зрения конкурентного влияния ионы K^+ и NH_4^+ могут рассматриваться как взаимозаменяемые при условии сохранения постоянства концентрации $Ca + Mg$ в питательном растворе.

Целью данной работы являлось изучение в условиях многофакторного вегетационного эксперимента влияния возрастающих концентраций ионов K^+ и NH_4^+ на поглощение ^{137}Cs растениями ячменя из дерново-подзолистой почвы при раздельном и совместном применении удобрений калия и азота в аммонийной форме.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Ячмень сорта Зазерский 85 (*Hordeum vulgare L., cv Zazersky 85*) выращивали в условиях многофакторного эксперимента на дополнительно загрязненной ^{137}Cs дерново-подзолистой песчаной почве (Новозыбтовский р-н Брянской обл.). В почву вносили калий в дозах 0, 50, 100 и 200 мг К/кг воздушно-сухой почвы и азот в аммонийной форме в дозах 0, 100 и 200 мг NH_4^+ /кг почвы. Вегетационный эксперимент начат через два месяца после добавления в почву радионуклида и минеральных удобрений в виде водных растворов солей KCl и NH_4Cl . В этот период почва дважды подсушивалась до воздушно-сухого состояния и увлажнялась дистиллированной водой до 60% ПВ. Условия подготовки почвы к опыту и ее основные характеристики приведены ранее [3]. Повторность опыта трехкратная.

Семена ячменя предварительно проращивали и высевали в увлажненную до 60% ПВ почву из расчета 12 шт. на сосуд, содержащий 350 г воз-

душно-сухой почвы. Растения выращивали при температуре 18-20°C в течение 14 сут. Потеря воды учитывалась ежедневным взвешиванием сосудов и восполнялась дистиллированной водой. На 15-е сутки растения срезали на высоте 0.5 см от поверхности почвы. Регистрировались (в расчете на один сосуд и средние значения для варианта) число растений, длина проростков L (по максимальной длине листа), сырая m_w , воздушно-сухая m_d и абсолютно-сухая m_{ad} (после высушивания растительного материала при 105°C в течение 6 ч) массы.

В растениях определяли удельную активность ^{137}Cs и концентрацию К, Na, Ca и Mg (в расчете на абсолютно-сухую массу). Активность ^{137}Cs измеряли методом полупроводниковой у-спектрометрии с детектором из сверхчистого германия (ORTEC) и анализатором спектра Canberra 1510, концентрацию химических элементов — атомно-абсорбционным методом на спектрометре Varian SpectrAA250+ после мокрого озоления измельченного растительного материала смесью кислот HNO_3 и $HClO_4$ в соотношении 3:1.

Экспериментальные данные были подвергнуты статистической обработке с использованием Excel 2002 и Статистика 6.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки накопления ^{137}Cs в двухнедельных растениях ячменя использовались следующие параметры: $[Cs]_p$ (кБк/кг) — удельная активность ^{137}Cs в растениях (в расчете на абсолютно-сухую массу); CR_{ex} (кБк · кг⁻¹ / кБк · кг⁻¹) — коэффициент накопления, определяемый как отношение $[Cs]_p$ к содержанию обменной формы ^{137}Cs в почве $[Cs]_{ex}$; CF (кБк · кг⁻¹ / кБк · л⁻¹) — коэффициент корневого поглощения из почвенного раствора, рассчитываемый как отношение $[Cs]_p$ к удельной активности радиоцезия в почвенном растворе $[Cs]_w$, и Q ^{137}Cs (Бк/сосуд) — вынос из почвы растениями, равный произведению удельной активности $[Cs]_p$ и массы растений m_{ad} . Значения этих показателей, усредненные по вариантам опыта, суммированы в табл. 1.

Дерново-подзолистая связанопесчаная почва характеризуется малой обеспеченностью элементами минерального питания растений и низкой емкостью селективной сорбции цезия, что определяет высокие уровни накопления ^{137}Cs в ячмене. Многократное уменьшение поглощения ^{137}Cs ячменем, наблюдающееся при добавлении в почву удобрений калия и азота в аммонийной форме, может быть обусловлено как изменением физико-химического состояния (снижением доступности) ^{137}Cs в почве, так и возрастающей конкурен-

Таблица 1. Параметры перехода ^{137}Cs из дерново-подзолистой почвы в двухнедельные растения ячменя при разной обеспеченности почвы калием и азотом в аммонийной форме, среднее значение \pm стандартное отклонение для трех повторностей

Вариант*	$[\text{Cs}]_p$, кБк/кг	CR_{ex}	л/кг	$Q^{137}\text{Cs}$, Бк/сосуд
ДО/0	136.3 \pm 14.6	10.6 \pm 1.4	139.2	14.8+3.5
Д0/100	71.9 \pm 0.4	6.6 \pm 0.7	51.1	4.4+1.9
Д0/200	102.7 \pm 16.3	10.6 \pm 2.4	41.0	4.7+1.7
Д50/0	92.3 \pm 3.1	9.7 \pm 0.2	108.0	13.1+0.9
Д50/100	59.2 \pm 1.3	7.0 \pm 0.8	36.5	7.6+1.2
Д50/200	75.6 \pm 16.1	9.6 \pm 2.8	45.1	3.6+1.4
Д100/0	29.7 \pm 1.9	3.6 \pm 0.2	35.2	4.4+1.8
Д100/100	43.1 \pm 3.4	6.0 \pm 0.6	34.9	6.5+0.1
Д100/200	46.4 \pm 2.0	5.5 \pm 0.8	26.5	2.1+0.4
Д200/0	8.6 \pm 0.3	14 \pm 0.1	16.7	1.5+0.5
Д200/100	16.6 \pm 3.2	2.3 \pm 0.3	17.4	1.6+0.5
Д200/200	33.4 \pm 1.9	5.2 \pm 0.6	16.3	2.7+0.3

* В этой и следующих таблицах в числителе и знаменателе дроби приведено, соответственно, количество добавленных в почву K^+ и NH_4^+ (мг/кг воздушно-сухой почвы).

** Почвенный раствор извлекался только для одной повторности в каждом варианте опыта.

цией при поглощении ионов корнями растений из почвенного раствора.

Для характеристики биологической доступности ^{137}Cs в почве использовали количество радиоцезия, удерживаемое твердой фазой в обменном состоянии $[\text{Cs}]_{\text{ex}}$, содержание потенциально доступной (извлекаемой при обработке почвы 1М HCl) формы $[\text{Cs}]_{\text{ac}}$ и удельную активность радионуклида в почвенном растворе $[\text{Cs}]_{\text{w}}$. В качестве показателей, характеризующих изменение почвенных условий при добавлении возрастающих доз удобрений калия и аммонийного азота, рассматривались: содержание обменной $[\text{K}]_{\text{ex}}$, доступной $[\text{K}]_{\text{ac}}$ и растворенной $[\text{K}]_{\text{w}}$ форм калия; а также количество обменно-связанного аммония $[\text{NH}_4]_{\text{ex}}$ и его концентрация в почвенном растворе $[\text{NH}_4]_{\text{w}}$. Значения этих показателей для вариантов опыта содержатся в работе [3].

В табл. 2 приведены коэффициенты непараметрической корреляции (Spearman's Rank Order Correlation) между показателями, характеризующими переход ^{137}Cs из почвы в растения, биологическую доступность радионуклида в почве и почвенные условия, изменяющиеся при добавлении удобрений.

Поглощение ^{137}Cs ячменем прямо зависит от содержания в почве обменно-связанной и потен-

циально доступной форм радионуклида и находится в обратной зависимости от количества обменного и доступного K, концентрации K в почвенном растворе, а также калийного потенциала G, при расчете которого учитывалась активность катионов K^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} в почвенном растворе. Между всеми этими показателями существует тесная корреляционная зависимость (табл. 2).

Вместе с тем, совершенно отсутствует значимая корреляция между содержанием ^{137}Cs в растениях и такими тесно связанными между собой параметрами, как удельная активность ^{137}Cs и концентрация NH_4^+ в почвенном растворе, а также

количество NH_4^+ , удерживаемое твердой фазой почвы в обменном состоянии. Отсутствие линейной корреляции может быть обусловлено изменением механизма влияния ионов NH_4^+ на селективность сорбции глинистыми минералами и корневое поглощение ^{137}Cs в исследованном интервале концентраций аммония в почве. Следует заметить, что тесная связь между $[\text{Cs}]_p$ и $[\text{Cs}]_w$ выявляется, когда корреляционный анализ применяется для выборочной обработки экспериментальных данных, полученных в вариантах опыта, где концентрация NH_4^+ в почве сохранялась на одном уровне.

Более детальный анализ экспериментальных данных показывает, что зависимость между $[\text{Cs}]_p$ и $[\text{Cs}]_{\text{ex}}$, с одной стороны, и содержанием в почве обменных катионов $[\text{K}]_{\text{ex}}$ и $[\text{NH}_4]_{\text{ex}}$, с другой, не является линейной и лучше описывается функциями вида $y = ax^b$ или $y = -ae^{-bx}$. Нелинейная регрессионная зависимость в виде отрицательной степенной или экспоненциальной функций между коэффициентом перехода ^{137}Cs из почвы в растения и концентрацией в почве мобильной формы (обменной или доступной) основного элемента питания и химического аналога K отмечалась в работах [6, 13, 25] и используется для прогноза поглощения радиоцезия из почв [14].

Влияние отдельного и совместного внесения в почву калия и аммония на накопление ^{137}Cs растениями ячменя, количество радиоцезия, обменно-связанного твердой фазой, и удельную активность радионуклида в почвенном растворе показано на рис. 1-3. Поскольку ранее была выявлена прямая пропорциональная зависимость между дозой соответствующего удобрения и содержанием в почве обменно-связанных ионов K^+ и NH_4^+ , эффект удобрений представлен в виде зависимости $[\text{Cs}]_p$, $[\text{Cs}]_{\text{ex}}$ и $[\text{Cs}]_w$ от $[\text{K}]_{\text{ex}}$ и $[\text{NH}_4]_{\text{ex}}$.

Добавление в почву как калия, так и азота в аммонийной форме вызывает многократное снижение удельной активности ^{137}Cs в растениях, но

Таблица 2. Матрица коэффициентов непараметрической корреляции между показателями, характеризующими накопление ^{137}Cs растениями ячменя, биологическую доступность ^{137}Cs в почве и почвенные условия, изменяющиеся при добавлении удобрений калия и аммонийного азота

Показатель	$[\text{Cs}]_p$	CR_{ex}	CF	$Q^{137}\text{Cs}$	$[\text{Cs}]_{ex}$	$[\text{Cs}]_{ac}$	$[\text{Cs}]_w$
$[\text{Cs}]_p$	1.0000						
CR_{ex}	0.9790**	1.0000					
CF	0.8671**	0.8252**	1.0000				
$Q^{137}\text{Cs}$	0.7552*	0.7902*	0.7832*	1.0000			
$[\text{Cs}]_{ex}$	0.9161**	0.8671**	0.8671**	0.7692*	1.0000		
$[\text{Cs}]_{ac}$	0.9161**	0.8671**	0.8322**	0.7203*	0.9720**	1.0000	
$[\text{Cs}]_w$	0.3986	0.4266	-0.0280	0.0350	0.3147	0.3566	1.0000
$[\text{K}]_{ex}$	-0.8601**	-0.8601**	-0.8392**	-0.6434*	-0.8811**	-0.8392**	-0.3217
$[\text{K}]_{ac}$	-0.8042*	-0.7832*	-0.9021**	-0.7413*	-0.9091**	-0.8741**	-0.1049
$[\text{K}]_w$	-0.8811**	-0.8601**	-0.9231**	-0.8182*	-0.9371**	-0.8951**	-0.1329
G	-0.9371**	-0.8951**	-0.9021**	-0.7832*	-0.9930**	-0.9650**	-0.3077
$[\text{NH}_4]_{ex}$	0.0699	0.1049	-0.3077	-0.2378	-0.0559	-0.0070	0.8741**
$[\text{NH}_4]_w$	0.2308	0.2448	-0.1538	-0.0280	0.1189	0.1538	0.8601**
ad	-0.3776	-0.3077	-0.1049	0.1329	-0.4056	-0.4126	-0.8042

* Корреляция значима при $p < 0.05$.

** Корреляция значима при $p < 0.001$.

эффект не пропорционален дозе удобрения и более высокие дозы оказываются относительно менее результативными. Выявляется также некоторая пороговая концентрация обменных катионов K^+ и NH_4^+ в почве (лежащая в интервале 1.5-2 и 3-4 мг-экв/кг для K^+ и NH_4^+ соответственно), после превышения которой применение калийных удобрений менее эффективно снижает поглощение ^{137}Cs ячменем, а добавление в почву NH_4^+ ингибирует эффект K^+ и, напротив, приводит к увеличению накопления радиоцезия в растениях (рис. 1).

Таким образом, рост концентрации в почве близких по своим физико-химическим характеристикам ионов K^+ и NH_4^+ оказывает неодинаковое воздействие на накопление ^{137}Cs ячменем, причем эффект зависит не только от дозы соответствующего минерального удобрения, но и от обеспеченности почвы калием и аммонием. Так, например, при использовании максимальной дозы калийного удобрения поглощение ^{137}Cs растениями уменьшалось по сравнению с контролем в 16 раз, если NH_4^+ в почву не вносился, и лишь в 3 раза, когда аммоний был добавлен в количестве 200 мг/кг почвы. При выращивании ячменя в почве с малым содержанием обменного K (варианты K = 0 и K = 50 мг/кг) добавление NH_4^+ в дозе 100 мг/кг вызывало уменьшение накопления ^{137}Cs в 1.5-2 раза, эффект от дозы 200 мг NH_4^+ /кг был меньше, а вне-

сение аммонийного азота в хорошо обеспеченную K почву (варианты K = 100 и K = 200 мг/кг) во всех случаях приводило к увеличению корневого поглощения ^{137}Cs в 1.5-4 раза.

Похожий характер зависимостей, показанных на рис. 1 и 2, позволяет заключить, что ингибирующий эффект удобрений калия и аммонийного азота на поглощение ^{137}Cs растениями ячменя в значительной мере обусловлен уменьшением количества обменно-связанного радиоцезия при росте концентрации K^+ и NH_4^+ в почве. Влияние

возрастающих концентраций K^+ и NH_4^+ на удельную активность ^{137}Cs в почвенном растворе $[\text{Cs}]_w$ проявляется иначе. Количество растворенной формы радиоцезия находится в слабой обратной зависимости от содержания в почве обменного K, но многократно возрастает пропорционально росту концентрации обменно-связанного аммония (рис. 3).

Непосредственно поглощение ^{137}Cs происходит при контакте всасывающих корешков растений с жидкой фазой, однако убывающие концентрации в прикорневой зоне должны быстро пополняться за счет миграции радиоцезия из других частей почвы или десорбции ионов, обратимо адсорбированных твердой фазой. Таким образом, для контроля корневого поглощения большее значение имеет не только концентрация ^{137}Cs в почвенном растворе, но и способность твердой фазы быстро ее восстанавливать за счет других

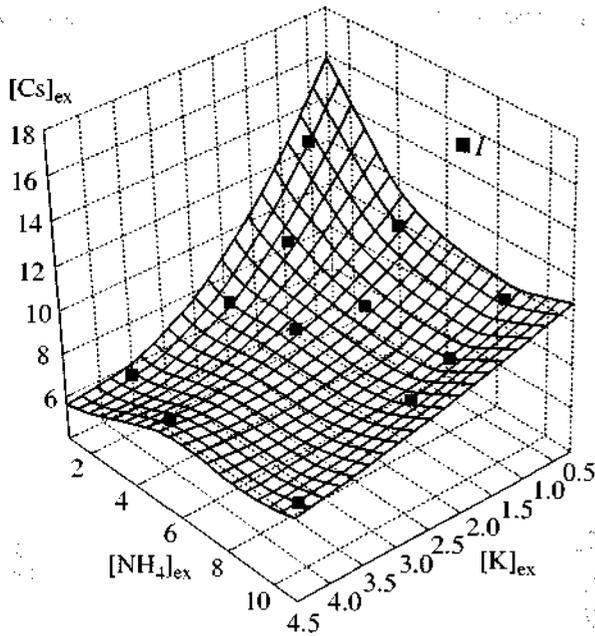


Рис. 1. Зависимость удельной активности ^{137}Cs в растениях ячменя (кБк/кг) от концентрации обменных катионов K^+ и NH_4^+ (мг-экв/кг) в дерново-подзолистой почве. Здесь и на рис. 2 и 3: I - расположение экспериментальных данных относительно поверхности отклика, аппроксимирующей выявление зависимости.

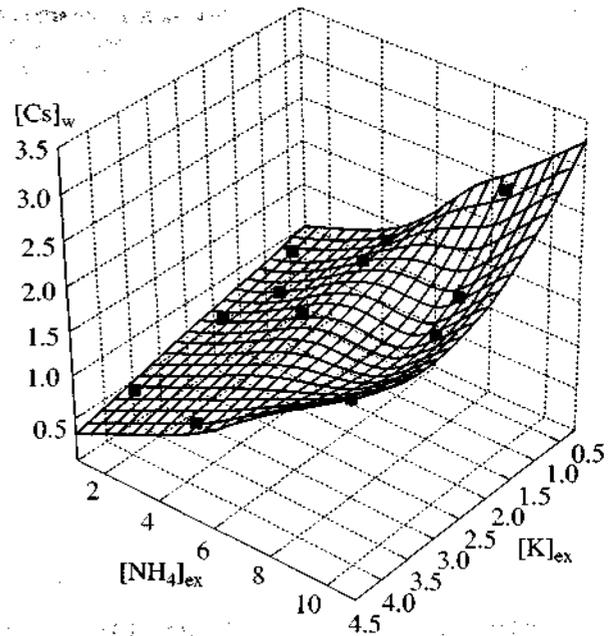


Рис. 2. Зависимость между содержанием в дерново-подзолистой почве обменно-связанного ^{137}Cs (кБк/кг) и обменных K^+ и NH_4^+ (мг-экв/кг).

форм радионуклида в почве, и в первую очередь - обменной формы. Диффузионный поток ионов от почвы к поверхности корней через почвенный раствор, являющийся промежуточной средой между твердой фазой и корнями растений, служит основным лимитирующим фактором поглощения ионов растениями из многих почв [2].

Как уже отмечалось [3], при добавлении калийных удобрений и аммонийного азота в дерново-подзолистую песчаную почву с низким природным содержанием обменного K , происходит коллапс межпакетного пространства кристаллической решетки глинистых минералов слоистой структуры, вызываемый возрастающими концентрациями ионов K^+ и NH_4^+ . В результате коллапса часть ^{137}Cs , обратимо адсорбированного в клиновидных зонах кристаллической решетки частиц глинистых минералов, иммобилизуется и теряет способность обмениваться на другие катионы ППК и переходить в почвенный раствор.

Таким образом, межпакетный коллапс глинистых минералов, приводящий к уменьшению содержания мобильных фракций радиоцезия в почве, может рассматриваться в качестве одного из механизмов ингибирующего влияния возрастающих концентраций K^+ на поглощение ^{137}Cs корнями растений. Ионы NH_4^+ , прямо или косвенно

(вытесняя ионы K^+ с занимаемых ими обменных позиций и повышая концентрацию K^+ в почвенном растворе), также способствуют коллапсу глинистых минералов и фиксации радиоцезия в межпакетном пространстве. При этом, обладая большей, чем K^+ , энергией связи с центрами селективной сорбции, они эффективнее вытесняют ^{137}Cs с обменных позиций в глубине клиновидной зоны кристаллической решетки глинистых минералов и частично блокируют центры селективной сорбции. В результате снижается количество способного к ионному обмену ^{137}Cs , но его концентрация в почвенном растворе возрастает, что подтверждается высокими положительными значениями коэффициентов корреляции между такими параметрами, как $[\text{Cs}]_w$, $[\text{NH}_4]_w$ и $[\text{NH}_4]_{ex}$ (табл. 2). Поэтому эффективность ионов NH_4^+ в уменьшении корневого поглощения ^{137}Cs примерно в 2-3 раза ниже, чем K^+ ионов, а ингибирующий эффект проявляется только когда аммоний вносится в почву с малым содержанием обменных K^+ и NH_4^+ , и возможен коллапс подвергшихся выветриванию частиц глинистых минералов. Если значительная часть глинистых минералов уже подверглась коллапсу, дальнейший рост концентрации NH_4^+ в почве будет приводить лишь к вы-

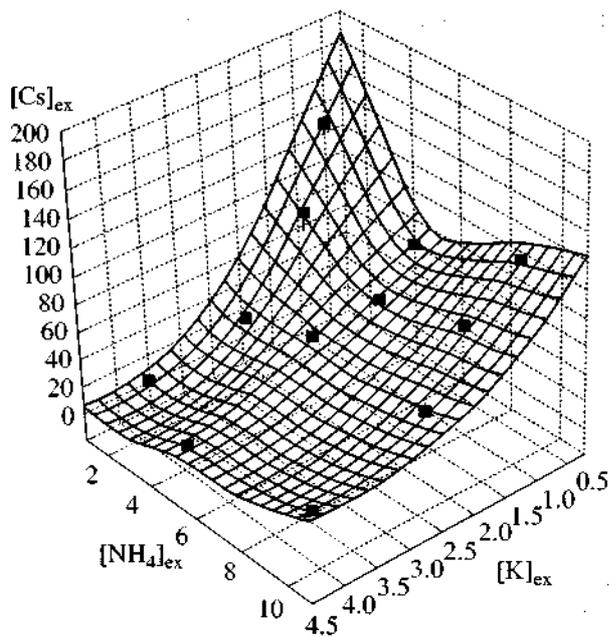


Рис. 3. Влияние содержания обменных K^+ и NH_4^+ (мг-экв/кг) на удельную активность ^{137}Cs в почвенном растворе (кБк/л).

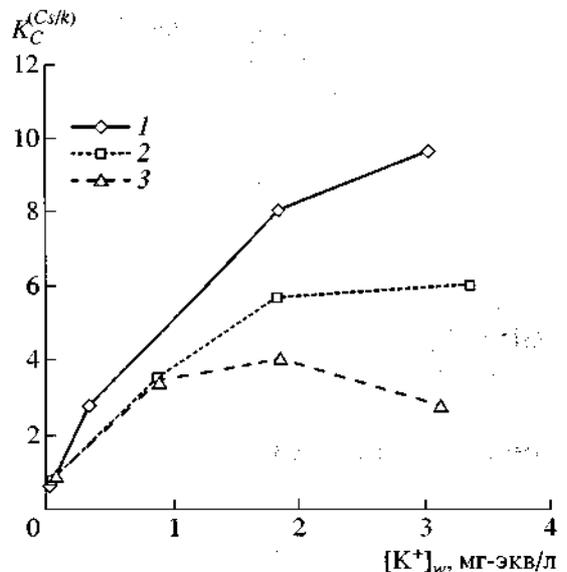


Рис. 4. Изменение коэффициента селективной сорбции ^{137}Cs и его химического аналога - К глинистыми минералами в зависимости от концентрации K^+ в почвенном растворе (мг-экв/л). Условные обозначения здесь и на рис. 5: 1 — контроль; дозы азота: 2 - 100; 3 - 200 мг NH^+/Kg почвы.

теснению ^{137}Cs в почвенный раствор и увеличивать его поглощение корнями растений.

Другой механизм влияния K^+ и NH_4^+ на накопление ^{137}Cs ячменем включает ионное разбавление концентрации радионуклида в жидкой фазе и усиление конкурентного взаимодействия ионов при их поглощении корнями растений из почвенного раствора. Ионное разбавление должно вызывать линейное уменьшение поглощения ^{137}Cs в ответ на увеличение концентрации ионов K^+ и NH_4^+ или их суммарной концентрации в почвенном растворе. Как уже отмечалось, существует тесная обратная корреляционная зависимость между количеством поглощенного растениями ^{137}Cs и концентрацией K^+ в почвенном растворе, тогда как значимая корреляция между $[Cs]_p$ и $[NH_4]_w$ отсутствует (табл. 2).

Цезий не является необходимым для растений элементом, но он может поглощаться с участием тех же систем мембранного транспорта, что и основной элемент минерального питания - К. Благодаря подобию свойств, ионы K^+ и Cs^+ связываются одинаковыми мембранными переносчиками или реакционными центрами в клетках корней, поэтому эффективно конкурируют друг с другом за поглощение корневой системой растений [17], хотя и не ведут себя при этом как абсолютные аналоги [7].

Влияние минеральных удобрений на селективность сорбции ^{137}Cs и его химического аналога К твердой фазой почв и на избирательность поглощения ^{137}Cs и К растениями из почвенного раствора может быть рассмотрено с использованием эффективного коэффициента селективности катионного обмена $^{137}Cs-K$ на адсорбционных центрах частиц почвы, K_c^s , и коэффициента дискриминации ^{137}Cs по отношению к калию при корневом поглощении, $K_D^{Cs/K}$. Указанные параметры определялись исходя из следующих выражений:

$$\frac{[Cs]_{ex}}{[K]_{ex}} = K_c \frac{[Cs]_w}{[K]_w}$$

$$\frac{[Cs]_p}{[K]_p} = K_D \frac{[Cs]_w}{[K]_w}$$

где $[Cs]_{ex}$ и $[K]_{ex}$ - концентрация обменной формы ^{137}Cs (Бк/кг) и К (мг-экв/кг), $[Cs]_w$ и $[K]_w$ - концентрация ^{137}Cs (Бк/л) и К (мэкв/л) в почвенном растворе, $[Cs]_p$ и $[K]_p$ - концентрация ^{137}Cs (Бк/кг) и К (мэкв/кг) в абсолютно-сухой массе двухнедельных растений ячменя.

Зависимость K_c и K_D от концентрации ионов K^+ и NH_4^+ в почвенном растворе (рис. 4 и 5) не является линейной, что указывает на изменение селективности сорбции и избирательности

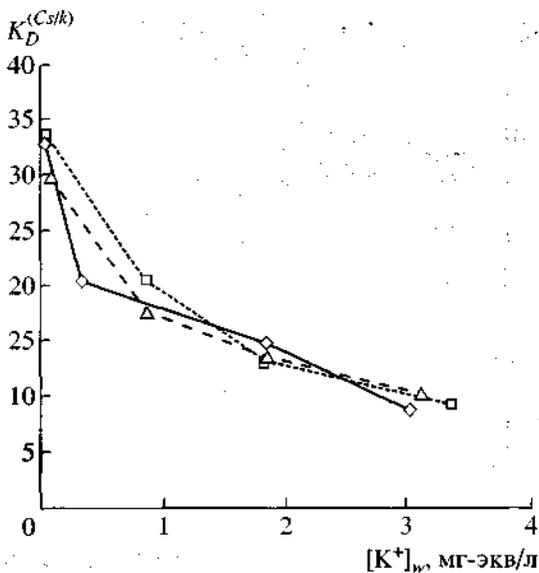


Рис. 5. Влияние концентрации K^+ в почвенном растворе (мг-экв/л) на избирательность поглощения ^{137}Cs и его аналога - K корнями растений.

корневого поглощения ^{137}Cs относительно его химического аналога K в исследованном диапазоне концентраций рассматриваемых ионов и предполагает разные механизмы их влияния на биологическую доступность ^{137}Cs .

Добавление в почву калия увеличивает селективность сорбции ^{137}Cs глинистыми минералами и уменьшает избирательность поглощения растениями ^{137}Cs по отношению к K . Вместе с тем, эффект возрастающих концентраций K^+ на селективность сорбции радионуклида подавляется при высоких концентрациях NH_4^+ (рис. 4), а наиболее резкое изменение избирательности поглощения наблюдается лишь при внесении первой дозы калийного удобрения (50 мг K /кг почвы), после чего $K_D^{Cs/k}$ монотонно убывает с меньшей скоростью (рис. 5). При добавлении в почву аммонийного азота, напротив, рост концентрации NH_4^+ в почвенном растворе почти не сказывается на избирательности поглощения ^{137}Cs и K растениями (рис. 5), тогда как селективность сорбции ^{137}Cs резко уменьшается, если аммоний вносится в хорошо обеспеченную K почву (рис. 4).

Снижение ингибирующего эффекта на поглощение радиоцезия растениями после превышения некоторой пороговой концентрации K^+ в среде произрастания иногда интерпретируется как смена доминирующей системы трансмембранного переноса K [17, 18, 21, 25, 26]. Подобие между поглощением K^+ и Cs^+ предполагает, что два элемента используют общие механизмы переноса

через биологические мембраны в клетках корней. Существуют, по крайней мере, две системы трансмембранного переноса ионов K^+ (и соответственно Cs^+): высокоспецифичная в отношении K^+ (но характеризующаяся малой селективностью в отношении ионов K^+ и Cs^+) система H^+/K^+ -копереносчиков, играющая доминирующую роль при низких концентрациях K в среде произрастания; и менее специфичная в отношении K^+ (но отличающаяся более высокой степенью дискриминации Cs^+) система туннельного переноса, работающая при высоких внешних концентрациях K [17, 25]. Переход от одного типа системы K -транспорта к другому в ответ на рост внешней концентрации K^+ определяет пороговую концентрацию в почве, выше которой дальнейшее увеличение обеспеченности K уже не приводит к существенному снижению поглощения ^{137}Cs растениями.

В качестве критической чаще рассматривается концентрация 1 ммоль K в растворе [8, 16, 17, 19, 23, 24], хотя приводились и иные значения, в том числе выраженные в другой форме: 10-12 мг/л [25], 0.2 мг-экв обменного $K/100$ г почвы (или 8 мг доступного $\text{K}_2\text{O}/100$ г почвы) [6]. В качестве общего подхода, в работе [12] высказано предположение, что на минеральных почвах применение калийных удобрений в целях снижения накопления радиоцезия культурами будет эффективно и выгодно, если содержание обменного K в почве не превышает 20 мг/кг. Согласно нашим экспериментальным данным, пороговая концентрация составляет около 2 мг-экв/кг (80 мг/кг) обменного K . Следует заметить, что примерно такое же значение - 60-80 мг/кг - может быть получено и при рассмотрении влияния минеральных удобрений на содержание в почве обменного ^{137}Cs (рис. 2).

Эффект влияния удобрений на поглощение ^{137}Cs ячменем может быть не только прямым, но и косвенным - через изменение условий произрастания растений. Абсолютно-сухая масса растений и усредненные по вариантам концентрации K , Na , Ca и Mg (в расчете на абсолютно-сухую массу) представлены в табл. 3.

Между такими показателями, как длина проростков L (определяемая по максимально длинному листу), сырая m_w , воздушно-сухая m_d и абсолютно-сухая m_{ad} масса, характеризующими развитие растений при выращивании ячменя в почве с разным уровнем минеральных удобрений, существует корреляционная зависимость ($r > 0.95$, $p < 0.05$), поэтому значения остальных показателей в таблице не приводятся.

Реакция растений на добавление в почву K была положительной, но не пропорциональной дозе удобрения: относительная эффективность дозы

Таблица 3. Абсолютно-сухая масса растений (m_{ad} , г) и концентрация элементов (г/кг) в двухнедельных растениях ячменя, среднее значение \pm стандартное отклонение для трех повторностей

Вариант	m_{ad}	$[K]_p$	$[Na]_p$	$[Ca]_p$	$[Mg]_p$
Д0/0	0.11 + 0.01	35.1 \pm 4.3	6.6 \pm 0.6	10.7 \pm 1.8	4.2 \pm 0.2
Д 0/100	0.06 + 0.03	29.6 \pm 6.4	6.2 \pm 1.2	14.9 \pm 1.8	3.8 \pm 0.2
Д 0/200	0.06 + 0.03	28.6 \pm 4.1	13.9 \pm 2.3	16.8 \pm 1.4	3.7 \pm 0.1
Д50/0	0.18 + 0.03	46.7 \pm 1.4	2.8 \pm 0.8	13.2 \pm 2.9	4.7 \pm 0.5
Д 50/100	0.13 + 0.02	46.1 \pm 3.2	2.7 \pm 0.4	11.4 \pm 1.4	3.5 \pm 0.3
Д 50/200	0.07 + 0.01	57.9 \pm 5.0	5.8 \pm 0.4	16.4 \pm 1.5	3.5 \pm 0.2
Д 100/0	0.18 + 0.01	51.8 \pm 1.9	2.1 \pm 0.2	9.3 \pm 1.2	3.3 \pm 0.1
Д 100/100	0.13 + 0.01	46.0 \pm 1.3	2.1 \pm 0.2	7.4 \pm 1.2	3.0 \pm 0.4
Д 100/200	0.05 + 0.00	42.0 \pm 1.7	5.7 \pm 1.1	11.3 \pm 1.2	3.1 \pm 0.4
Д 200/0	0.20 + 0.02	59.4 \pm 4.9	1.2 \pm 0.1	8.4 \pm 0.4	3.1 \pm 0.2
Д 200/100	0.09 + 0.03	53.4 \pm 1.4	1.3 \pm 0.1	6.8 \pm 0.5	2.8 \pm 0.1
Д 200/200	0.08 + 0.00	52.3 \pm 2.6	4.1 \pm 0.5	6.8 \pm 0.1	2.8 \pm 0.1

50 мг К/кг почвы выше, чем двух других. Высокие концентрации NH_4^+ в почве ингибировали положительный эффект К и он почти не проявлялся, когда аммоний был добавлен в количестве 200 мг NH_4^+ /кг почвы. На внесение в почву азота в аммонийной форме растения реагировали негативно, причем различия между растениями, выращенными без добавления и с добавлением NH_4^+ , были больше, если в почву вносился калий. Аммоний и калий добавляли в почву в виде водных растворов солей NH_4Cl и KCl , поэтому угнетение растений ячменя, возможно, является не результатом прямого действия ионов NH_4^+ , а обусловлено высокими концентрациями в почве Cl^- ионов.

Так как реакция ячменя на внесение в почву калия и аммония отличалась, была сделана попытка установить характер зависимости между биомассой растений и количеством поглощенного ^{137}Cs . Значимой корреляции между такими параметрами как $[Cs]_p$, CR_{ex} , CF и вынос ^{137}Cs из почвы растениями Q , с одной стороны, и масса растений ячменя m_{ad} , с другой, выявлено не было (табл. 2), поэтому сделать однозначный вывод об эффекте "биологического разбавления" концентрации ^{137}Cs в растениях в нашем случае не представляется возможным.

Добавление в почву К увеличивало его содержание в растениях, тогда как концентрация Na, Ca и Mg при этом снижалась. Во всех случаях зависимость между дозой удобрения и содержанием химических элементов была нелинейной. Влияние NH_4^+ на поглощение К, Na, Ca и Mg было менее выраженным. Принципиальное отличие эффекта минеральных удобрений на поглощение

ячменем ^{137}Cs и макроэлементов проявляется в кратности варьирования (отношение максимальных и минимальных значений) удельной активности ^{137}Cs и концентрации К, Na, Ca и Mg в растениях в условиях опыта. Концентрация в растительном организме биогенных химических элементов подвержена метаболическому регулированию, тогда как Cs не является необходимым для развития растений элементом и такому регулированию не подвергается (или подвергается в существенно меньшей степени). Поэтому при добавлении в почву калия и аммонийного азота концентрация К, Ca и Mg в растениях изменялась в 1.7-2.5 раза, тогда как интервал изменений удельной активности ^{137}Cs примерно на порядок шире.

Обладая высокой степенью физико-химического подобия, Cs и К не являются эквивалентными в физиологическом отношении и поэтому не ведут себя как абсолютные аналоги в системе почва-растение. Это проявляется в том, что, несмотря на большой размах варьирования содержания в почве мобильных форм основного элемента минерального питания К, его концентрация в растениях изменяется в довольно узком интервале значений. Накопление ^{137}Cs растениями, напротив, в значительно большей степени подвержено влиянию различных факторов, чем значения параметров, часто используемых для характеристики биологической доступности радионуклида в почве. Так, кратность варьирования в условиях опыта содержания ^{137}Cs в растениях достигала 16 раз, удельная активность почвенного раствора изменялась в 5 раз, а количество ^{137}Cs в обменном состоянии - в 2.2 раза, тогда как для К аналогичные значения составляют, соответственно, 2, 10 и 11 раз. Интервал изменения значений таких параметров, как коэффициент накопления

для обменной формы CR_{ex} и коэффициент поглощения ^{137}Cs растениями из почвенного раствора CF примерно в 2 раза уже.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Удельная активность ^{137}Cs в двухнедельных растениях ячменя многократно уменьшается при добавлении в дерново-подзолистую песчаную почву удобрений калия и аммонийного азота, но эффект не пропорционален дозе удобрения и зависит от обеспеченности почвы обменными K^+ и NH_4^+ . Существует также пороговая концентрация обменных катионов, после превышения которой добавление K в целях снижения накопления ^{137}Cs растениями менее эффективно, а дальнейший рост концентрации NH_4^+ в почве подавляет эффект K и, напротив, увеличивает переход ^{137}Cs из почвы в растения.

Ингибирующий эффект K достигается как за счет вызываемого возрастающими концентрациями K^+ коллапса межпакетного пространства кристаллической решетки глинистых минералов, приводящего к снижению содержания в почве обменно-связанного ^{137}Cs , так и ионного разбавления концентрации ^{137}Cs и конкуренции при поглощении радиоцезия и его химического аналога - K из почвенного раствора корнями растений.

Добавление калийных удобрений в почву, хорошо обеспеченную обменным K , оказывает меньший эффект на уменьшение поглощения ^{137}Cs растениями. В этом случае значительная часть глинистых минералов уже подверглась коллапсу и возможность дополнительной фиксации ^{137}Cs в межпакетном пространстве лимитирована, а, благодаря высоким концентрациям K^+ в почвенном растворе, при поглощении корнями растений доминирует система трансмембранного переноса, менее специфичная в отношении K , но характеризующаяся высокой степенью дискриминации ^{137}Cs .

Влияние ионов NH_4^+ на снижение поглощения ^{137}Cs растениями выражено примерно в 2-3 раза слабее, чем ионов K^+ , и проявляется лишь при добавлении аммония в почву с невысоким содержанием обменных K^+ и NH_4^+ , в которой сохраняется возможность коллапса глинистых минералов слоистой структуры и дополнительной фиксации ^{137}Cs в межпакетном пространстве.

Рост концентрации NH_4^+ в почве не влияет на избирательность поглощения ^{137}Cs и K растениями из почвенного раствора, но снижает селективность сорбции радиоцезия глинистыми минерала-

ми, так как ионы NH_4^+ эффективнее вытесняют ионы ^{137}Cs с занимаемых ими обменных позиций в почвенный раствор и частично блокируют селективные центры сорбции. Поэтому при добавлении аммония в хорошо обеспеченную обменным K почву, где значительная часть глинистых минералов уже подверглась коллапсу, корневое поглощение ^{137}Cs возрастает.

Установление пороговых концентраций имеет принципиальное значение с точки зрения радиологической и экономической эффективности использования калийных удобрений в целях снижения радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной продукции и сбалансированного применения разных форм минерального азота в составе комплексного удобрения. Наиболее рациональным в этом случае является применение удобрений K в комбинации с уменьшенным внесением N , когда N не является лимитирующим фактором развития растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексахин Р.М., Моисеев И.Т., Тихомиров Ф.А.* Агрохимия ^{137}Cs и его накопление сельскохозяйственными растениями // Агрохимия. 1977. № 2. С. 129-142.
2. *Барбер С.А.* Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход / Пер. с англ. Ю.Я. Мазеля: Под ред. и с предисл. Э.Е. Хавкина. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
3. *Круглов С.В., Суслина Л.Г., Анисимов В.С., Алексахин Р.М.* Влияние возрастающих концентраций K^+ и NH_4^+ на сорбцию радионуклида дерново-подзолистой песчаной почвой и черноземом выщелоченным // Почвоведение. 2005. № 2. С. 161-171.
4. *Моисеев И.Т., Тихомиров Ф.А., Перух Л.А.* К вопросу о влиянии минеральных удобрений на доступность ^{137}Cs из почвы сельскохозяйственным растениям // Агрохимия. 1986. № 2. С. 89-92.
5. *Юдинцева Е.В., Левина Э.М.* О роли калия в доступности цезия-137 растениям // Агрохимия. 1982. № 4. С. 75-81.
6. *Bno M., Steffens W., Fuhr F., Pfeffer K.-H.* Uptake of $^{134/137}Cs$ function of several soil parameters of three soil types in Upper Swabia and North Rhine-Westphalia (FRG) // J. Environ. Radioactivity. 1993. V. 19. P. 25-39.
7. *Broadley M.R., Willey N.J., Philippidis C, Dennis E.R.* A comparison of caesium uptake kinetics in eight species of grass // J. Environ. Radioactivity. 1999. V. 46. P. 225-236.
8. *Buysse J., Van den Brande K., Merckx R.* Genotypic differences in the uptake and distribution of radiocaesium in plants // Plant and Soil. 1996. V. 178. P. 265-271.
9. *Cline J.F., Hungate F.P.* Accumulation of potassium, cesium-137 and rubidium-86 in bean plants grown in nutrient solutions // Plant Physiology. 1960. V. 35. P. 826-829.

10. *Cremers A., Elsen A., De Peter P., Maes A.* Quantitative analysis of radiocaesium retention in soils // *Nature*. 1988. V. 335. № 6187. P. 247-249.
11. *Handley R., Overstreet R.* Effects of various cations upon absorption of carrier-free caesium // *Plant Physiol.* 1961. V. 36. P. 66-69.
12. *Nisbet A.F.* Effectiveness of soil-based countermeasures: six month to one year after contamination of five diverse soil types with ^{137}Cs and ^{90}Sr . Contract report, MAFF, UK, NRPB-M546. 1995. National Radiological Protection Board, Chilton, UK.
13. *Nisbet A.F., Wodman R.F.M., Hayiock R.J.E.* Recommended soil-to-plant transfer factors for radiocaesium and radiostrontium for use in arable systems / NRPB-R304, National Radiological Protection Board, Chilton, UK. 1999. Цитируется по [25].
14. *Sanchez A.L., Wright S.M., Smolders E., Naylor C, Stevens P.A., Kennedy V.H., Dodd B.A., Singleton D.L., Barnett C.L.* High plant uptake of radiocaesium from organic soils due to Cs mobility and low soil K content // *Environmental Science and Technology*. 1999. V. 33. P. 2752-2757.
15. *Schultz R.K.* Soil chemistry of radionuclides // *Health Phys.* 1965. V. 11. P. 1317-1324.
16. *Shaw G., Bell J.N.B.* Competitive effects of potassium and ammonium on caesium uptake kinetics in wheat // *J. Environ. Radioactivity*. 1991. V. 13. P. 283-296.
17. *Shaw G., Bell, J.N.B.* The kinetics of caesium adsorption by roots of winter wheat and the possible consequences for the derivation of soil-to-plant transfer factors for radiocaesium // *J. Environ. Radioactivity*. 1989. V. 10. P. 213-231.
18. *Shaw G.* Blockade by fertilisers of caesium and strontium uptake into crops: effects on the root uptake process // *Sci. Total Environ.* 1993. V. 137. P. 119-133.
19. *Shaw G., Hewamanna R., Lillywhite J., Bell J.N.B.* Radiocaesium uptake and translocation in wheat with reference to the transfer factor concept and ion competition effects // *J. Environ. Radioactivity*. 1992. V. 16. P. 167-180.
20. *Smolders E., Shaw G.* Changes in radiocaesium uptake and distribution in wheat during plant development: a solution culture study // *Plant and Soil*. 1995. V. 176. P. 1-6.
21. *Smolders E., Kieboom L., Buysse J., Merckx R.* ^{137}Cs uptake in spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Tonic) at varying K supply. I. The effect in solution culture // *Plant Soil*. 1996. V. 181. P. 205-209.
22. *Smolders E., Kiebooms L., Buysse J., Merckx R.* ^{137}Cs uptake in spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Tonic) at varying K supply. II. A potted experiment // *Plant and Soil*. 1996. V. 181. P. 211-220.
23. *Smolders E., Sweeck L., Merckx R., Cremers A.* Cationic interaction in radiocaesium uptake from solution by spinach // *J. Environ. Radioactivity*. 1997. V. 34(2). P. 161-170.
24. *Smolders E., Van den Brande K., Merckx R.* Concentrations of ^{137}Cs and K in soil solution predict the plant availability of ^{137}Cs in soils // *Environ. Sci. Technol.* 1997. V. 31. P. 3432-3438.
25. *Zhu Y.-G.* Effect of external potassium (K) supply on the uptake of ^{137}Cs by spring wheat (*Triticum aestivum* cv. Tonic): a large-scale hydroponics study // *J. Environ. Radioactivity*. 2001. V. 55. P. 303-314.
26. *Zhu Y.-G., Smolders E.* Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application // *Journal of Experimental Botany*. 2000. V. 51. P. 1635-1645.

Mechanism of the Effect of K^+ and NH_4^+ Ions on ^{137}Cs Accumulation by Two-Week-Old Barley Plants from Soddy-Podzolic Soils

S. V. Kruglov, L. G. Suslina, V. S. Anisimov, and R. M. Aleksakhin

Two-week-old barley plants (*Hordeum vulgare* L., cv Zazerskii 85) grown on a ^{137}Cs -contaminated sandy soddy-podzolic soil with the application of potassium at four rates and ammonium nitrogen at three rates showed that mineral fertilizers decreased the accumulation of ^{137}Cs by plants. However, the effect was not proportional to the fertilizer rate and depended on the soil supply with exchangeable K^+ and NH_4^+ . When the threshold concentrations of exchangeable cations (2-2.5 and 3-1 meq/kg for K^+ and NH_4^+ , respectively) were exceeded, the addition of potassium for decreasing the ^{137}Cs accumulation by the plants was less efficient, and a further increase in the NH_4^+ concentration in the soil inhibited the potassium effect and increased the ^{137}Cs uptake by the plant roots. The mechanism of the effect of increasing the K^+ and NH_4^+ concentrations on the ^{137}Cs uptake by the roots is discussed.