

NEW FORMS OF LIQUID NITROGEN-CONTAINING FERTILIZERS IN THE CULTIVATION OF AGRICULTURAL CROPS IN BELARUS

G. V. Pirogovskaya

Summary

The article presents data on the effectiveness of liquid nitrogen-sulfur fertilizers (1999–2000, 2010–2011, 2016, 2018–2020) on sod-podzolic soils of different granulometric composition (light loamy, loose-sanded) in Gomel, Minsk and Grodno regions in the cultivation of agricultural and vegetable crops. It is shown that the use of liquid nitrogen-sulfur fertilizers, for crops demanding sulfur, provides an increase in yield, while improving the quality of products.

Поступила 05.05.2022

УДК:632.118.3:633

[https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1\(68\)-64-72](https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1(68)-64-72)

ОЦЕНКА ДОСТУПНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ ^{137}Cs И ^{90}Sr СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМ РАСТЕНИЯМ В ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Ю. В. Путятин

*Институт почвоведения и агрохимии,
г. Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

Путь радионуклидов до организма человека может быть разным, но наиболее вероятной является цепь «почва–растение–животное–человек». Подвижность радионуклидов в биоценозах зависит от их физико-химических свойств, условий внешней среды и биологических особенностей растений и животных. Формы нахождения радионуклидов в объектах окружающей среды являются одним из определяющих факторов их поведения в экосистемах. Степень опасности любых радионуклидов зависит не только от их общего содержания, но и от их подвижности в почве. От форм нахождения радионуклидов в почве зависит их миграция по почвенному профилю, а также размеры вымывания с осадками, интенсивность поступления в растения. Чем прочнее связаны радионуклиды с почвой, тем меньше их миграция, в том числе и поступление в растения и далее в продукцию животноводства и в организм человека. Эти сведения необходимо учитывать для разработки мер по реабилитации загрязненных радионуклидами территорий [1–3].

Как показывают многочисленные исследования, содержание мобильных

форм ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах не различалось в течение двух-трех лет после аварии. Пик содержания водорастворимых и обменных форм радиоцезия достигал 40 % (суммарно) в 1988–1989 гг., и затем их содержание снизилось до 5–10 % за счет сорбции почвенными минералами. Содержание мобильных форм ^{90}Sr нарастало от 5–10 % в первые два года после выпадений, до 50–70 % к 1990 г. В настоящее время, в радиационностабильных условиях, доля фиксированной фракции ^{137}Cs составляет 83–98 % от валового содержания в почве, содержание ^{90}Sr в прочносвязанной форме не превышает 7–12 %. Процессы трансформации форм радионуклидов в почвах различаются, что связано с механизмом поглощения радионуклидов твердой фазой: вхождением в кристаллическую решетку глинистых минералов, ионным обменом, химическим соосаждением и т. п. [1–4]. Выветривание и выщелачивание радионуклидов из топливных частиц выпадений под влиянием природных процессов привело к тому, что ведущая роль физико-химических форм выпадений как фактора, обуславливающего радиоэкологическую обстановку, уменьшается, а со временем роль почвенно-климатических факторов увеличивается [5].

После аварии на ЧАЭС с 1989 г. в Беларуси начался самый продолжительный период потепления за все время инструментальных наблюдений за температурой воздуха на протяжении последних почти 130 лет. За период с 1989 по 2015 г. среднегодовая температура воздуха в Беларуси на 1,3 °C превысила климатическую норму, принятую Всемирной метеорологической организацией (ВМО). В 2015 г. средняя годовая температура воздуха составила +8,5 °C, что на 2,7 °C выше климатической нормы и оказалась самой высокой за весь период инструментальных наблюдений, начиная с 1881 г. В результате потепления произошло изменение границ агроклиматических зон (областей): Северная агроклиматическая область распалась, а на юге Белорусского Полесья образовалась новая, более теплая агроклиматическая область. Исследования показывают, что тенденции этих изменений в ближайшие десятилетия сохраняться [6].

В настоящее время в Беларуси агроклиматические зоны сдвинулись более чем на 200 км на север и новая агроклиматическая зона с суммой температур 2600–2800 с эффективными температурами свыше 10 °C появилась на юге республики. Новая климатическая зона распространилась на большую часть территории загрязнения радионуклидами Чернобыльских выпадений, где ведется сельскохозяйственное производство и также на зону отчуждения. Согласно экспертной оценки Института природопользования НАН Беларуси и Гидрометеорологической службы Республики Беларусь к 2030 г. эта новая агроклиматическая зона распространится полностью на земли, загрязненные радионуклидами, где преобладают минеральные почвы легкого гранулометрического состава и осушенные торфяные почвы [6, 7].

Понимание того, как агроэкосистемы территорий, загрязненных радионуклидами, реагируют на изменение климата, является чрезвычайно важным для продовольственной и экологической безопасности и оптимизации защитных мероприятий.

Цель исследования заключалась в определении форм нахождения радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в дерново-подзолистых почвах различного гранулометрического состава и влияния климатических условий вегетационного периода на переход ^{90}Sr из почвы в растения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования по оценке подвижности проводили с образцами дерново-подзолистых легкосуглинистой, супесчаной и песчаной почв, отобранных с пахотных земель в 2021 г. (таб. 1, 2).

В исследованиях использовали метод последовательной экстракции форм нахождения радионуклидов, предложенный Ф. И. Павлоцкой и получивший дальнейшее развитие в работах большой группы радиоэкологов [8–11]. Метод включает в себя выделение пяти фракций радионуклидов, характеризующихся разной прочностью и природой связи с твердой фазой почвы.

Подвижные и кислоторастворимые формы радионуклидов цезия-137 и стронция-90 определяли последовательной обработкой почв дистиллированной H_2O (водорастворимая форма), 1 М CH_3COONH_4 , pH = 4,8 (обменная и легкорастворимая форма), 1М HCl (подвижная форма) и 6 М HCl (кислоторастворимая форма). Соотношение твердой и жидкой фаз составляло 1:5. Содержание каждого радионуклида в почвенных фракциях рассчитывали в процентах от его суммарного содержания в навеске почвы. [12].

Маршрутные исследования проводились путем отбора проб растительных образцов в фазы технической спелости и сопряженных почвенных образцов в производственных посевах Хойникского и Брагинского районов Гомельской области методом учетных площадок на дерново-подзолистых супесчаных почвах в период с 2008 по 2019 г. Почвенные образцы отбирали методом конверта, т. е. один смешанный образец состоял из 5 индивидуальных проб, взятых на глубину перегнойного горизонта с площади 1 м² с помощью почвенного тростевого бура. Масса воздушно-сухого образца почвы для проведения анализа на содержание радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr составляла 1,5 кг. Из точечных растительных проб массой 0,6–1,0 кг формировали объединенную пробу. Все данные по удельной активности растительных образцов (Бк/кг) пересчитывались на стандартную влажность: для зерна – 14 %, сена – 16 % и зеленой массы – 82 %. *Выборка (n) для каждой исследуемой сельскохозяйственной культуры составляла не менее 30.*

Измерения удельной активности ¹³⁷Cs в растительных и почвенных образцах проводили в соответствии с методами испытаний МВИ.МН 1181-2011. Методика выполнения измерений объемной и удельной активности ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs и ⁴⁰K на гамма-бета-спектрометре типа МКС-АТ1315, объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁴⁰K на гамма-спектрометре типа EL1309 (МКГ-1309) в пищевых продуктах, питьевой воде, почве, сельскохозяйственном сырье и кормах, продукции лесного хозяйства, других объектах окружающей среды. Линия гамма-излучения ¹³⁷Cs соответствовала 661,66 кэВ. Ошибка измерений не превышала 15 %.

Содержание ⁹⁰Sr оценивали по дочернему продукту распада ⁹⁰Y после проведения радиохимической очистки от мешающих радионуклидов оксалатным методом с последующим измерением на пластиковом сцинтилляционном детекторе спектрометра-радиометра «Прогресс-БГ». Выход носителя иттрия определяли гравиметрическим методом, выход носителя стронция – на атомно-абсорбционном спектрофотометре [13]. Статистическая погрешность измерений не превышала 20 %.

Для оценки условий вегетационного периода использовали гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК), который показывает уровень влагообеспеченности

территории и представляет собой отношение суммы осадков в миллиметрах за период с температурами выше +10 °С к сумме температур в градусах Цельсия (°С) за то же время. [14]. По данным экспертов Центра климатических исследований Института природопользования НАН Беларуси по гидротермическому коэффициенту увлажнения (ГТК) характеризуют следующие условия увлажнения территории: больше 1,6 – влажные, от 1,6 до 1,3 – оптимальные, от 1,3 до 1,0 – слабозасушливые, от 1,0 до 0,7 – засушливые, от 0,7 до 0,4 – очень засушливые, от 0,4 до 0,2 – сухие, от 0,2 и меньше – очень сухие. [6, 7].

Методы математической обработки результатов. Коэффициенты перехода (Кп) радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr из почвы в растения рассчитывались по формуле:

$$K_{п} = \frac{A_p}{A_s}, \quad (1)$$

где: A_p – удельная активность радионуклида в растении (Бк кг⁻¹);

A_s – плотность загрязнения почвы радионуклидом (кБк м⁻²).

Для математической обработки экспериментального материала использовали регрессионный, корреляционный и методы описательной статистики с использованием программного обеспечения MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По мнению Д. В. Манахова и др., для оценки доступности радионуклидов растениям следует использовать сумму водорастворимой и обменной (легкорастворимой) фракций по методике Павлоцкой. Для оценки геохимической подвижности радионуклидов следует использовать сумму подвижных фракций (водорастворимой, обменной (легкорастворимой) и собственно подвижной) [12]. Исследователи отмечают, что подвижная фракция ^{137}Cs включает в себя как собственно обменные, так и специфически сорбированные формы, содержащая радионуклид, ассоциированный с оксидами Mn, легко окисляемыми органическими соединениями и частично с аморфными оксидами Fe и Al [18]. В состав кислоторастворимой фракции ^{137}Cs входят аморфные и кристаллические оксиды Fe и Al, а также продукты взаимодействия гумусовых веществ с устойчивыми полуторными оксидами и глинистыми минералами [19]. Радиоцезий сосредоточенный в остатке, остающемся после серии экстракций находится в межпакетном пространстве кристаллических решеток вторичных глинистых минералов (преимущественно со структурой иллитов) [20].

Эксперименты показали, что в исследуемых почвах радионуклиды цезия и стронция находятся в разных формах и соотношениях (табл. 1, 2). Результаты исследований, полученные при изучении форм нахождения ^{137}Cs показали, что количественное распределение радиоцезия по формам нахождения зависит от гранулометрического состава почвы. Основная доля ^{137}Cs находится в прочно связанной форме и, вероятнее всего, в кристаллической решетке глинистых минералов. Доля легкодоступных форм радиоцезия (водорастворимая + обменная) для растений составляет в дерново-подзолистых песчаных почвах 10,9 %, в супесчаных – 5,1 % и в суглинистой – 3,9 % от валового содержания в почве. В настоящее время прочная фиксация радиоцезия минеральными почвами и определяет низкие переходы данного радионуклида в продукцию растениеводства (табл. 1).

Таблица 1

Формы ^{137}Cs в образцах пахотного горизонта (0–20 см) дерново-подзолистых почв различного гранулометрического состава (2021 г.)

Дерново-подзолистая почва	Форма				
	водораст-воримая	обменная	подвижная	кислотора-створимая	остаток
	Бк/кг почвы				
Песчаная	0,7 ± 0,3	119 ± 8,3	140 ± 8,1	820 ± 49,2	21,2 ± 1,5
Доля от валового содержания, %	0,06	10,81	12,72	74,48	1,93
Супесчаная	0,4 ± 0,2	23,6 ± 1,6	25,8 ± 1,8	408 ± 24,5	9,5 ± 0,8
Доля от валового содержания, %	0,09	5,05	5,53	87,38	2,03
Суглинистая	11 ± 0,9	109 ± 6,5	228 ± 13,7	2620 ± 157,2	104 ± 7,3
Доля от валового содержания, %	0,36	3,55	7,42	85,29	3,39

В противоположность радиоцезию, среди подвижных форм стронция в почвах преобладают обменные и легкорастворимые формы радионуклида. Как известно, стронций поглощается глинистыми минералами по механизму ионного обмена в межслоевом пространстве, постепенно замещая обменные катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+}), до момента установления равновесия [15–17].

В наших экспериментах, доля доступных форм радиостронция (водорастворимая + обменная + подвижная) для растений составляет в дерново-подзолистых песчаных почвах 87,3 %, в супесчаных 81,2 % и в суглинистой 92,0 % от валового содержания в почве и доля легкодоступных (водорастворимая + обменная) составляет 67,2 %, 59,5 % и 75,5 % соответственно (табл. 2). Данный факт определяет высокие переходы радиостронция в продукцию растениеводства [23].

Таблица 2

Формы ^{90}Sr в образцах пахотного горизонта (0–20 см) дерново-подзолистых почв различного гранулометрического состава (2021 г.)

Дерново-подзолистая почва	Форма				
	водораст-воримая	обменная	подвижная	кислотора-створимая	остаток
	Бк/кг почвы				
Песчаная	8,78 ± 3,16	48,23 ± 8,68	17,09 ± 7,01	8,68 ± 5,03	2,07 ± 1,28
Доля от валового содержания, %	10,35	56,84	20,14	10,23	2,44
Супесчаная	7,41 ± 4,37	20,42 ± 5,31	10,11 ± 4,14	7,76 ± 5,51	1,05 ± 0,86
Доля от валового содержания, %	15,85	43,68	21,63	16,60	2,25
Суглинистая	8,98 ± 4,85	65,30 ± 11,1	16,23 ± 5,68	4,14 ± 2,15	3,69 ± 2,10
Доля от валового содержания, %	9,13	66,40	16,50	4,21	3,75

Транспорт Са, химического аналога Sr, осуществляется преимущественно в апопласте путем свободной диффузии, ускоряемой транспирацией, в объеме клеточной стенки, где часть ионов находится в растворе, идентичном внешнему почвенному раствору [21]. Sr и Са переходят в корень по одинаковым путям, причем при переходе в симпласт доля неспецифической ионной утечки существенно превалирует над селективными каналами и существенную роль играет связывание ^{90}Sr (аналогично Са) в цитоплазматической части симпласта [22].

В связи с тем, что транспорт стронция в растения ускоряется транспирацией, нами проведена сравнительная оценка влияния климатических условий на перенос ^{90}Sr из почвы в растения с использованием гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) в качестве интегрального показателя влагообеспеченности, отражающего соотношение температуры и осадков в течение вегетационного периода. Полевые исследования, проведенные в период с 2008 по 2019 гг., показывают, что в более теплые и сухие вегетационные периоды с высокой степенью вероятности можно ожидать значительного увеличения переноса стронция из почвы в растения (табл. 3).

Вегетационные периоды в годы отбора проб для люцерны характеризовались как слабозасушливые и засушливые, для кукурузы – засушливые, для тритикале – оптимальные и слабозасушливые и гороха – засушливые и очень засушливые. Результаты исследований показывают, что для всех исследуемых сельскохозяйственных культур отмечается увеличение переходов стронция-90 от 1,1 до 3,9 раза со снижением показателя ГТК с 1,45 до 0,65. Максимальное увеличение Кп стронция-90 с 1,6 до 6,4 отмечено у гороха посевного в более засушливых и теплых условиях вегетационного периода, что возможно связано с тем, что горох является кальциефильной культурой, что определяет высокие размеры выноса его химического аналога ^{90}Sr .

Таблица 3

Зависимость коэффициентов перехода ^{90}Sr от условий вегетационного периода, влияние отношения осадков к сумме активных температур вегетационного периода (ГТК) на переходы ^{90}Sr (Кп) из дерново-подзолистых супесчаных почв в сельскохозяйственные культуры

Культура	Продукция	ГТК	Кп
Люцерна	сено	0,99	17,87 ± 3,22
		0,73	18,79 ± 2,82
Кукуруза	зеленая масса	0,96	1,01 ± 0,16
		0,69	1,41 ± 0,21
Тритикале	зерно	1,49	0,74 ± 0,11
		1,12	1,16 ± 0,16
Горох	зерно	0,98	1,62 ± 0,29
		0,65	6,36 ± 0,96

По предварительным данным можно отметить, что с потеплением климата на территории радиоактивного загрязнения проблемы с высокими переходами стронция-90 в растениеводческую продукцию будут усугубляться. В связи с этим необходима разработка мер адаптации по использованию сельскохозяйственных земель загрязненных радионуклидами. Для этого будет необходимо изменить

структуру посевных площадей, включая внедрение засухоустойчивых культур, применять меры по борьбе с дефляцией земель для ограничения переноса радионуклидов на прилегающие территории, внедрять влагосберегающие технологии и увеличивать площади орошаемого земледелия. Выше названные меры потребуют новых данных о коэффициентах перехода радионуклидов из почвы в растения для прогнозирования загрязнения радионуклидами урожая интродуцированных культур, для улучшения стратегий реабилитации загрязненных земель и оптимизации защитных мероприятий в условиях потепления климата.

ВЫВОДЫ

1. Количественное распределение ^{137}Cs по формам нахождения зависит от гранулометрического состава дерново-подзолистых почв. Спустя 35 лет после аварии на Чернобыльской АЭС основная доля ^{137}Cs находится в прочно связанной форме, что определяет низкие переходы данного радионуклида в продукцию растениеводства. Доля легкодоступных форм радиоцезия (водорастворимая + обменная) для растений составляет в дерново-подзолистых песчаных почвах 10,9 %, в супесчаных – 5,1 % и в суглинистой – 3,9 % от валового содержания в почве.

2. Среди подвижных форм ^{90}Sr в дерново-подзолистых почвах преобладают обменные и легкорастворимые формы радионуклида. Доля доступных форм радиостронция (водорастворимая + обменная + подвижная) для растений составляет в дерново-подзолистых песчаных почвах 87,3 %, в супесчаных – 81,2 % и в суглинистой – 92,0 % от валового содержания в почве и доля легкодоступных (водорастворимая + обменная) составляет 67,2 %, 59,5 % и 75,5 % соответственно. Данный факт определяет высокие переходы радиостронция в продукцию растениеводства.

3. Результаты исследований показывают, что для исследуемых сельскохозяйственных культур отмечается увеличение переходов ^{90}Sr в растения из дерново-подзолистой супесчаной почвы в более теплые и сухие вегетационные периоды. По предварительным данным можно отметить, что с потеплением климата на территории радиоактивного загрязнения проблемы с высокими переходами ^{90}Sr в растениеводческую продукцию будут усугубляться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сельскохозяйственная радиоэкология // Р. М. Алексахин [и др.]. – М.: Экология, 1992. – 400 с.

2. Архипов А. Н. Поведение ^{90}Sr и ^{137}Cs в агроэкосистемах зоны отчуждения Чернобыльской АЭС: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.01 / А. Н. Архипов; Всерос. науч.-исслед. ин-т с.-х. радиологии и агроэкологии. – Обнинск, 1995 – 26 с.

3. Формы нахождения в почвах и динамика накопления ^{137}Cs в сельскохозяйственных культурах после аварии на Чернобыльской АЭС / Н. И. Санжарова [и др.] // Почвоведение. – 1997. – № 2. – С. 129–134.

4. Круглов, С. В. Распределение и формы нахождения радиоактивных и стабильных изотопов Cs и Sr в торфяных почвах / С. В. Круглов, Б. В. Осипов, Е. В. Просяников // Радиоэкология торфяных почв: материалы Междунар. конф., Санкт-Петерб. гос. аграр. ун-т. – СПб., 1994. – С. 95–97.

5. *Путятин Ю. В.* Минимизация поступления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в растениеводческую продукцию: монография / Ю. В. Путятин. – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2008. – 255 с.
6. Агроклиматическое зонирование территории Беларуси с учетом изменения климата. В. И. Мельник [и др.]. – Минск-Женева, 2017. – 84 с.
7. *Мельник В. И.* Изменение климата и меры по адаптации сельского хозяйства к этим изменениям в Республике Беларусь / В. И. Мельник // Труды ФГБУ «ВНИИ-ИСХМ». – 2013. – Вып. 38. – С. 249–256.
8. *Павлоцкая Ф. И.* Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах / Ф. И. Павлоцкая. – М.: Атомиздат, 1974. – 215 с.
9. Comparison of methods for assessing plutonium speciation in environmental objects / T. A. Goryachenkova [et al.] // Radiochem. – 2005. – Vol. 47, № 6. – P. 599–604.
10. *Круглов С. В.* Формы нахождения радионуклидов в почвах 30-км зоны ЧАЭС и их изменение со временем / С. В. Круглов, А. Д. Куринов, Н. П. Архипов: IV Междунар. науч.-техн. конф. «Итоги 8 лет работы по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС». – Сб. докл. Чернобыль. – 1994. – Т. 1. – С. 243–250.
11. *Arkhipov N. P.* Relative amounts of compounds of heavy natural radionuclides / N. P. Arkhipov, T. A. Fedorova, L. T. Fevrалева // Sov. Soil Sci. – 1986. – Vol. 18, № 3. – P. 66–70.
12. Методы изучения форм нахождения радионуклидов в почвах / Д. В. Маханов [и др.] // Радиационная биология. Радиозкология. – 2019. – Т. 59, № 4. – С. 410–418.
13. International Atomic Energy Agency. Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency. IAEA–TECDOC–1092. – Vienna, 1999. – 307 p.
14. Сельскохозяйственный энциклопедический словарь; под ред. гл. ред. В. К. Месяц. – М.: Советская энциклопедия, 1989. – 656 с.
15. Закономерности поведения радионуклидов при использовании глинистых пород в качестве материала защитного барьера в хранилищах РАО / М. Н. Сабодина // Пятая Российская конференция по радиохимии «Радиохимия-2006»: Тезисы докладов, Дубна 23–27 октября 2006 г. – Дубна, 2006. – С. 269.
16. *Павлоцкая Ф. И.* Формы нахождения и миграция искусственных радионуклидов в почве / Ф. И. Павлоцкая. – М.: Атомиздат, 1979. – 215 с.
17. *Кобец С. А.* Сорбция Sr на монтмориллоните с осажденными на его поверхности гидроксидами железа / С. А. Кобец // 8-я Международная конференция «Сотрудничество для решения проблемы отходов» WasteEC0–2011, Харьков, 23–24 февраля 2011 г.
18. *Круглов С. В.* Формы нахождения радионуклидов в почвах 30-ти км зоны ЧАЭС и их изменение со временем / С. В. Круглов, А. Д. Куринов, Н. П. Архипов // IV Междунар. науч.-техн. конф. «Итоги 8 лет работы по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС». – Сб. докл. Чернобыль. – 1994. – Т. 1. – С. 243–250.
19. *Filgueiras A. V.* Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples / A. V. Filgueiras, I. Lavilla, C. Bendicho // J. Environ. Monit. – 2002. – Vol. 4, № 6. – P. 823–857.
20. Роль химии в реабилитации сельскохозяйственных угодий, подвергшихся радиоактивному загрязнению / Н. И. Санжарова [и др.] // Рос. химический журнал – 2005. – Т. XLIX. – № 3. – С. 26–34.
21. *White P. J.* The pathways of calcium movement to the xylem / P. J. White //

Journal of Experimental Botany. – 2001. – Vol. 52, № 358. – P. 891–899.

22. Соколик А. И. Действие почвенных факторов на механизмы переноса радионуклидов в системе почва–растение / А. И.Соколик, Д. А. Федорович // Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях: труды Международ конф. Санкт-Петербург. – Гидрометеиздат, 2000. – С. 124–130.

23. Рекомендации по ведению сельскохозяйственного производства на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь на 2021–2025 годы / Н. Н. Цыбулько [и др.]; НАН Беларуси, Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Институт почвоведения и агрохимии. – Минск: ИВЦ Минфина, 2021. – 144 с.

ASSESSMENT OF THE AVAILABILITY OF ^{137}Cs AND ^{90}Sr RADIONUCLIDES TO AGRICULTURAL PLANTS IN CHANGING CLIMATIC CONDITIONS

Y. V. Putyatin

Summary

In field experiments conducted on sod-podzolic soils, it was found that 35 years after the Chernobyl accident, the largest share of ^{137}Cs is in a strongly bound form, which determines the low transfer of ^{137}Cs into crops. The share of easily available ^{137}Cs forms (water-soluble + exchangeable) for plants is 10,9 % in sod-podzolic sandy soils – 5,1 % in sandy loam and – 3,9 % in loam of the total content in the soil. The share of easily available of ^{90}Sr forms (water-soluble + exchangeable) is 67,2 % in sod-podzolic sandy soils 59,5 % sandy loam and 75,5 % loam of the total content in the soil. This fact determines the high transfer of ^{90}Sr into crops. The research results show that for the studied crops there is a significant increase in the transfer of ^{90}Sr to plants from sod-podzolic sandy loam soil in warmer and drier growing seasons. It can be noted that with the warming of the climate on the territory of radioactive contamination, the problems with high transfer of ^{90}Sr into crops will worsen.

Поступила 15.04.202