

7. Стан родючості ґрунтів України та прогноз його змін за умов сучасного землеробства. За ред. В. В. Медведєва, М. В. Лісового. – Харків: Штрих, 2001. – 98 с.

EFFECT OF FERTILIZER AND SOIL CULTIVATION SYSTEMS IN SHORT CROP ROTATION ON NUTRIENT REGIME OF TYPICAL BLACK SOIL

A.I. Fateev, J.V. Borodina, V.M. Martynenko, M.G. Sobko

Summary

Results of researches of efficiency of the organic (green manure, post-harvest residues) and mineral (moderate rate) fertilizers in short-term rotation on the background of plowing and surface soil treatment are given. It is established that significant changes of humus content in 0–30 cm soil layer has not occurred. In general, for the four-year crop rotation period a content decrease of alkali-hydrolysable nitrogen, mobile forms of phosphorus and potassium in the soil is observed.

Поступила 27.11.2015

УДК 631.41

ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ МИГРАЦИИ ¹³⁷CS И ⁹⁰SR В СИСТЕМЕ ПОЧВА–РАСТЕНИЕ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Н.Н. Цыбулько

*Департамент по ликвидации последствий катастрофы
на Чернобыльской АЭС Министерства по чрезвычайным ситуациям,
г. Минск, Республика Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

Количественные закономерности изменения подвижности и биологической доступности радионуклидов оцениваются на основании двух показателей – содержания их доступных растениям соединений в почве и величине коэффициентов перехода в растения (*K_p* или *TF* – *трансфер-фактор*), представляющий отношение концентрации радионуклида в растении к плотности загрязнения почвы этим радионуклидом в расчете на единицу площади [1].

Растения поглощают из почвы подвижные (доступные) формы радионуклидов, в основном, из почвенного раствора, присутствующие в зоне распространения корневых систем. Интенсивность перехода радионуклидов в растения в первую очередь зависит от содержания их и других элементов в почвенном растворе, а распределение между твердой фазой почвы и почвенным раствором определяется процессами сорбции–десорбции, осаждения–раство-

рения труднорастворимых соединений, коагуляции–пептизации коллоидных частиц.

Основная масса ^{137}Cs и ^{90}Sr выпала на почвенный покров в прочносвязанной форме в составе твердых топливных частиц, а также значительная часть являлась компонентом аэрозолей (конденсационных выпадений), характерных для районов, удаленных от реактора [2].

Поверхностный контакт и перемешивание радиоактивных частиц с почвой привело к их трансформации – выщелачиванию из связанного состояния, сорбции почвенным поглощающим комплексом (ППК), окислами металлов и минералами [3].

Главным механизмом поглощения ^{90}Sr твердой фазой почвы является ионный обмен. Часть его вступила во взаимодействие с ППК и участвовала в процессах сорбции и комплексообразования с минеральными и органическими компонентами почвы. Нерастворимая фракция ^{90}Sr на начальном этапе не участвовала в обменных процессах с ППК, а водорастворимая – постепенно перешла в обменную форму. Сорбция ^{90}Sr зависит от концентрации в почве других катионов и анионов. В настоящее время содержание доступных форм (преимущественно обменной) ^{90}Sr в дерново-подзолистых почвах достигает 70%, в торфяно-болотных почвах – 50% [4].

Поведение в почве и доступность растениям ^{137}Cs отличается от ^{90}Sr тем, что он активно фиксируется почвой, особенно в первый период после поступления в почву. В результате физико-химических реакций происходит не только ионообменное связывание ^{137}Cs , но и необменная сорбция твердой фазой почвы. За послеаварийный период формы ^{137}Cs подверглись существенной трансформации. Произошло снижение доли водорастворимых и обменных форм, доступных для растений, и увеличение фиксированных малодоступных форм. Удельный вес прочно фиксированного ^{137}Cs в почвах колеблется от 75 до 95%.

Подвижность радионуклидов в почве определяется во многом свойствами самой почвы и происходящими в ней физико-химическими процессами. С увеличением степени гидроморфности почвы (от автоморфных к гидроморфным) удельный вес доступных растениям форм радионуклидов возрастает [5, 6]. На дерново-подзолистых супесчаных автоморфной и глееватой почвах установлено, что содержание доступного растениям ^{137}Cs (водорастворимая, обменная, подвижная) составляет в среднем 9–11%, недоступных форм (необменная, фиксированная) – 89–91%. Между автоморфной и полугидроморфной почвами достоверные различия по содержанию форм ^{137}Cs отмечались только по водорастворимой и подвижной формам. Автоморфная почва характеризовалась более высоким содержанием водорастворимой формы и меньшим – подвижной формы [7, 8].

В последние годы не отмечается значимых различий в перераспределении радионуклидов в почве по формам, что указывает на установление их динамического равновесия [5].

На интенсивность перехода радионуклидов в растения существенно влияют генетические особенности почв. Высокие параметры миграции радионуклидов в растения характерны для торфяно-болотных почв, что связано с их высокой емкостью катионного обмена при низком поверхностном заряде. Это приводит

к адсорбции значительных количеств веществ в доступных растениям формах [9, 10].

Основными показателями почв одного генетического типа, влияющими на доступность радионуклидов, являются гранулометрический и минералогический состав, агрохимические свойства, режим увлажнения [11–13]. В зависимости от гранулометрического состава накопление радионуклидов растениями может изменяться в 1,5–2 раза и более [14].

Цель работы – установить временные изменения параметров (коэффициентов) перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr из почвы в сельскохозяйственные культуры.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований являлись коэффициенты перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr из почвы в продукцию сельскохозяйственных культур, которые являются нормативной базой для прогноза загрязнения растениеводческой продукции. Коэффициенты перехода радионуклидов дифференцированы по генетическим типам почв и их гранулометрическому составу. Кроме этого переход ^{137}Cs в продукцию растениеводства изменяется в зависимости от обеспеченности почвы подвижным калием (K_2O), а переход ^{90}Sr – в зависимости от кислотности почвы (pH_{KCl}).

Проведен сравнительный анализ значений коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr , которые были приняты в качестве нормативов для прогноза загрязнения растениеводческой продукции в руководствах и рекомендациях по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель. Анализ проводили на трех группах сельскохозяйственных культур – зерновых (озимая пшеница, озимая рожь, ячмень, овес), пропашных (картофель, кормовая свекла) и многолетних злаковых травах.

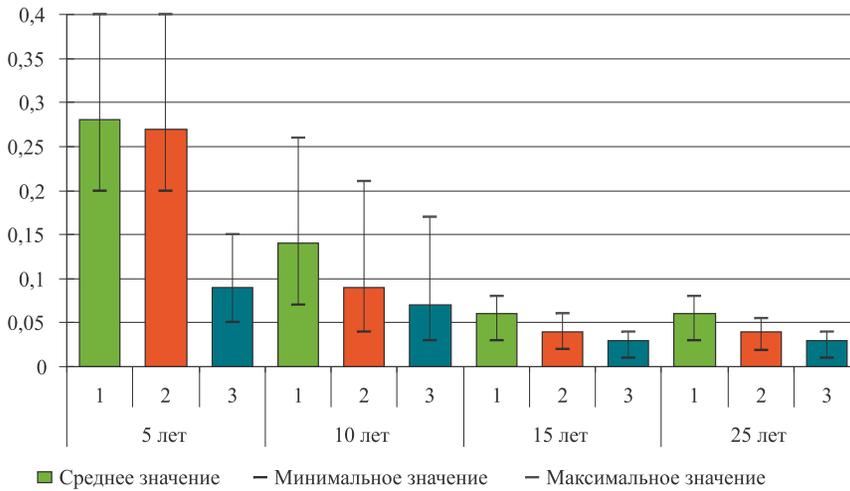
Принимали усредненные значения коэффициентов перехода для групп культур при среднем содержании K_2O (141–200 мг/кг почвы – в дерново-подзолистых почвах и 251–500 мг/кг – в торфяно-болотных почвах) и слабокислой реакции среды для дерново-подзолистых почв (pH_{KCl} – 5,51–6,0) и кислой реакции – для торфяно-болотной почвы (pH_{KCl} – 4,31–4,7).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в растения

Установлено, что за многолетний период (1991–2011 гг.) произошли существенные изменения в биологической доступности и количественных параметрах миграции ^{137}Cs в системе почва–растение. В первые годы после аварии (1987–1990 гг.) на пахотных землях переход ^{137}Cs в зерновые культуры (озимую пшеницу, озимую рожь, ячмень овес) на дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава колебался от 0,05–0,15 Бк/кг: кБк/м² на суглинистых почвах до 0,2–0,4 Бк/кг: кБк/м² – на песчаных и супесчаных почвах. Переход ^{137}Cs в клубни картофеля изменялся от 0,15 на суглинистых почвах до 0,3 – на легких песчаных и супесчаных почвах (рис. 1).

Зерновые культуры



Картофель

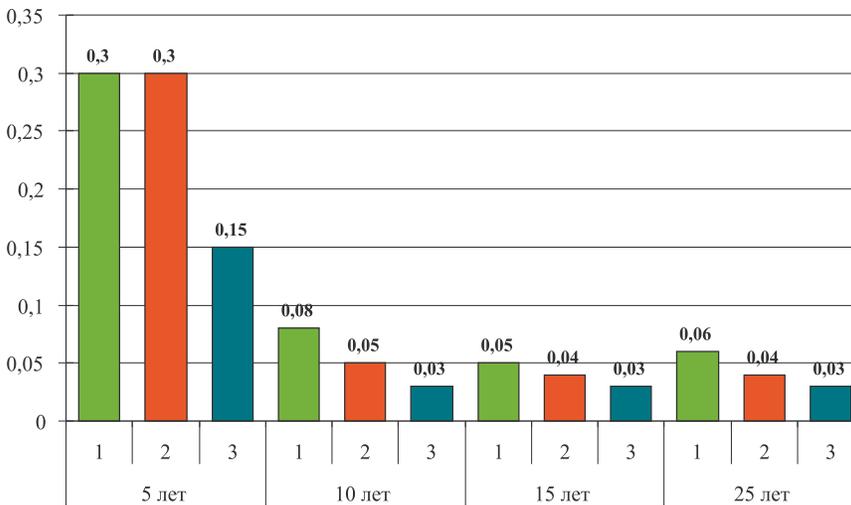


Рис. 1. Динамика коэффициентов перехода ^{137}Cs (Бк/кг: $\text{кБк}/\text{м}^2$) из дерново-подзолистой почвы в зерновые культуры и картофель: 1 – песчаная почва, 2 – супесчаная почва, 3 – суглинистая почва

С течением времени по мере физико-химической трансформации ^{137}Cs в почве (в первую очередь необменной фиксации) и уменьшения доли водорастворимых и обменных форм, доступных для растений, произошло существенное снижение коэффициентов перехода его в продукцию сельскохозяйственных культур. Уже через 10 лет после выпадений параметры поступления ^{137}Cs в зерновые культуры сократились в 2–3 раза на песчаных и супесчаных почвах и в 1,2–1,3 раза – на суглинистых почвах. Переход радионуклида в клубни картофеля уменьшился в 3,7–6 раз.

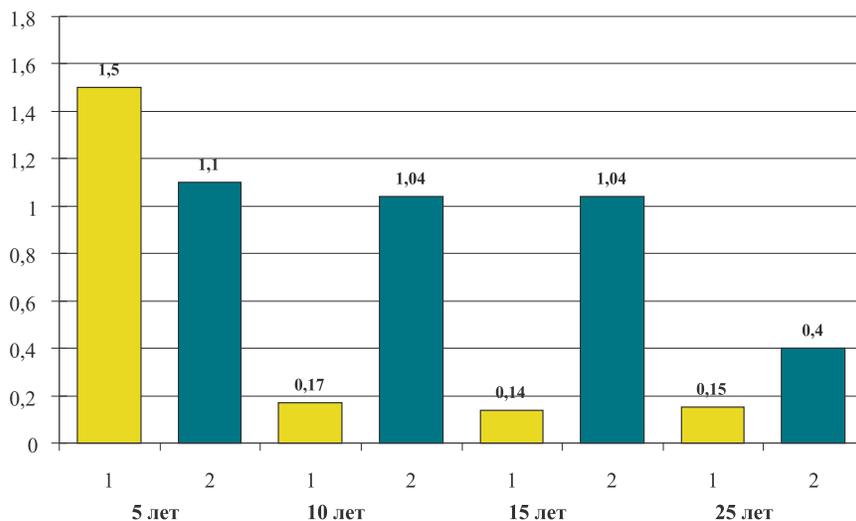


Рис. 2. Динамика коэффициентов перехода ^{137}Cs (Бк/кг: кБк/м²) в зеленую массу многолетних злаковых трав на дерново-подзолистой супесчаной (1) и торфяно-болотной (2) почвах

Наиболее жестко нормируются по содержанию радионуклидов продовольственные сельскохозяйственные культуры – зерновые, зернобобовые и картофель. В настоящее время наступило динамическое равновесие биологической доступности ^{137}Cs в дерново-подзолистых почвах и коэффициенты перехода его в растения практически стабилизировались и изменяются незначительно.

На хорошо окультуренных дерново-подзолистых суглинистых и супесчаных почвах зерновые культуры (озимую рожь, озимую пшеницу, яровую пшеницу, ячмень, овес) на продовольственные цели можно возделывать без ограничений при плотности загрязнения ^{137}Cs до 40 Ки/км².

При выращивании картофеля на продовольственные цели содержание ^{137}Cs в клубнях не должно превышать 80 Бк/кг. На дерново-подзолистых суглинистых и супесчаных почвах при обеспеченности подвижным калием 140–300 мг/кг плотность загрязнения ^{137}Cs не лимитируется. На песчаных почвах нормативно чистый картофель можно получить при плотности загрязнения ^{137}Cs не более 27 Ки/км².

Следует отметить, что на торфяно-болотных почвах в сравнении с дерново-подзолистыми биологическая доступность ^{137}Cs за длительный послеаварийный период практически не снизилась. Как показывают данные, представленные на рис. 2, коэффициенты перехода его в зеленую массу многолетних злаковых трав значительно выше, чем на дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах. И даже спустя 25–26 лет после аварийных выпадений переход ^{137}Cs в растения на торфяно-болотных почвах в 2,7 раза выше, чем на дерново-подзолистых супесчаных почвах.

Существуют разные предположения относительно высокого накопления ^{137}Cs растениями на торфяно-болотных почвах, а также стабильно высокой подвижности и доступности его во времени. Объясняется это низкой сорбционной способностью органического вещества торфяных почв, отсутствием или ничтожно ма-

лым содержанием природных минеральных сорбентов, способных фиксировать радионуклид. Предполагается также, что высокая доступность ^{137}Cs обусловлена высоким содержанием в торфяных почвах органических кислот, способных образовывать высокоподвижные радионуклид-органические соединения. Имеются и другие точки зрения по данному вопросу [9, 14–16].

Динамика коэффициентов перехода ^{90}Sr из почвы в растения

Как отмечалось выше, главным механизмом поглощения ^{90}Sr твердой фазой почвы является ионный обмен и в настоящее время содержание доступных форм (преимущественно обменной) ^{90}Sr в дерново-подзолистых почвах достигает 70%, в торфяно-болотных почвах – 50%. В связи с высокой подвижностью в почве параметры поступления его в растения на порядок выше по сравнению с ^{137}Cs . В первый 3–5-летний период после аварии коэффициенты перехода ^{90}Sr в зерновые культуры из дерново-подзолистых почв колебались в зависимости от их гранулометрического состава в среднем от 1,7 до 3,2 Бк/кг: кБк/м². В последующий период наблюдалось их снижение в среднем в 2,5–2,7 раза на песчаных и супесчаных почвах и в 1,7 раза – на суглинистых почвах и стабилизация (рис. 3).

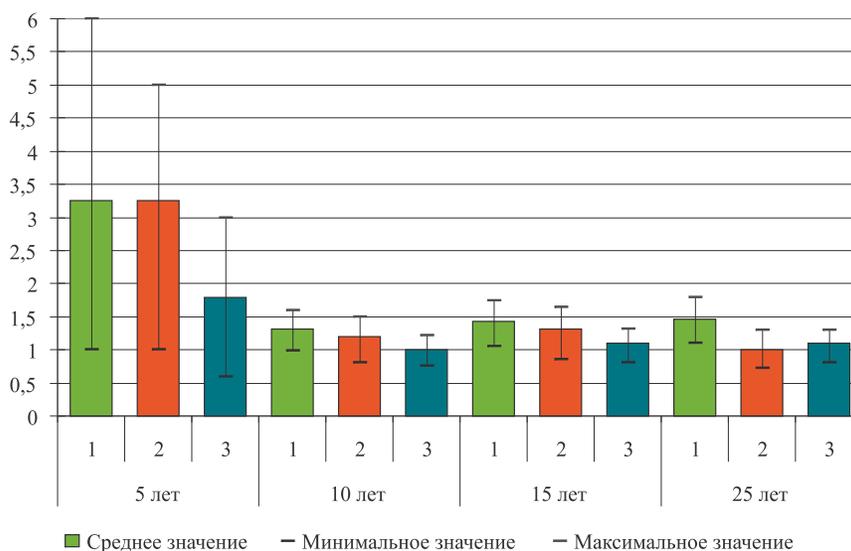


Рис. 3. Динамика коэффициентов перехода ^{90}Sr (Бк/кг: кБк/м²) из дерново-подзолистой почвы в зерновые культуры:
1 – песчаная почва, 2 – супесчаная почва, 3 – суглинистая почва

В настоящее время коэффициенты перехода ^{90}Sr в зерновые культуры из дерново-подзолистых почв колеблются в пределах 0,8–1,4 Бк/кг: кБк/м² на суглинистых почвах и 1,1–1,8 Бк/кг: кБк/м² – на песчаных почвах. Следует отметить, что они на 2,5 порядка выше, чем коэффициенты перехода ^{137}Cs в зерновые культуры, что осложняет получение растениеводческой продукции в пределах допустимых уровней. Даже при плотности загрязнения 11,1 кБк/м² (0,25–0,30 Ки/км²)

на легких по гранулометрическому составу почвах с низким уровнем плодородия существует риск получения продовольственного зерна с превышением РДУ–99 по содержанию ^{90}Sr (11 Бк/кг).

В начальный послеаварийный период высоким накоплением ^{90}Sr отличались картофель и кормовые корнеплоды. Коэффициенты перехода составляли в среднем 2,6 и 6 Бк/кг: кБк/м² соответственно. В дальнейшем произошло существенное их снижение – в клубни картофеля в 15 раз, в кормовые корнеплоды – в 8,5–9,0 раз. Однако коэффициент перехода ^{90}Sr в клубни картофеля значительно (в 5 раз) выше по сравнению с ^{137}Cs (рис. 4).

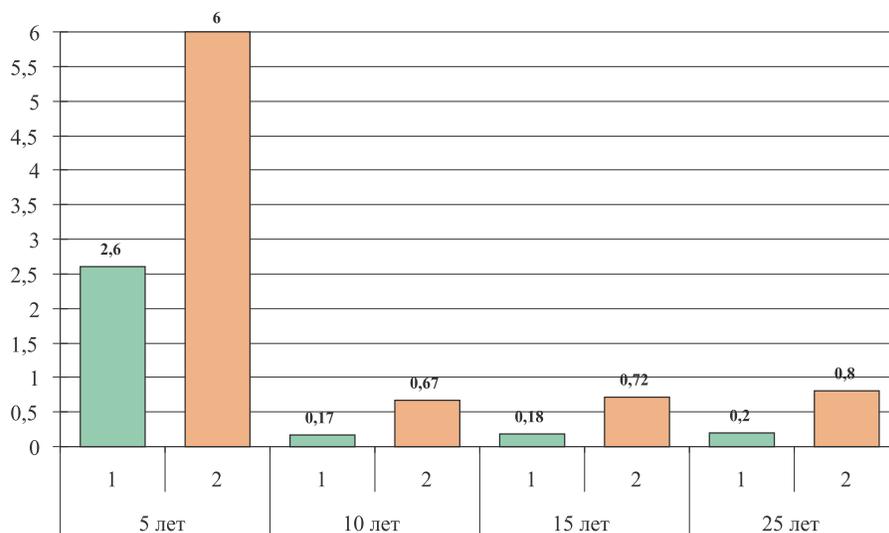


Рис. 4. Динамика коэффициентов перехода ^{90}Sr (Бк/кг: кБк/м²) из дерново-подзолистой супесчаной почвы в клубни картофеля (1) и корнеплоды свеклы кормовой (2)

При выращивании картофеля на продовольственные цели содержание ^{90}Sr в клубнях не должно превышать 3,7 Бк/кг. На слабокислых и нейтральных суглинистых почвах продовольственный картофель можно получить при плотности загрязнения ^{90}Sr до 29,6 кБк/м² (до 0,8 Ки/км²). На дерново-подзолистых супесчаных и песчаных почвах плотность загрязнения ^{90}Sr ограничивается пределами 22,0 кБк/м² (0,6 Ки/км²). Непригодны для возделывания картофеля загрязненные радионуклидами торфяные почвы.

В зеленую массу многолетних злаковых трав параметры поступления ^{90}Sr за послеаварийный период уменьшились на дерново-подзолистых супесчаных почвах в среднем в 2,9 раза, на торфяно-болотных почвах – в 9 раз. Представленные на рисунке 5 данные показывают, что как в первые годы после аварийных выпадений, так и в последующем, коэффициенты перехода ^{90}Sr в зеленую массу трав на торфяных почвах были в 1,3–1,6 раза выше, чем на дерново-подзолистых супесчаных почвах. В настоящее время в связи с процессами трансформации радионуклида в почве переход его в травы на торфяных почвах ниже, чем на дерново-подзолистых почвах (рис. 5).

Следует отметить, что на дерново-подзолистых суглинистых и супесчаных почвах при обеспеченности подвижным калием 140–300 мг/кг использование зеленой массы большинства видов трав для получения цельного молока уровнем загрязнения почвы ^{137}Cs не лимитируется. В то же время использование зеленой массы существенно ограничивается плотностью загрязнения почвы ^{90}Sr . На дерново-подзолистых почвах при оптимальных агрохимических показателях для получения цельного молока предельная плотность загрязнения ^{90}Sr при возделывании многолетних злаковых и бобово-злаковых трав составляет 18,5–29,6 кБк/м² (0,5–0,8 Ки/км²).

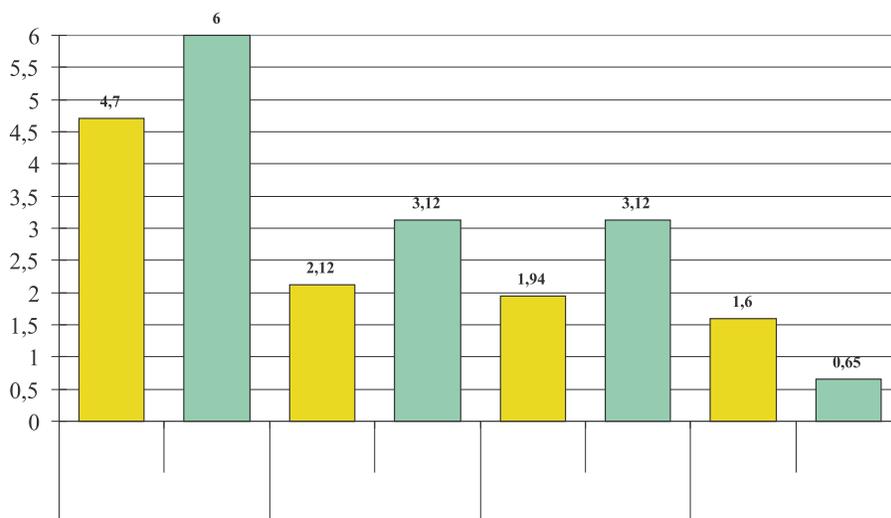


Рис. 5. Динамика коэффициентов перехода ^{90}Sr (Бк/кг: кБк/м²) из дерново-подзолистой супесчаной (1) и торфяно-болотной (2) почв в зеленую массу многолетних злаковых трав

ВЫВОДЫ

1. За послеаварийный период произошло существенное снижение биологической доступности и интенсивности миграции ^{137}Cs в системе почва–растение вследствие необменной фиксации и уменьшения водорастворимых и обменных форм в почве. Коэффициенты перехода его сократились на дерново-подзолистых почвах в зависимости от их гранулометрического состава в среднем в зерновые культуры в 3,0–6,7 раза, в клубни картофеля – в 5,0–7,5 раза. На торфяно-болотных почвах доступность ^{137}Cs снизилась не так существенно – в среднем 2,5 раза и в целом переход радионуклида в растения на этих почвах в 2,7 раза выше, чем на дерново-подзолистых почвах.

2. Показатели поступления ^{90}Sr в растения наиболее интенсивно снижались сразу после аварийных выпадений, что обусловлено в основном трансформацией водорастворимых соединений его в обменные формы, а за последние 20 лет практически не уменьшились, а в некоторых случаях даже возрастают. В связи с высокой подвижностью ^{90}Sr в почве (50% и более находится в обменной фор-

ме) коэффициенты перехода его в сельскохозяйственные культуры существенно выше по сравнению с ^{137}Cs – в зерновые культуры более чем на порядок, в клубни картофеля – в среднем в 5 раз.

3. В настоящее время параметры биологической доступности ^{137}Cs и ^{90}Sr стабилизировались и не наблюдается их существенных изменений. Поэтому исходя из современной ситуации и коэффициентов перехода этих радионуклидов из почвы в растения, можно заключить, что основные проблемы, связанные с получением нормативно чистой продукции растениеводства могут возникать на почвах, загрязненных ^{90}Sr , и на торфяно-болотных почвах, загрязненных ^{137}Cs .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Санжарова, Н.И. Динамика биологической доступности ^{137}Cs в системе почва–растение после аварии на Чернобыльской АЭС / Н.И. Санжарова, С.В. Фесенко, Р.М. Алексахин // Доклады академии наук. – 1994. – Т. 338. – № 4. – С. 564–566.

2. Голиков, Ю.Н. Радиоактивная загрязненность и радиационная обстановка ландшафтных комплексов Гомельской и Могилевской областей / Ю.Н. Голиков, П.И. Дацкевич, В.М. Долгов // Тез. докл. респ. науч.-практ. конф. по радиобиологии и радиоэкологии. – Минск. – 1990. – С. 74.

3. Фесенко, С.В. Оценка периодов полуснижения содержания ^{137}Cs в корнеобитаемом слое почв луговых экосистем / С.В. Фесенко, Н.И. Спиридонов, Н.И. Санжарова // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1997. – Т. 37. – № 2. – С. 267–280.

4. 20 лет после чернобыльской катастрофы: последствия в Республике Беларусь и их преодоление: национальный доклад; под ред. В.Е. Шевчука, В.Л. Гурачевского. – Минск: Комитет по проблемам преодоления последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС при Совете Министров Республики Беларусь. – 2006. – 112 с.

5. Ликвидация последствий чернобыльской аварии в АПК Белоруссии / Г.В. Васильюк [и др.] // Агрохимический вестник. – 2001. – № 3. – С. 12–16.

6. Подоляк, А.Г. Влияние органических удобрений на аккумуляцию ^{137}Cs и ^{90}Sr в травостое суходольного луга на дерново-подзолистой супесчаной почве / А.Г. Подоляк [и др.] // Агрохимия. – 2005. – № 11. – С. 66–75.

7. Цыбулько, Н.Н. Содержание форм ^{137}Cs в дерново-подзолистой супесчаной почве разной степени гидроморфности / Н.Н. Цыбулько, С.С. Лазаревич, А.В. Ермоленко // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2009. – № 1. – С. 63–66.

8. Цыбулько, Н.Н. Влияние степени гидроморфности и систем основной обработки дерново-подзолистой супесчаной почвы на содержание в ней форм ^{137}Cs / Н.Н. Цыбулько, А.В. Ермоленко, С.С. Лазаревич // Вестник БГСХА. – 2010. – № 4. – С. 56–60.

9. Вирченко, Е.П. Радионуклид-органические соединения в почвах зоны влияния Чернобыльской АЭС / Е.П. Вирченко, Г.И. Агапкина // Почвоведение. – 1993. – № 1. – С. 13–17.

10. Действие фульво- и гуминовых кислот на механизмы накопления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr растительными клетками / Г.А. Соколик [и др.] // Радиоэкология

торфяных почв: материалы Междунар. конф. / Санкт-Петербургский гос. аграр. ун-т. – СПб., 1994. – С. 23–24.

11. *Моисеев, И.Т.* Изучение поведения ^{137}Cs в почвах и его поступления в сельскохозяйственные культуры в зависимости от различных факторов / И.Т. Моисеев, Г.И. Агапкина, Л.А. Рерих // *Агрoхимия*. – 1994. – № 2. – С. 103–118.

12. *Шмигельская, И.Д.* Накопление радионуклидов растениями в зависимости от направленности процессов почвообразования и степени гидроморфизма / И.Д. Шмигельская, В.Ю. Агеец // *Почвы, их эволюция, охрана и повышение производительной способности в современных социально-экономических условиях: материалы I съезда Белорус. общества почвоведов*, Минск, 9–10 октября 1995 г. / *Акад. аграр. наук. РБ, науч.-исслед. ин-т почвоведения и агрохимии; редкол.: В.Ю. Агеец [и др.]*. – Минск, 1995. – С. 272.

13. Шмигельская, И.Д. Загрязнение многолетних злаковых трав цезием-137 и стронцием-90 в зависимости от типов и свойств почв / И.Д. Шмигельская, И.А. Ефимова, Т.В. Арастович // *Почвенные исследования и применение удобрений: сб. науч. тр. / БелНИИПА*. – Минск, 2002. – Вып. 26. – С. 270–269.

14. *Агеец, В.Ю.* Система радиозкологических контрмер в агрофере Беларуси / В.Ю. Агеец. – Минск, 2001. – 250 с.

15. *Осипов, В.Б.* Особенности поведения цезия-137 и стронция-90 в торфяных почвах низинных и верховых болот / В.Б. Овсянников, С.В. Круглов, Е.В. Просянников // *Радиобиологический съезд: тезисы докладов*. – Пущино, 1993. – С. 748–749.

16. Доступность ^{137}Cs и ^{90}Sr растениями из различных компонентов почвы / Ю.И. Бондарь [и др.] // *Почвоведение*. – 2000. – № 4. – С. 439–445.

TIME DYNAMICS OF PARAMETERS OF MIGRATION ^{137}CS AND ^{90}SR IN SYSTEM SOIL-PLANT: THE COMPARATIVE ANALYSIS

N.N. Tsybulko

Summary

It is established, that for after emergency the period there was an essential decrease in biological availability and intensity of migration ^{137}Cs in system soil-plant owing to not exchange fixing and reduction of water-soluble and exchange forms in soil. Transfer factors were reduced on sod-podzolic soils in grain crops in 3,0–6,7 times, in potato tubers – in 5,0–7,5 times. On peat soils availability ^{137}Cs has decreased on the average 2,5 times. Transition ^{137}Cs in plants on these soils in 2,7 times above, than on sod-podzolic soils. Receipt indicators ^{90}Sr in plants most intensively decreased right after emergency losses, further they were stabilized. In connection with high mobility ^{90}Sr in soil (50% and more are in the exchange form) transfer factors in agricultural crops essentially above in comparison with ^{137}Cs – in grain crops on 2,5–3 order, in potato tubers – on the average in 5 times.

Поступила 26.10.2015