

ПОСТУПЛЕНИЕ ЦЕЗИЯ-137 И СТРОНЦИЯ-90 В КОРМОВЫЕ КУЛЬТУРЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ АГРОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ

З. В. СТРЕЛЯЕВА

*Государственное научное учреждение
«Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси»,
г. Гомель, Республика Беларусь, 246007, e-mail: zoyalozovaya@yandex.by*

(Поступила в редакцию 14.02.2022)

В результате катастрофы на Чернобыльской АЭС произошло радиоактивное загрязнение сенокосно-пастбищных угодий, ранее интенсивно используемых для получения кормов для отрасли животноводства. В зону загрязнения попали автоморфные почвы с произрастающими на них многолетними злаковыми травами. На территории Белорусского Полесья, где размеры загрязнения сельскохозяйственных земель особенно велики, луга и пастбища составляют примерно половину всей используемой площади, а доля производимых на ней кормов составляет в кормовом балансе региона около 60 %.

В настоящее время сравнительно хорошо отработаны приемы получения растениеводческой продукции с содержанием радионуклидов в пределах допустимых уровней. В большинстве случаев зерно, картофель и корнеплоды соответствуют требованиям нормативов радиационной безопасности при выращивании на пахотных почвах нормального увлажнения с плотностью загрязнения ^{137}Cs до 1480 кбк/м², ^{90}Sr – до 111 кбк/м². Значительно труднее получить урожай кормовых культур с допустимым содержанием радионуклидов, пригодный для скормливания скоту и получения качественного молока и мяса. Это обусловлено биологическими особенностями многолетних трав, которые накапливают радионуклидов в 10–20 раз больше, чем зерновые культуры. Многолетние травы отличаются наибольшей способностью аккумулировать радионуклиды.

Поведение радионуклидов, их миграция на разных этапах биохимического круговорота элементов в значительной степени зависит от физико-химического состояния почвы. Почва является ведущим звеном миграции радионуклидов, так как особенности их взаимодействия с компонентами почвенного комплекса определяют характер движения изотопов в остальных звеньях биологического цикла.

Сорбционная способность почв находится в прямой пропорциональной зависимости от степени дисперсности почвенных частиц. Различия в размерах поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr в сельскохозяйственные культуры на суглинистых, супесчаных и песчаных почвах варьируют в больших пределах.

Ключевые слова: *многолетние злаковые травы, корма, биологическая доступность, цезий-137, стронций-90, радионуклиды.*

As a result of the catastrophe at Chernobyl nuclear power plant, radioactive contamination of hay and pasture lands, previously intensively used to obtain fodder for the livestock industry, occurred. Automorphic soils with perennial cereal grasses growing on them fell into the pollution zone. On the territory of Belarusian Polissya, where the extent of agricultural

land pollution is especially large, meadows and pastures make up about half of the entire used area, and the share of fodder produced on it is about 60 % in the fodder balance of the region.

At present, methods for obtaining crop products with the content of radionuclides within acceptable levels are relatively well developed. In most cases, grain, potatoes and root crops meet the requirements of radiation safety standards when grown on arable soils of normal moisture with a contamination density of ^{137}Cs up to 1480 kbq/m², ^{90}Sr – up to 111 kbq/m². It is much more difficult to obtain a yield of fodder crops with an acceptable content of radionuclides suitable for feeding livestock and obtaining high-quality milk and meat. This is due to the biological characteristics of perennial grasses, which accumulate radionuclides 10–20 times more than grain crops. Perennial grasses are distinguished by the greatest ability to accumulate radionuclides.

The behavior of radionuclides, their migration at different stages of biochemical cycle of elements largely depends on the physical and chemical state of the soil. The soil is the leading link in the migration of radionuclides, since the features of their interaction with components of the soil complex determine the nature of movement of isotopes in the remaining links of the biological cycle.

The sorption capacity of soils is directly proportional to the degree of dispersion of soil particles. Differences in the amounts of ^{137}Cs and ^{90}Sr input into agricultural crops on loamy, sandy loam, and sandy soils vary widely.

Key words: perennial cereal grasses, fodder, bioavailability, cesium-137, strontium-90, radionuclides.

Введение. На загрязненных радионуклидами землях получение сельскохозяйственной продукции с содержанием радионуклидов в пределах допустимых норм во многом связано с решением проблемы плодородия.

Важными показателями почвенного плодородия являются агрохимические свойства, гранулометрический и минералогический состав.

Известно, что около десяти физико-химических характеристик почв определяют поведение в них радионуклидов и степень их перехода в растения [1, 2]. Различные типы почв имеют свои сложившиеся сочетания основных свойств. Однако в пределах одного типа, например, дерново-подзолистых почв, диапазон изменения агрохимических свойств, существенно влияющий на накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr в растительной продукции, может быть весьма значительным.

Определение количественных параметров влияния отдельных свойств почв на поступление радионуклидов в растения является сложной задачей, так как большинство агрохимических показателей тесно связано между собой, и степень воздействия каждого отдельного свойства зависит и от влияния всего комплекса. Например, наиболее существенное влияние на поступление ^{137}Cs в растения из минеральных почв оказывает содержание обменных катионов кальция, магния, калия и содержание гумуса, которые в свою очередь определяют емкость катионного обмена и степень кислотности почв [3, 4].

На поступление радионуклидов в растения существенно влияет обеспеченность почв калием. Следует, однако, подчеркнуть, что насыщение почв калием до оптимального уровня не сопровождается дальнейшим снижением поступления ^{137}Cs в растения [5].

В зависимости от содержания в почвах подвижного калия величина содержания ^{137}Cs может изменяться от 40 до 80 % для зерновых культур и от 10 до 42 % для многолетних злаковых трав. На почвах, высокообеспеченных подвижным калием, снижение перехода ^{137}Cs в культуры проходит интенсивнее, чем на слабообеспеченных.

При содержании подвижного калия в почвах 80 мг/кг и менее, загрязнение зерна овса ^{137}Cs на песчаных породах в 2 раза выше, чем на суглинистых, тогда как при 200–300 мг/кг калия в почвах различия в активности зерна очень незначительные.

Урожай и уровень перехода радионуклидов из почвы в растения в значительной степени определяет содержание гумуса в почвах. Установлено, что изменение содержания гумуса в почве от 1,5 % до 3,5 % способствует снижению перехода радионуклидов в растения до 5 раз.

Состав поглощенных оснований и реакция почвенного раствора – важнейшие факторы, определяющие прочность закрепления радионуклидов в почвах и доступность растениям. Существуют достоверные зависимости влияния величины кислотности и содержания обменного кальция в почвах на накопление ^{90}Sr в растениях. Изменение реакции почвенной среды от очень кислого интервала (рН менее 4,5) к нейтральному (рН 6,5–7,0) способно в 2–3 раза снизить переход радионуклидов в урожай культур [5].

Минимальное накопление радионуклидов в растениях наблюдается при оптимальных показателях кислотности почв (рН в КСl), которые для дерново-подзолистых почв составляют: глинистых и суглинистых – 6,0–6,7; супесчаных – 5,8–6,2; песчаных – 5,6–5,8. На минеральных почвах сенокосов и пастбищ оптимальные показатели рН составляют соответственно 5,8–6,2 [6].

Среди загрязненных радионуклидами земель Беларуси преобладают низко плодородные почвы, характеризующиеся легким гранулометрическим составом, низкой емкостью поглощения, невысоким содержанием элементов минерального питания и гумуса, а потому высокими коэффициентами перехода радионуклидов в сельскохозяйственные культуры. Наблюдаются случаи превышения допустимых норм содержания ^{137}Cs в молоке при скармливании скоту трав на почвах с плотностью загрязнения до 185 кБк/м² [5].

Большое количество научных трудов посвящено изучению сопряженного влияния степени обеспеченности почв калием и реакции почвенного раствора (рН) на накопление ^{137}Cs в сельскохозяйственных культурах. В результате многочисленных вегетационных экспериментов, показано снижение накопления радиоцезия растениями при внесении калийных удобрений. Поскольку калий является элементом – аналогом цезия, его ионы конкурируют с ионами радиоактивного цезия при поглощении растениями.

Оценить степень биологической доступности калия в почвах, исходя из свойств почвенно-поглощающего комплекса (ППК) и степени насыщенности его основаниями, можно с помощью интегрального показателя – калийного потенциала, который выражается в калориях. Он представляет собой свободную энергию Гиббса реакции катионного обмена ионов K^+ , находящихся в почвенном растворе, на наиболее распространенные в почвах ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} [7].

Очень важным свойством почв является их способность поддерживать на относительно постоянном уровне величину калийного потенциала и противостоять его изменениям (например, при выносе калия растениями и при внесении удобрений). Это свойство выражается формализованной величиной, называемой «потенциальной буферной способностью почв в отношении калия». Это означает, что для изменения калийного потенциала на одну и ту же величину в торфяную почву необходимо внести в 6 раз больше калийных удобрений, чем в дерново-подзолистую [7].

Уменьшение относительного содержания в почве обменного ^{137}Cs с увеличением калийного потенциала связано с коллапсом межпакетного пространства вторичных почвенных минералов, имеющих смешанно-слоистую структуру, при насыщении почв K^+ - ионами, что приводит к снижению доступности сорбированного ими радиоцезия для растений [8].

Основная часть. Основными почвообразующими породами региона являются водноледниковые и древнеаллювиальные супеси, и пески, лессовидные и донноморенные суглинки, торфяные отложения низинного типа. Значительную часть сельскохозяйственных земель области составляют дерново-подзолистые (автоморфные) почвы – 27,9 % преимущественно легкого гранулометрического состава: песчаные – 46,9 %, супесчаные 32,8 %. Суглинистые почвы составляют лишь 4,7 %. В понижениях и долинах стока рек формируются дерново-подзолистые и дерновые почвы разной степени гидроморфности.

Большие площади занимают маломощные мелиорированные торфяно-болотные почвы (14,2 %) в наиболее широких долинах, стоках, поймах малых рек.

Полевое и луговое кормопроизводство составляет основу кормовой базы Полесья. Уровень плодородия почв сенокосов и пастбищ на лугах суходольного и заболоченного типов невысок и оценивается в пределах 20–35 баллов. Почвы отличаются низким содержанием органического вещества, подвижных форм фосфора и калия, низкой степенью насыщенности основаниями, высокой обменной и гидролитической кислотностью. В связи с этим для естественных травостоев этих лугов характерна низкая урожайность.

Для изучения влияния гранулометрического состава и агрохимических свойств почв на переход ^{137}Cs и ^{90}Sr из почвы в растения в Брагинском, Ветковском и Хойникском районах Гомельской области проводился отбор сопряженных почвенных и растительных проб на кормовых землях дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава, разной степени окультуренности с плотностью загрязнения ^{137}Cs от 313 до 2480 кБк м^2 и ^{90}Sr от 2 до 63 кБк м^2 .

Подготовка почвенных и растительных образцов к агрохимическому, спектрометрическому и радиохимическому анализу проводилась по общепринятым методикам: подвижные формы калия и фосфора по Кирсанову, ГОСТ 26207-91, показатель кислотности рНКСl – потенциметрическим методом по ГОСТ 26483-85, кальций и магний – на атомно-адсорбционном спектрофотометре ААС-30 по ГОСТ 26487-85, гумус – Тюрину, ГОСТ 26213-91.

Ботанический состав многолетних злаковых трав был представлен различными видами злаков (по характеру кушения): корневищными – пырей ползучий (*Elytrigia répens*), кострец безостый (*Bromus inermis* Leyss), полевица белая (*Agrostis alba* L.), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), рыхлокустовыми – овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds.), тимфеевка луговая (*Phleum pratense* L.), ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), райграс пастбищный (*Lolium perenne*), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), плотнокустовыми – луговик дернистый (щучка) (*Deschampsia caespitosa* L.), белоус торчащий (*Nardus stricta* L.) и другие. Определение отдельных видов растений и их принадлежность к той или иной ботанической группе проводили по методическим разработкам Л.М. Сапегина «Определение луговых растений Беларуси» [9]. После Чернобыльской катастрофы проводились работы по поверхностному и коренному улучшению сенокосов и пастбищ на большей

части кормовых земель, что способствовало повышению степени их окультуренности.

Влияние агрохимических свойств дерново-подзолистых почв на величину поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr в кормовые культуры

Определение влияния отдельных свойств почв на поступление радионуклидов в растения является сложной задачей, так как большинство агрохимических показателей тесно связано между собой и степень воздействия каждого отдельного свойства зависит и от влияния всего комплекса. Например, наиболее существенное влияние на поступление ^{137}Cs в растения из дерново-подзолистых почв оказывает содержание обменных катионов кальция, магния, калия и содержание гумуса, которые в свою очередь определяют емкость катионного обмена и степень кислотности почв [3].

Существует необходимость в оценке независимости влияния отдельных агрохимических показателей, тесно коррелирующих с величиной коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr для почвенных разновидностей, с целью прогнозирования содержания радионуклидов в получаемых с этих земель растительных кормах.

В ряде нормативных документов для прогноза содержания радионуклидов в растениеводческой продукции на всех типах почв используются только два агрохимических показателя: содержание обменного калия (для прогноза ^{137}Cs) и величины обменной кислотности $\text{pH}_{(\text{KCl})}$ (для прогноза ^{90}Sr) [6]. Однако в работах ряда учёных [3] приводятся данные, свидетельствующие о наличии более тесной статистической зависимости между коэффициентами перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr и другими агрохимическими показателями дерново-подзолистых почв (гидролитической кислотностью, содержанием обменного Ca и Mg, содержанием гумуса, степенью насыщенности основаниями и др.).

Одна из задач настоящей работы – на основании массива данных, полученных в маршрутных исследованиях, установить корреляционные зависимости между величиной коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в многолетние злаковые травы изучаемых почвенных разновидностей и основными агрохимическими свойствами дерново-подзолистых почв.

В работе приведены уравнения линейной и множественной регрессии, позволяющие прогнозировать величину коэффициентов перехода радионуклидов (КП, Бк/кг:кБк/м²) и степень загрязнения многолетних злаковых трав произрастающих на дерново-подзолистых автоморфных почвах разного гранулометрического состава.

Посредством анализа выборок экспериментальных данных на дерново-подзолистых почвах установлена отрицательная корреляционная

зависимость между накоплением в растениях ^{137}Cs и содержанием в почвах подвижного калия. Принимая во внимание существенные различия между суглинистыми, супесчаными и песчаными почвами как в минералогическом и гранулометрическом составе, так и по содержанию калия, корреляционные зависимости были рассчитаны отдельно для суглинистых, супесчаных и песчаных почв. Для большинства исследуемых многолетних злаковых трав естественных сенокосов установлена средняя степень связи между рассматриваемыми признаками.

Влияние насыщенности почвенного поглощающего комплекса подвижным калием на процент снижения поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr в растения, на почвах сходного гранулометрического состава, представлено в табл. 1, в данном случае дерново-подзолистая песчаная почва была взята для более подробного исследования, так как она является самой распространенной почвенной разновидностью в Гомельской области.

Таблица 1. Значения коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в многолетние злаковые травы в зависимости от содержания калия в дерново-подзолистых песчаных почвах, $n=12$

Радионуклиды	Содержание подвижного K_2O , мг/кг почвы			
	81–140	141–200	201–300	301–400
^{137}Cs	$0,94 \pm 0,26$	$0,73 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,04$	$0,21 \pm 0,05$
^{90}Sr	$4,51 \pm 0,84$	$3,16 \pm 1,50$	$3,06 \pm 0,89$	$2,55 \pm 0,63$

Как видно из приведенных данных, на почвах со средним содержанием подвижного калия 141–200 мг/кг коэффициент перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в растения, на дерново-подзолистых песчаных почвах, снизился в среднем на 22 % по цезию и на 30 % по стронцию, а на почвах с высоким содержанием калия 301–400 мг/кг на 78 % по цезию и на 43 % по стронцию.

Установлена отрицательная корреляционная связь между степенью кислотности (pH_{KCl}) автоморфных дерново-подзолистых почв и поступлением ^{137}Cs и ^{90}Sr в многолетние злаковые травы. Более сильная связь ($r = -0,78$) исследуемых параметров наблюдается на дерново-подзолистых рыхло-песчаных почвах. Снижение концентрации радионуклидов в многолетних злаковых травах с увеличением pH в почве прослеживается в табл. 2.

Таблица 2. Значения коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в многолетние злаковые травы в зависимости от степени кислотности почв (pH_{KCl}) в дерново-подзолистых песчаных автоморфных почвах, $n=15$

Радионуклиды	Обменная кислотность pH_{KCl}				
	4,51–5,00	5,01–5,50	5,51–6,00	6,01–6,50	6,51–7,00
^{137}Cs	$0,94 \pm 0,26$	$0,74 \pm 0,05$	$0,54 \pm 0,02$	$0,31 \pm 0,01$	$0,23 \pm 0,12$
^{90}Sr	$4,51 \pm 0,84$	$9,77 \pm 1,72$	$2,11 \pm 0,40$	$3,20 \pm 0,94$	$2,37 \pm 0,70$

Известно, что легкие почвы отличаются более кислой средой, чем суглинистые и наоборот тяжелые по гранулометрическому составу почвы, более щелочные, чем легкие, что подтверждается литературными данными.

Исследованиями подтверждено, что минимум накопления радионуклидов в растениях, соответствует близкому к нейтральному (6,01–6,50) уровню реакции почвенной среды и степени насыщенности почв основаниями. Это позволяет использовать величину pH_{KCl} в качестве интегрального показателя насыщенности почв основаниями при прогнозе доступности растениям радионуклидов. Полученные данные, подтверждают обоснованность известкования почв, как первостепенного послеаварийного приема, позволяющего существенно снизить поступления радионуклидов в многолетние злаковые травы за счёт антагонизма катионов, что способствует частичному переводу радионуклидов в необменное состояние. Однако, более влиятельным является содержание в почвах обменного кальция, чем показатель их обменной кислотности, особенно для ^{90}Sr .

Заключение. На основе результатов исследований установлено, что минимальные величины перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в кормовые культуры, возделываемые на основных почвенных разновидностях Гомельской области (дерново-подзолистые автоморфные песчаные почвы) наблюдаются при оптимизации значений агрохимических показателей почв: повышение содержания подвижного калия с низкого (81–140 мг/кг почвы) до оптимального (140–200 мг/кг) сопровождается понижением поступления радионуклидов в урожай на 22 % для цезия и на 30 % для стронция при близком к нейтральному уровню реакции почвенной среды (pH_{KCl} 6,01–6,50); повышение содержания обменного кальция от среднего показателя (801–1200 мг/кг почвы) до повышенного (1201–1600 мг/кг почвы) сопровождается снижением поступления радионуклидов в кормовые культуры на 66 %; повышение содержания гумуса от недостаточного (1,5–2,0 %) до оптимального (1,8–2,2 %) сопровождается снижением поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr в 3 раза; повышение содержания фосфора до оптимального уровня (150–230 мг/кг почвы) обеспечивало до 20 % снижения поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Данные содержащиеся в научной работе по которым изложена данная статья, пригодны для прогноза перехода ^{137}Cs в многолетние злаковые травы в зависимости от следующих агрохимических показателей дерново-подзолистых автоморфных почв: для песчаных почв – от величины обменной кислотности $pH_{(KCl)}$, содержания подвижного калия K_2O , гумуса и обменного магния Mg ; для супесчаных почв – от

величины обменной кислотности $pH(KCl)$, содержания подвижного калия K_2O , гумуса и фосфора P_2O_5 ; для суглинистых почв – от содержания обменного кальция CaO , подвижно калия K_2O и величины обменной кислотности $pH(KCl)$.

Установленные закономерности позволяют прогнозировать переход ^{90}Sr в многолетние злаковые травы в зависимости от следующих агрохимических показателей дерново-подзолистых автоморфных почв: для песчаных почв – от величины обменной кислотности $pH(KCl)$, содержания обменного магния Mg , подвижного калия K_2O , гумуса и обменного кальция CaO ; для супесчаных почв – от величины обменной кислотности $pH(KCl)$, содержания гумуса, обменного магния Mg , подвижного калия K_2O и фосфора P_2O_5 ; для суглинистых почв – от содержания подвижного фосфора P_2O_5 , гумуса, калия K_2O , обменного кальция Ca и содержания подвижного магния MgO .

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулякин, И. В. Накопление стронция-90 в овсе на дерново-подзолистых почвах / И. В. Гулякин, Е. В. Юдинцева, В. З. Папов // Изв. Тимиряз. с.-х. акад. – 1970. – № 2. – С. 129–139.
2. Гулякин, И. В. Накопление стронция-90 в пшенице на дерново-подзолистых почвах / И. В. Гулякин, Е. В. Юдинцева, К. И. Макаревич // Агрохимия. – 1971. – № 4. – С. 84–92.
3. Бондарь, П. Ф. Накопление цезия-137 в урожае сельскохозяйственных культур в зависимости от агрохимических свойств почв / П. Ф. Бондарь, А. Г. Озорнов, А. И. Дутов // Всесоюзная конференция «Проблемы ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в агропромышленном производстве – пять лет спустя: итоги проблемы и перспективы»: тез. докл.: [в 2 т.] / Гос. комис. Совета Министров СССР по продовольствию и закупкам, Всесоюз. науч.-исслед. ин-т с.-х. радиологии. – Обнинск, 1991. – Т. 1. – С. 15–16.
4. Влияние агрохимических и агрометеорологических факторов на накопление цезия-137 в сельскохозяйственных культурах / В. И. Дугинов [и др.] // Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере: тез. докл. IV конф. науч. совета при ГЕОХИ АН СССР по программе «АЭС-ВО». – Гомель, 1990. – С. 85.
5. Агеец, В. Ю. Система радиоэкологических контрмер в агрофере Беларуси / В. Ю. Агеец; Респ. науч.-исслед. УП «Ин-т радиологии». – Минск, 2001. – 249 с.
6. Рекомендации по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2003–2005 гг. / под ред. И. М. Богдевича. – Минск, 2003. – 72 с.
7. Агрохимические методы исследования почв / З. Г. Ильковская [и др.]; отв. ред. А. В. Соколов; АН СССР [и др.]. – 5-е изд., доп. и перераб. – М.: Наука, 1975. – 656 с.
8. Состояние ^{137}Cs в почвах и его биологическая доступность / Р. М. Алексахин [и др.] // Плодородие. – 2001. – № 1. – С. 20–22.
9. Естественные кормовые ресурсы Советского Союза и перспективы их рационального использования: [сб. ст.]: в 2 т. / под ред. В. А. Ковды, И. Н. Кузнецова; Акад. наук СССР, М-во с.-х. СССР. – М., 1976. – Т. 2. – С. 350–363.