

ГНУ «Институт радиобиологии»,  
г. Гомель, Республика Беларусь, 246000

(Поступила в редакцию 01.02.2021)

*В статье анализируются результаты исследований миграции <sup>137</sup>Cs в кормовые сельскохозяйственные культуры, возделываемые на загрязненных минеральных и торфяных почвах в отдаленный период после катастрофы на ЧАЭС.*

*Цель исследований – оценка значений Кп <sup>137</sup>Cs в звене миграции почва-кормовые культуры в отдаленный постчернобыльский период.*

*Во время исследований проведены камеральные работы по подбору хозяйств и участков для отбора проб в производственных посевах сельскохозяйственных культур, возделываемых на загрязненных радионуклидами землях. Проведены аналитические работы по определению основных агрохимических показателей почвы, удельной активности <sup>137</sup>Cs в почве и растительных образцах. Математически обработаны данные и рассчитаны коэффициенты перехода радионуклидов <sup>137</sup>Cs для сельскохозяйственных культур.*

*В результате проведенных исследований актуализированы параметры перехода <sup>137</sup>Cs из дерново-подзолистых и торфяных почв в основные кормовые культуры в отдаленный постчернобыльский период. При планировании рациона кормления сельскохозяйственных животных необходимо учитывать содержание радионуклидов в кормах. Используя актуализированные коэффициенты перехода <sup>137</sup>Cs возможно составить прогноз удельной активности радионуклидов в сельскохозяйственной продукции.*

*Установлена тенденция снижения значений Кп <sup>137</sup>Cs для травяных кормовых культур со временем и увеличение показателей для зерновых культур. Актуализированные данные по переходу <sup>137</sup>Cs из почвы в основные кормовые сельскохозяйственные культуры дополнили базу данных Института, а также использованы при подготовке «Рекомендаций по ведению сельскохозяйственного производства на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь на 2021–2025 годы» для специалистов сельскохозяйственных предприятий.*

**Ключевые слова:** радионуклиды, коэффициенты перехода, корма, цезий-137, агрохимические показатели почвы, сельскохозяйственные культуры.

*In this paper we analyze the results obtained from studying the soil-to-plant transfer factors of <sup>137</sup>Cs in the main forage crops grown on mineral and peaty soils long after the Chernobyl NPP accident. The choice of fields for soil and crop sampling was made through in-office studies of agricultural lands located in cesium-contaminated areas. The samples were then analyzed in the laboratory to determine the main agrochemical properties of soils and specific activities of <sup>137</sup>Cs in sampled soils and forage crops. The measured values were processed mathematically enabling us to calculate the current and up-to-date transfer factors of <sup>137</sup>Cs from soils to agricultural crops.*

*The transfer factors (TF) are an essential tool in the efficient planning of feeding rations for livestock with a due account for the radioactive contamination of forages used. Having the updated values of <sup>137</sup>Cs transfer factors from soddy-podzolic and peaty soils to the typical*

*forage crops makes it possible to make a higher-accuracy prediction of  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in the foods of animal origin to be produced.*

*According to our findings, a downward trend is observed in the present  $^{137}\text{Cs}$  TF values for grassy crops, whereas the TF values for grain crops tend to increase over time.*

*The newly obtained transfer factors of  $^{137}\text{Cs}$  from soil to typical forage crops are a valuable addition to the institute's TF Data Base. On the basis of these values, we have developed an updated edition of the Recommendations for agricultural production in radioactively contaminated areas of the Republic of Belarus for 2021-2025 intended for the specialists of agricultural entities across the country.*

**Key words:** radionuclides, transfer factors, forages, cesium-137, agrochemical properties of soil, agricultural crops.

Поведение радионуклидов, их миграция на разных этапах биогеохимического круговорота элементов в природе в значительной степени зависит от физико-химического состояния почвы и свойств радионуклидов. Почва является ведущим звеном миграции радионуклидов, так как особенности их взаимодействия с компонентами почвенного комплекса определяют характер движения изотопов в остальных звеньях биологического цикла. Поскольку поступление радионуклидов в растения из почвы определяется прочностью связи последних с почвой и изменением ее с течением времени следует располагать данными о количественных показателях миграции радионуклидов из различных типов почв в кормовые культуры. Это важно еще и потому, что система «почва-растение» – это начальная ступень экологического цикла, которая играет весьма важную роль в переносе радионуклидов из внешней среды в организм животных и человека [1, 2].

В настоящее время в сельскохозяйственном пользовании Беларуси находится около 848 тыс. га земель, загрязненных  $^{137}\text{Cs}$  с плотностью от 1 до 40 Ки/км<sup>2</sup>, из которых 39,4 % находятся в Гомельской и 19,7 % в Могилёвской областях. Одной из важнейших задач сельскохозяйственного производства на данных землях является получение животноводческой продукции соответствующей действующим на территории республики нормативам [3].

В постчернобыльский период сравнительно хорошо отработаны приемы получения растениеводческой продукции с содержанием радионуклидов в пределах требований Республиканских допустимых уровней (РДУ-99). Почти все корма, производимые на загрязненных пахотных землях, могут использоваться в кормлении животных без ограничений. Пока труднее удаётся получить урожай многолетних трав с низким содержанием радионуклидов пригодный для скармливания скоту и получения качественного молока и мяса. Это обусловлено как биологическими особенностями многолетних трав, которые накапливают радионуклидов в 10–20 раз больше, чем зерновые культуры, так и частичным размещением трав на заболоченных землях, где наблюдается повышенный переход радионуклидов из почвы в растения [4, 5].

Основные защитные мероприятия в кормопроизводстве направлены на снижение поступления радионуклидов из почвы в животноводческую продукцию. Получение мясной и молочной продукции, соответствующей РДУ-99, является главной задачей ведения сельскохозяйственного производства на загрязненной территории [2]. Основная доля кормовых культур, не отвечающих требованиям допустимых уровней, производится на торфяных почвах. Поэтому проблема получения кормов, соответствующей допустимым уровням содержания  $^{137}\text{Cs}$ , на почвах данного типа остается и в настоящее время актуальной. Используя коэффициенты перехода  $^{137}\text{Cs}$  для разных видов культур и данные по агрохимическим показателям почвы, возможно спрогнозировать удельную активность  $^{137}\text{Cs}$  в сельскохозяйственной продукции.

Прогноз загрязнения зерновых культур и кормов на основе многолетней бобово-злаковой травосмеси позволяет заблаговременно планировать набор культур для возделывания на загрязненных радионуклидами землях, размещение по полям севооборотов с учетом плотности загрязнения почв и различное их использование [6].

На загрязненной территории получение кормов с известным содержанием радионуклидов начинается с прогнозирования накопления  $^{137}\text{Cs}$  в растениях. Для этого необходимы данные, имеющиеся в хозяйствах, об агрохимических и агрофизических свойствах почв, плотности их загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ , намечаемые к производству культуры и показатели коэффициентов перехода (Кп) радионуклида в звене почва-растение, получаемые из рекомендаций по ведению сельскохозяйственного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель [5]. Рекомендации по ведению сельскохозяйственного производства на радиоактивно загрязненных землях периодически издаются, в них вносятся правки показателей Кп. Правки показателей Кп вносятся из-за их меняющихся значений, на которые оказывают влияние многие факторы, к которым относятся тип почвы и её свойства, время поступления радионуклидов в почву, климатические условия и др. Поэтому точность прогнозирования накопления  $^{137}\text{Cs}$  в кормах зависит от значений показателей Кп.

Цель исследований – оценка значений Кп  $^{137}\text{Cs}$  в звене миграции почва-кормовые культуры в отдаленный постчернобыльский период.

Объектом исследований являлись кормовые культуры, возделываемые на загрязненных  $^{137}\text{Cs}$  минеральных и торфяных почвах.

Методы исследований: полевой, гамма-спектрометрический, радиохимический, агрохимический, статистического анализа.

Полевые исследования проводились путем отбора проб растительных образцов в фазы технической спелости и сопряженных почвенных

образцов в производственных посевах методом учетных площадок. Почвенные образцы отбирались из пахотного слоя (0–20 см). Представительные пробы формировались из точечных проб. Объемная масса воздушно-сухого образца почвы для проведения анализа на содержание радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  составляла 1,0 л. Из точечных растительных проб массой 0,6–1,0 кг формировали объединенную пробу в зависимости от содержания золы и сухого вещества массой 2 кг. Почвенные образцы отбирали методом конверта, т.е. один смешанный образец состоял из 5 индивидуальных проб, взятых на глубину перегнойного горизонта с площади 1 м<sup>2</sup> с помощью почвенного тростевого бура [7].

Аналитические работы выполнены в лаборатории радиоэкологии и массовых анализов. При расчете значений параметров перехода радионуклидов (Кп) использовались данные удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  (Бк/кг) сопряженных проб почв и растений. Определение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  (Бк/кг) почвы и растений выполнено на гамма-спектрометрическом комплексе «Canberra-Packard» с погрешностью не более 30 %. Статистическая обработка результатов исследований проводилась по Б. А. Доспехову [8].

В процессе исследований проведены камеральные работы по подбору административных районов и сельскохозяйственных предприятий, в которых произведен отбор проб в производственных посевах сельскохозяйственных культур, возделываемых на загрязненных радионуклидами землях. Подбор производился на основании структуры посевных площадей под урожай 2019–2020 гг. в районах Гомельской области.

С целью охвата разнообразия почв и их агрохимических показателей отбор проб производится во всех загрязненных радионуклидами районах Гомельской области. Пробы отбирались на дерново-подзолистых песчаных, супесчаных, торфяных почвах.

В ходе работы были отобраны сопряженные пробы почвы и многолетних трав, однолетних трав, зерновых и пропашных культур, овощей. Проведены аналитические работы по определению удельной активности радионуклидов в отобранных пробах сельскохозяйственных культур. В зависимости от плотности загрязнения радионуклидами территории удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в почве находилась в пределах 59–2998 Бк/кг. По степени обменной кислотности почвы относятся ко II–V группам, по содержанию подвижного калия III–VI группам. Содержание гумуса в почве составило 0,8–4,5 %, зольность торфяных почв находилась в пределах от 10 до 54 %.

При выполнении исследований получены актуализированные показатели по коэффициентам перехода радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  для сельскохозяйственных культур на различных типах почв, которые рассчитаны на основании данных по удельной активности почвы и растений. Ко-

эффективности перехода радионуклидов дифференцированы по агрохимическим показателям почвы. Для значений коэффициентов перехода  $^{137}\text{Cs}$  учитывалось содержание в почве подвижного калия. Средние значения коэффициентов перехода  $^{137}\text{Cs}$  для песчаных почв представлены в табл. 1. Из табличных данных видно, что по мере увеличения количества подвижного калия в почве Кп для зерна, соломы, сена, зеленой массы снижались.

Таблица 1.

$^{137}\text{Cs}$

2

| Культура                                       | Содержание подвижного калия, мг/кг почвы |        |         |         |      |
|------------------------------------------------|------------------------------------------|--------|---------|---------|------|
|                                                | <80                                      | 81–140 | 141–200 | 201–300 | >300 |
| Зерно (влажность 14%)                          |                                          |        |         |         |      |
| Озимая рожь                                    | –                                        | 0,11   | 0,09    | 0,08    | 0,06 |
| Яровая пшеница                                 | –                                        | –      | 0,08    | 0,06    | 0,04 |
| Озимая тритикале                               | 0,08                                     | 0,07   | 0,05    | 0,04    | 0,03 |
| Яровой ячмень                                  | –                                        | 0,11   | 0,09    | 0,07    | 0,04 |
| Овес                                           | 0,13                                     | 0,10   | 0,08    | 0,07    | 0,05 |
| Просо                                          | –                                        | –      | 0,05    | 0,03    | 0,02 |
| Солома (влажность 20%)                         |                                          |        |         |         |      |
| Озимая рожь                                    | –                                        | 0,09   | 0,07    | 0,06    | 0,03 |
| Яровая пшеница                                 | –                                        | 0,23   | 0,20    | 0,18    | 0,14 |
| Озимая тритикале                               | 0,11                                     | 0,08   | 0,07    | 0,04    | 0,02 |
| Яровой ячмень                                  | –                                        | 0,13   | 0,11    | 0,09    | 0,08 |
| Овес                                           | 0,27                                     | 0,13   | 0,07    | 0,05    | 0,03 |
| Сено (влажность 16%)                           |                                          |        |         |         |      |
| Люцерна                                        | –                                        | 0,34   | 0,26    | 0,22    | 0,18 |
| Клевер                                         | –                                        | –      | 0,21    | 0,14    | 0,11 |
| Многолетние злаковые травы на пойменных землях | 0,81                                     | 0,58   | 0,43    | –       | –    |
| Зеленая масса (влажность 82%)                  |                                          |        |         |         |      |
| Люцерна                                        | –                                        | 0,07   | 0,06    | 0,05    | 0,04 |
| Клевер                                         | –                                        | –      | 0,05    | 0,04    | 0,03 |
| Многолетние злаковые травы на пойменных землях | 0,18                                     | 0,15   | 0,10    | –       | –    |
| Кукуруза                                       | –                                        | 0,07   | 0,05    | 0,04    | 0,03 |
| Вико-овсяная смесь                             | –                                        | 0,07   | 0,04    | 0,03    | –    |
| Сенаж (влажность 55%)                          |                                          |        |         |         |      |
| Люцерна                                        | –                                        | 0,18   | 0,14    | 0,12    | 0,10 |
| Клевер                                         | –                                        | –      | 0,11    | 0,08    | 0,06 |
| Многолетние злаковые травы на пойменных землях | 0,43                                     | 0,31   | 0,23    | –       | –    |
| Вико-овсяная смесь                             | –                                        | 0,18   | 0,10    | 0,07    | –    |
| Силос (влажность 75%)                          |                                          |        |         |         |      |
| Люцерна                                        | –                                        | 0,10   | 0,08    | 0,07    | 0,05 |
| Клевер                                         | –                                        | –      | 0,06    | 0,04    | 0,03 |
| Кукуруза                                       | –                                        | 0,10   | 0,07    | 0,06    | 0,04 |

Такая же динамика снижения значений Кп характерна и для кормовых культур, выращенных на супесчаных почвах (табл. 2).

Таблица 2.

$^{137}\text{Cs}$

2

-

Ж

| Культура                               | Содержание подвижного калия, мг/кг почвы |         |         |          |
|----------------------------------------|------------------------------------------|---------|---------|----------|
|                                        | <200                                     | 201–400 | 401–600 | 601–1000 |
| Зерно (влажность 14%)                  |                                          |         |         |          |
| Озимая рожь                            | 0,26                                     | 0,19    | 0,12    | 0,07     |
| Озимая тритикале                       | –                                        | 0,18    | 0,12    | 0,10     |
| Яровой ячмень                          | –                                        | 0,16    | 0,09    | 0,08     |
| Овес                                   | 0,29                                     | –       | –       | –        |
| Озимый рапс                            | –                                        | 0,05    | 0,03    | –        |
| Солома (влажность 20%)                 |                                          |         |         |          |
| Озимая рожь                            | 0,54                                     | 0,42    | 0,19    | 0,12     |
| Овес                                   | 0,76                                     | –       | –       | –        |
| Сено (влажность 16%)                   |                                          |         |         |          |
| Многолетние злаковые травы             | 1,28                                     | 1,10    | 0,75    | 0,53     |
| Многолетние бобово-злаковые травосмеси | 1,58                                     | 1,18    | 0,91    | 0,75     |
| Зеленая масса (влажность 82%)          |                                          |         |         |          |
| Многолетние злаковые травы             | 0,28                                     | 0,21    | 0,15    | 0,11     |
| Многолетние бобово-злаковые травосмеси | 0,34                                     | 0,24    | 0,20    | 0,16     |
| Пайза                                  | 0,54                                     | 0,33    | –       | –        |
| Овес                                   | –                                        | 0,53    | 0,44    | –        |
| Кукуруза                               | –                                        | –       | 0,13    | 0,09     |
| Сенаж (влажность 55 %)                 |                                          |         |         |          |
| Многолетние злаковые травы             | 0,68                                     | 0,59    | 0,40    | 0,28     |
| Многолетние бобово-злаковые травосмеси | 0,85                                     | 0,63    | 0,49    | 0,40     |
| Пайза                                  | 1,35                                     | 0,83    | –       | –        |
| Силос (влажность 75%)                  |                                          |         |         |          |
| Кукуруза                               | –                                        | –       | 0,19    | 0,13     |
| Овес                                   | –                                        | 0,75    | 0,63    | –        |

В процессе исследований была проведена сравнительная оценка показателей  $K_p$   $^{137}\text{Cs}$  для сельскохозяйственных кормовых культур, возделываемых на дерново-подзолистых песчаных почвах предыдущего периода и установленных в период 2019–2020 гг. (рисунок) при содержании подвижного калия в диапазоне 141–200 мг/кг почвы.

В результате исследований установлена тенденция снижения коэффициентов перехода  $^{137}\text{Cs}$  для многолетних, однолетних трав и кукурузы по сравнению с  $K_p$  полученных 10 и более лет назад (предыдущие показатели взяты из базы данных Института).

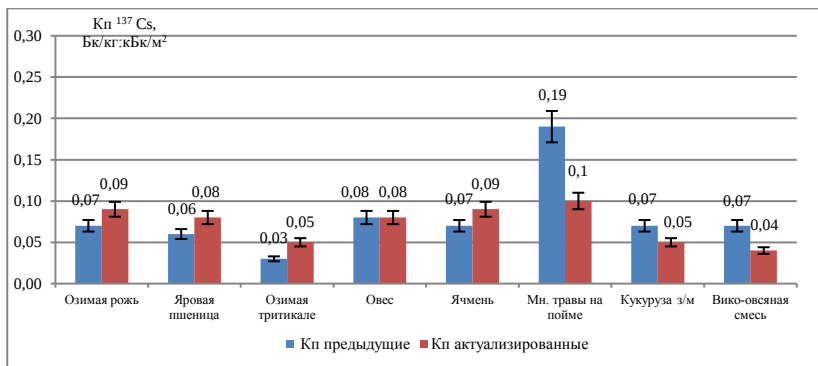


Рис. Сравнительная характеристика Кп  $^{137}\text{Cs}$  для сельскохозяйственных культур предыдущего периода и полученных в период 2019–2020 гг.

Для зерновых культур Кп  $^{137}\text{Cs}$  остались на прежнем уровне или несколько увеличены. Возможно, это связано с погодными климатическими условиями, в которых производился отбор проб. Южные районы сейчас можно отнести к пятой климатической зоне с более жаркими и засушливыми условиями, что приводит к пересыханию пахотного слоя и увеличению Кп  $^{137}\text{Cs}$ .

В результате проведенных исследований оценка распределения радионуклидов в различных типах почв и перехода их в растения дополнила информацию о процессах миграции радионуклидов и размерах коэффициентов перехода при использовании загрязненных территорий.

Полученные актуализированные коэффициенты перехода  $^{137}\text{Cs}$  для основных сельскохозяйственных культур, возделываемых на загрязненных радионуклидами дерново-подзолистых и торфяных почвах в отдаленный постчернобыльский период дополнили базу данных Института, а также использованы при подготовке к выпуску «Рекомендаций по ведению сельскохозяйственного производства на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь на 2021–2025 годы» для специалистов сельскохозяйственных предприятий.

Для прогноза содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции, получаемой на загрязненной радионуклидами территории необходимо использовать актуализированные коэффициенты перехода  $^{137}\text{Cs}$ .

Установлена тенденция снижения значений Кп  $^{137}\text{Cs}$  для травяных кормовых культур со временем, и некоторое увеличение показателей

для зерновых культур. Этот фактор необходимо учитывать при составлении рациона кормления сельскохозяйственных животных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Богдевич, И. М. Эффективность и перспективы защитных мер на загрязненных радионуклидами землях Беларуси / И. М. Богдевич // Плодородие почв – основа устойчивого развития сельского хозяйства: мат. Междун. науч.-практ. конф. и IV съезда почвоведов, Минск, 26–30 июля 2010 г.: в 2 ч. / редкол.: В. В. Лапа [и др.]. – Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск, 2010. – Ч. 1. – С. 26–28.
2. Подоляк, А. Г. Экологизация растениеводства на территории радиоактивного загрязнения: монография / А. Г. Подоляк, А. В. Крук, А. Ф. Карпенко; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель: ГГУ им. Скорины, 2020. – 334 с.
3. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь. Статистический сборник. – Мн., 2020. – С. 199. <http://www.belstat.gov.by>
4. Семененко, Н. Н. Торфяно-болотные почвы Полесья: трансформация и пути эффективного использования / Н. Н. Семененко. – Минск, 2015. – 282 с.
5. Рекомендации по ведению сельскохозяйственного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2012–2016 годы. – Минск, 2012. – 124 с.
6. Рекомендации по возделыванию многолетних бобово-злаковых многокомпонентных травосмесей на загрязненных радионуклидами торфяных почвах / Т. В. Ласько [и др.]; РНИУП «Институт радиологии» – Минск, 2015. – 33 с.
7. Крупномасштабное агрохимическое и радиологическое обследование почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь: методические указания / И. М. Богдевич [и др.]; под ред. И. М. Богдевича. – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2012. – 48 с.
8. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта: (С основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов. – (учебники и учеб. пособия для высш. с.-х. учеб. заведений). – М.: Колос, 1979. – 416 с.