

УДК 539.163:631.42:621.039.586

## СОДЕРЖАНИЕ ФОРМ $^{137}\text{Cs}$ И $^{90}\text{Sr}$ В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ БЕЛАРУСИ В ОТДАЛЕННЫЙ ПЕРИОД ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

© 2024 г. Н. Н. Цыбулько<sup>1\*</sup>, Ю. В. Путятин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Международный государственный экологический институт  
им. А.Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

\* E-mail: nik.nik1966@tut.by

Поступила в редакцию 19.10.2022 г.

После доработки 15.05.2023 г.

Принята к публикации 29.05.2024 г.

Изучено содержание форм  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в дерново-подзолистых автоморфных и полугидроморфных (глееватых) почвах разного гранулометрического состава (суглинистые, супесчаные, песчаные). Установлено, что за длительный послеаварийный период произошла трансформация в почвах форм  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , наступило динамическое равновесие в их содержании. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в доступной для растений форме составляет в настоящее время незначительную долю — 5–15%. Соединения  $^{90}\text{Sr}$ , наоборот, находятся преимущественно в легкодоступных формах, составляющих в дерново-подзолистых почвах от 60 до 75%, в среднем — 67%. Это определяет высокие переходы его в растения, особенно на минеральных почвах.

**Ключевые слова:** дерново-подзолистые почвы, гидроморфизм, гранулометрический состав,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , формы содержания

**DOI:** 10.31857/S0869803124040063, **EDN:** LODSLT

Биологическая доступность радионуклидов в значительной степени обусловлена состоянием и формами содержания их в почве, а распределение между твердой фазой почвы и почвенным раствором определяется процессами сорбции–десорбции, осаждения–растворения труднорастворимых соединений, коагуляции–пептизации коллоидных частиц.

В первые годы после аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) установлено влияние форм радиоактивных выпадений на подвижность радионуклидов в почвах. В аварийных выпадениях цезий находился в прочносвязанной форме в составе твердых топливных частиц. Значительная часть его являлась компонентом аэрозолей, что характерно для удаленных от ЧАЭС районов. В Беларуси это районы северной части Гомельской области и рай-

оны Могилевской области [1]. Поэтому, в начальный период после аварии наибольшей трансформации в почвах был подвержен  $^{137}\text{Cs}$  в “дальней” зоне. Установлено, что доступность  $^{137}\text{Cs}$  в почвах 30-километровой зоны в 1988–1989 гг. составляла в среднем 59%, а за ее пределами — 74% [2].

К октябрю 1986 г. значительная доля  $^{137}\text{Cs}$ , попавшего в почву, находилась в необменном состоянии. Суммарное содержание водорастворимой и обменной форм составляло 16–36%, прочносвязанной формы — 36–71% [3]. С увеличением времени контакта радионуклида с почвой происходило перераспределение отдельных его форм. Отмечается, что через год после аварии содержание обменной и подвижной форм  $^{137}\text{Cs}$  в 30-километровой зоне уменьшилось в 1.2–1.3 раза, а за ее пределами — в 1.7–3.0 раз [4, 5].

На дерново-подзолистых почвах Гомельской области через 3.5 года после аварии относительное содержание  $^{137}\text{Cs}$  в водорастворимом состоянии не превышало 1%, в обменном состоянии в луговых почвах 1.5–3%, в пахотных почвах — 5–10% [6, 7].

Приводятся данные [8], что в 1986 г. содержание  $^{137}\text{Cs}$  в почвах в обменной форме варьировало от 5.4 до 55.0%. Содержание подвижного  $^{137}\text{Cs}$  было выше в “дальней” зоне по сравнению с “ближней” в автоморфных почвах в 1,8 раза, в гидроморфных почвах — в 4.3 раза. Через 9 лет доля  $^{137}\text{Cs}$  в обменной форме уменьшилась в 2.3–7.3 раза, в подвижной форме — в 1.0–2.6 раза.

Известно, что для  $^{137}\text{Cs}$  характерны процессы селективной сорбции и необменной фиксации твердой фазой почв. Участвуя в кристаллохимических реакциях, он входит в межпакетные пространства кристаллических решеток глинистых минералов, где прочно закрепляется [9]. Поэтому важную роль играют минералогический и гранулометрический состав почв, структура глинистых минералов, форма и размеры частиц, содержание их в почвах [2].

Установлено, что сорбция  $^{137}\text{Cs}$  более интенсивно происходит в гидроморфных почвах, за исключением торфяно-болотных почв [2]. Процессы фиксации  $^{137}\text{Cs}$  в органогенных (торфяных) почвах протекают медленнее по сравнению с минеральными (дерново-подзолистыми) почвами вследствие того, что органические молекулы, адсорбируясь на поверхности глинистых частиц, препятствуют процессу его сорбции на сорбционных центрах между краями кристаллической решетки и диффузии внутрь решетки [10].

Известно, что поведение в почве и доступность растениям  $^{90}\text{Sr}$  отличается от  $^{137}\text{Cs}$ . При сорбции  $^{90}\text{Sr}$  решающую роль играет изоморфное замещение в минералах, содержащих  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ . Поэтому на состояние и закрепление  $^{90}\text{Sr}$  в почвенном поглощающем комплексе (ППК) существенно влияет качественный и количественный состав минеральной части почвы, особенно содержание в ней илистых частиц, а также качественный состав органического вещества [11].

Основная масса  $^{90}\text{Sr}$  выпала на почвенный покров в виде топливных частиц, часть его вступила во взаимодействие с ППК и участвовала в процессах сорбции и комплексообразования с минеральными и органическими компонентами почвы. Нерастворимая фракция  $^{90}\text{Sr}$  на начальном этапе не участвовала в обменных процессах с ППК,

а водорастворимая форма — постепенно перешла в обменную [12].

В первые годы после аварии вследствие выщелачивания  $^{90}\text{Sr}$  из топливных частиц содержание его в почвах в доступных формах возрастало, а начиная с 1990 г. содержание форм радионуклида в дерново-подзолистых почвах стабилизировалось. Приводятся данные [3], показывающие, что в первый послеварийный период содержание обменного  $^{90}\text{Sr}$  в почвах для различных территорий радиоактивного следа варьировало от 4.7 до 31%, а примерно через 3–5 лет различия практически сглаживались. В настоящее время содержание доступных растениям форм (преимущественно обменной формы)  $^{90}\text{Sr}$  в дерново-подзолистых почвах составляет 70%, в торфяных почвах — 50% [12].

Цель работы — изучить влияние степени увлажнения (гидроморфизма) и гранулометрического состава дерново-подзолистых почвах Беларуси на содержание и соотношение в них различных форм  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводили на территориях “дальней” (Славгородский район Могилевской области) и “ближней” (Наровлянский и Хойникский районы Гомельской области) зон от ЧАЭС. Объектами исследования являлись почвы пахотных, луговых и залежных земель, загрязненные  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , включая: дерново-подзолистые автоморфные супесчаные почвы на водно-ледниковых рыхлых супесях; дерново-подзолистые глееватые супесчаные почвы на водно-ледниковых рыхлых супесях; дерново-подзолистые супесчаные почвы на моренных суглинках; дерново-подзолистые оглеенные внизу песчаные почвы на связных песках; дерново-подзолистые глееватые суглинистые почвы на маломощных суглинках.

Отбор проб почвы для анализа проводили согласно Методике крупномасштабного агрохимического и радиационного обследования почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь [13]. Смешанные почвенные образцы отбирали в весенний период (1–2-я декады апреля) тростевым буром на глубину 0–20 см. Смешанный образец состоял не менее из 60 уколов (объем пробы не менее 1 дм<sup>3</sup>), что для минеральных почв составляет 1.1–1.4 кг, а для торфяных — 0.4–0.5 кг. Формирование смешанных образцов проводили методом маршрутного хода по длинной диагонали элементарных участков сельскохозяйственных

земель. Точечные пробы отбирали через равные промежутки. При отборе смешанных образцов производился замер глубины пахотного горизонта в пяти точках равномерно по маршруту их отбора с помощью тростевого бура с насечками через 5 см.

Спектрометрические измерения содержания  $^{137}\text{Cs}$  производили для каждого смешанного образца. Определение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  (Бк/кг) в исследуемых почвенных пробах выполняли на  $\gamma$ - $\beta$ -спектрометре МКС-АТ1315. Основная относительная погрешность измерений при доверительном интервале  $P = 95\%$  не превышала 15–30%. Аппаратурная ошибка измерений не превышала 15%. Радиохимическое выделение  $^{90}\text{Sr}$  проводили по МВИ. МН 1932–2003 [14, 15] с радиометрическим окончанием на низкофономом  $\alpha$ - $\beta$ -счетчике “Canberra-S5E” с погрешностью не более 20%. Формы радионуклидов в почве определяли методом последовательного экстрагирования [16]. После обработки пробы воздушно-сухой просеянной почвы (<1 мм) экстрагентами выделяли следующие фракции (экстрагируемые формы) радионуклидов: водорастворимые формы (соотношение почва: дистиллированная вода 1:10); обменные формы (в 1 моль/л растворе  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  с pH 7); подвижные формы (в 1 моль/л растворе HCl); кислотно-растворимые формы (в 6 моль/л растворе HCl); прочнофиксированные формы (в 8 моль/л растворе азотной кислоты).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования на дерново-подзолистых супесчаных автоморфной и глееватой почвах пахотных земель Славгородского района Могилевской области (“дальняя” зона от ЧАЭС) с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  соответственно 525 и 474 кБк/м<sup>2</sup> (14.2 и 12.8 Ки/км<sup>2</sup>) показали, что в водную вытяжку переходит 0.7–1.1%  $^{137}\text{Cs}$  от общего его содержания. Это, как правило, растворимые комплексные его соединения, находящиеся с компонентами почвы в нейтральной и (или) анионной форме, а также катионы  $^{137}\text{Cs}$ , десорбирующиеся из почвы по механизму ионного обмена. В ацетат-аммонийную вытяжку поступает 4.9–5.1%  $^{137}\text{Cs}$ , представляющие в основном соединения, сорбированные в почвенно-поглощающем комплексе по механизму ионного обмена. Слабым раствором соляной кислоты извлекалось 3.5–4.7% от общего содержания  $^{137}\text{Cs}$ . Это соединения, находящиеся в почве в необменном состоянии и не переходящие в почвенный раствор в обычных условиях. Сюда включаются также соединения, входящие в состав

топливных частиц и нерастворимых радионуклид-органических комплексов. Все эти формы принято считать подвижными.

Между автоморфной и глееватой почвами различия по содержанию форм  $^{137}\text{Cs}$  отмечались только по водорастворимой и подвижной формам. Автоморфная почва характеризовалась более высоким содержанием водорастворимой и меньшим — подвижной формы. Водорастворимая, обменная и подвижная формы  $^{137}\text{Cs}$  считаются доступными растениям (табл. 1).

В сумме содержание доступных форм (водорастворимая, обменная, подвижная)  $^{137}\text{Cs}$  составляло в дерново-подзолистой автоморфной почве 9.5%, недоступных форм (кислотно-растворимая, прочнофиксированная) — 90.5%. В дерново-подзолистой глееватой почве это соотношение было примерно таким же — 10.5 и 89.5% соответственно.

Исследования на дерново-подзолистых супесчаных автоморфной и глееватой почвах залежных земель с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  соответственно 840 и 992 кБк/м<sup>2</sup> (22.7 и 26.8 Ки/км<sup>2</sup>), выведенных из сельскохозяйственного пользования после аварии ЧАЭС, показали следующее. На залежных землях удельный вес недоступных форм  $^{137}\text{Cs}$  (кислотно-растворимая, прочнофиксированная) был выше, чем на пахотных землях на 5.3% на автоморфных почвах и на 8.5% — на глееватых почвах. Доля доступных форм радионуклида (водорастворимая, обменная, подвижная) в автоморфных и глееватых почвах залежных земель была значительно выше по сравнению с пахотными землями и составила соответственно 14.8 и 19.0%. Увеличение содержания доступных форм  $^{137}\text{Cs}$  произошло в основном за счет обменной формы.

Более высокое содержание в почвах пахотных земель по сравнению с почвами залежных земель недоступных форм  $^{137}\text{Cs}$  и, следовательно, ниже доля доступных форм может быть следствием применения в качестве защитных мер на загрязненных землях повышенных доз фосфорных и калийных удобрений, а также известкование почв повышенными дозами доломитовой муки.

Изучено влияние гранулометрического состава почв на содержание в них разных форм  $^{137}\text{Cs}$ . Исследования проводили на дерново-подзолистых легкосуглинистой, супесчаной и песчаной почвах на пахотных землях в Наровлянском и Хойникском районах Гомельской области (“ближняя” зона от ЧАЭС). Установлено, что количественное распределение  $^{137}\text{Cs}$  по формам нахождения зависит от гранулометрического состава почвы, осо-

**Таблица 1.** Содержание форм  $^{137}\text{Cs}$  в дерново-подзолистых супесчаных почвах разного гидроморфизма, % от общей концентрации**Table 1.** The content of  $^{137}\text{Cs}$  forms in sod-podzolic sandy loam soils of various hydromorphisms (in % of total concentration)

| Почва  | Загрязнение почв $^{137}\text{Cs}$ | Доступные формы |            |           | Недоступные формы (кислотно-растворимая, фиксированная) |
|--|------------------------------------|-----------------|------------|-----------|---|
|  |                                    | водорастворимая | обменная   | подвижная |   |
| Пахотные земли (Славгородский район Могилевской области) |                                    |                 |            |           |   |
| Дерново-подзолистая автоморфная                          | *1751<br>525(14,2)                 | 1.1<br>**±30    | 4.9<br>±7  | 3.5<br>±6 | 90.5<br>±7  |
| Дерново-подзолистая глееватая                            | 1581<br>474(12,8)                  | 0.7<br>±30      | 5.1<br>±7  | 4.7<br>±6 | 89.5<br>±7  |
| Залежные земли (Славгородский район Могилевской области) |                                    |                 |            |           |   |
| Дерново-подзолистая автоморфная                          | 2212<br>840(22,7)                  | 1.6<br>±30      | 8.3<br>±7  | 4.9<br>±6 | 85.2<br>±7  |
| Дерново-подзолистая глееватая                            | 3475<br>992(26,8)                  | 1.5<br>±30      | 11.4<br>±7 | 6.1<br>±6 | 81.0<br>±7  |

Примечание. \*Над чертой — удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в почве, Бк/кг (абс. сух. массы), под чертой — плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ , кБк/м<sup>2</sup> (Ки/км<sup>2</sup>); \*\*под чертой — погрешность измерения в процентах.

бенно по содержанию его обменной и подвижной форм. Так, в дерново-подзолистой песчаной почве на связных песках, характеризующейся низким содержанием глинистых минералов и физической глины в гранулометрическом составе, удельный вес этих форм  $^{137}\text{Cs}$  составил соответственно 10.8 и 12.7%, а сумма доступных форм (водорастворимая, обменная, подвижная) — 23.6%. Недоступные формы (кислотнорастворимая, прочнофиксированная) занимали 76.4% (табл. 2).

В дерново-подзолистой супесчаной почве на моренных суглинках содержание обменной формы  $^{137}\text{Cs}$  составило 5.0%, подвижной формы — 5.5%. В целом на доступные формы приходилось 10.6%, на недоступные формы — 89.4%, т. е. на 13% меньше, чем на песчаной почве.

В дерново-подзолистой легкосуглинистой почве на маломощных суглинках на долю недоступных растениям форм  $^{137}\text{Cs}$  приходилось 88.7%, доступных форм — 11.3%, т. е. соотношение было как для супесчаных почв на моренных суглинках. Однако в суглинистой почве по сравнению с супесчаной почвой отмечено более высокое содержание  $^{137}\text{Cs}$  в подвижной форме, но меньшее содержание в обменной форме.

Известно, что преобладающим механизмом поглощения  $^{90}\text{Sr}$  твердой фазой почвы является

ионный обмен, поэтому сорбция его зависит от концентрации в почве других катионов:  $\text{Al}^{3+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+} > \text{NH}_4^{+} > \text{Na}^{+}$  [11].

В исследованиях на пахотных и залежных землях Славгородского района Могилевской области (“дальняя” зона от ЧАЭС) на дерново-подзолистых супесчаных почвах на водно-ледниковых рыхлых супесях с плотностью загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  соответственно 74 и 93 кБк/м<sup>2</sup> (2.00 и 2.52 Ки/км<sup>2</sup>) установлено, что на почвах пахотных земель в водную вытяжку переходило 1,7% радионуклида от общего его содержания, в обменной форме находилось 52.0%, в подвижной форме — 30.6% и недоступной форме (кислотнорастворимая, фиксированная) — 15.7%. В целом до 53.7%  $^{90}\text{Sr}$  находилось в легкодоступных для растений формах (водорастворимая и обменная). На почвах залежных земель легкодоступные формы  $^{90}\text{Sr}$  составили 61,1% (табл. 3).

Изучено влияние гранулометрического состава дерново-подзолистых почв на содержание в них форм  $^{90}\text{Sr}$ . Исследования проводили на легкосуглинистой, супесчаной и песчаной почвах пахотных земель Наровлянского и Хойникского районов Гомельской области (“ближняя” зона от ЧАЭС) (табл. 4).

Поскольку  $^{90}\text{Sr}$  поглощается глинистыми минералами по механизму ионного обмена

**Таблица 2.** Содержание форм  $^{137}\text{Cs}$  в пахотном горизонте (0–20 см) дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава

**Table 2.** The content of forms  $^{137}\text{Cs}$  in the arable horizon (0–20 cm) of sod-podzolic soils of different granulometric composition

| Форма радионуклида  | Удельная активность, Бк/кг | Погрешность измерения, % | Доля от валового содержания, % |
|---|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Дерново-подзолистая песчаная почва на связных песках (Наровлянский район, Гомельская область)                       |                            |                          |                                |
| Водорастворимая форма   | 0.7                        | ±30                      | 0.1                            |
| Обменная форма  | 119                        | ±7                       | 10.8                           |
| Подвижная форма   | 140                        | ±6                       | 12.7                           |
| Кислоторастворимая форма  | 820                        | ±6                       | 74.5                           |
| Прочнофиксируемая форма   | 21.2                       | ±7                       | 1.9                            |
| Дерново-подзолистая супесчаная почва на моренных суглинках (Хойникский район, Гомельская область)                   |                            |                          |                                |
| Водорастворимая форма   | 0.4                        | ±30                      | 0.1                            |
| Обменная форма  | 23.6                       | ±7                       | 5.0                            |
| Подвижная форма   | 25.8                       | ±7                       | 5.5                            |
| Кислоторастворимая форма  | 408                        | ±6                       | 87.4                           |
| Прочнофиксируемая форма   | 9.5                        | ±8                       | 2.0                            |
| Дерново-подзолистая глееватая легкосуглинистая почва на маломощных суглинках (Хойникский район, Гомельская область) |                            |                          |                                |
| Водорастворимая форма   | 11                         | ±8                       | 0.4                            |
| Обменная форма  | 109                        | ±6                       | 3.5                            |
| Подвижная форма   | 228                        | ±6                       | 7.4                            |
| Кислоторастворимая форма  | 2620                       | ±6                       | 85.3                           |
| Прочнофиксируемая форма   | 104                        | ±7                       | 3.4                            |

**Таблица 3.** Содержание форм  $^{90}\text{Sr}$  в дерново-подзолистых супесчаных почвах на водно-ледниковых рыхлых супесях (Славгородский район Могилевской области), % от общей концентрации

**Table 3.** The content of  $^{90}\text{Sr}$  forms in sod-podzolic sandy loam soils on water-glacial loose sandy loams (in % of total concentration), Slavgorodsky district of Mogilev region

| Загрязнение почвы $^{90}\text{Sr}$ | Доступные формы   |             |             | Недоступные формы (кислото-растворимая, фиксируемая) |
|------------------------------------|-------------------|-------------|-------------|--|
|                                    | водораств-воримая | обменная    | подвижная   |  |
| Пахотные земли                     |                   |             |             |  |
| *155<br>74 (2,00)                  | 1.7<br>**±30      | 52.0<br>±25 | 30.6<br>±30 | 15.7<br>±30  |
| Залежные земли                     |                   |             |             |  |
| 254<br>93 (2,52)                   | 0.9<br>±30        | 60.2<br>±26 | 33.7<br>±35 | 5.2<br>±30   |

Примечание. \*Над чертой — удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  в почве, Бк/кг, под чертой — плотность загрязнения  $^{90}\text{Sr}$ , кБк/м<sup>2</sup> (Ки/км<sup>2</sup>); \*\*под чертой — погрешность измерения в процентах.

**Таблица 4.** Содержание форм  $^{90}\text{Sr}$  в пахотном горизонте (0–20 см) дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава**Table 4.** The content of  $^{90}\text{Sr}$  forms in the arable horizon (0–20 cm) of sod-podzolic soils of different granulometric composition

| Вытяжки, форма радионуклида  | Удельная активность, Бк/кг | Погрешность измерения, % | Доля от валового содержания, % |
|--|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Дерново-подзолистая оглеенная внизу песчаная почва на связных песках<br>(Наровлянский район, Гомельская область)       |                            |                          |                                |
| Водорастворимая форма  | 8.8                        | ±30                      | 10.4                           |
| Обменная форма   | 48.2                       | ±18                      | 56.8                           |
| Подвижная форма  | 17.1                       | ±30                      | 20.1                           |
| Кислоторастворимая форма   | 8.7                        | ±30                      | 10.2                           |
| Прочнофиксируемая форма  | 2.1                        | ±30                      | 2.5                            |
| Дерново-подзолистая супесчаная почва на моренных суглинках (Хойникский район, Гомельская область)                      |                            |                          |                                |
| Водорастворимая форма  | 7.4                        | ±30                      | 15.9                           |
| Обменная форма   | 20.4                       | ±26                      | 43.7                           |
| Подвижная форма  | 10.1                       | ±41                      | 21.6                           |
| Кислоторастворимая форма   | 7.8                        | ±40                      | 16.6                           |
| Прочнофиксируемая форма  | 1.1                        | ±40                      | 2.2                            |
| Дерново-подзолистая глееватая легкосуглинистая почва на маломощных суглинках<br>(Хойникский район, Гомельская область) |                            |                          |                                |
| Водорастворимая форма  | 9                          | ±35                      | 9.1                            |
| Обменная форма   | 65.3                       | ±17                      | 66.4                           |
| Подвижная форма  | 16.2                       | ±35                      | 16.5                           |
| Кислоторастворимая форма   | 4.1                        | ±40                      | 4.2                            |
| Прочнофиксируемая форма  | 3.7                        | ±47                      | 3.8                            |

в межслоевом пространстве, постепенно замещая обменные катионы ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), до момента установления равновесия, то в отличие от  $^{137}\text{Cs}$ , среди подвижных форм его во всех по гранулометрическому составу почвенных разностях преобладали обменные и легкорастворимые формы. Удельный вес доступных растениям форм радионуклида (водорастворимая + обменная + подвижная) составил в дерново-подзолистой песчаной почве 87.4%, в супесчаной почве — 81.2%, в легкосуглинистой почве — 92.0% от валового его содержания. В том числе на долю легкодоступных форм (водорастворимая + обменная) приходилось соответственно 67.2, 59.6 и 75.5%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Биологическая доступность радионуклидов с течением времени изменилась. За длительный послеаварийный период произошла трансформация

в почвах физико-химических форм  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , наступило динамическое равновесие в их содержании. Соединения  $^{137}\text{Cs}$  подверглись необменной фиксации, и содержание их в доступной для растений форме составляет незначительную долю — 5–15%. Соединения  $^{90}\text{Sr}$ , наоборот, находятся преимущественно в легкодоступных формах, составляющих в дерново-подзолистых почвах от 60 до 75%, в среднем — 67%. Данный факт определяет высокие переходы  $^{90}\text{Sr}$  в товарную продукцию растениеводства и корма, особенно на минеральных почвах.

Подвижность радионуклидов в почве определяется во многом генетическими свойствами почв, такими как степень гидроморфизма, гранулометрический состав. Выявлена тенденция снижения доли водорастворимых и обменных форм, доступных для растений, и увеличения доли фиксированных малодоступных форм, в почвах более тяжелого гранулометрического состава.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Отдельные этапы работы выполнены в рамках научного раздела Государственной программы по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2021–2025 годы.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексахин Р.М. Радиоактивное загрязнение почв как тип их деградации. *Почвоведение*. 2009;12:1487–1498. [Alexakhin R.M. Radioaktivnoe zagryaznenie pochv kak tip ih degradacii = Radioactive contamination of soils as a type of their degradation. *Pochvovedenie*. 2009;12:1487–1498 (In Russ.).]
2. Бондарь П.Ф., Иванов Ю.А., Озорнов А.Г. Оценка относительной биологической доступности цезия-137 в выпадениях и общей биологической доступности его в почвах на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению. *Агрохимия*. 1992;2:102–110. [Bondar P.F., Ivanov Yu.A., Ozornov A.G. Ocenka odnositel'noj biologicheskoj dostupnosti ceziya-137 v vy padeniyah i obshchej biologicheskoj dostupnosti ego v pochvah na territorii, podvergshejsya radioaktivnomu zagryazneniyu = Assessment of the relative bioavailability of caesium-137 in precipitation and its general bioavailability in soils in the territory exposed to radioactive contamination. *Agrochemistry*. 1992;2:102–110 (In Russ.).]
3. Коноплев А.В., Борзилов В.А., Бобовникова Ц.И. и др. Распределение радионуклидов, выпавших в результате аварии на Чернобыльской атомной электростанции, в системе “почва–вода”. *Метеорология и гидрология*. 1988;12: 63–74. [Konoplev A.V., Borzilov V.A., Bobovnikova Ts.I., et al. Raspredelenie radionuklidov, vypavshih v rezul'tate avarii na Chernobyl'skoj atomnoj elektrostancii, v sisteme “pochva-voda” = Distribution of radionuclides released as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant in the soil–water system. *Meteorology and hydrology*. 1988;12:63–74 (In Russ.).]
4. Суркова Л.В., Погодин Р.И. Состояние и формы нахождения цезия-137 в почвах различных зон аварийного выброса ЧАЭС. *Агрохимия*. 1991;4:84–86. [Surkova L.V., Pogodin R.I. Sostoyanie i formy nahozhdeniya ceziya-137 v pochvah razlichnyh zon avarijnogo vybrosa CHAES = The state and forms of caesium-137 in soils of various zones of emergency release of Chernobyl nuclear power plant. *Agrochemistry*. 1991;4:84–86 (In Russ.).]
5. Фесенко С.В., Спиридонов Н.И., Санжарова Н.И. Оценка периодов полуснижения содержания <sup>137</sup>Cs в корнеобитаемом слое почв луговых экосистем. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 1997;37(2):267–280. [Fesenko S.V., Spiridonov N.I., Sanzharova N.I. Ocenka periodov polusnizheniya sodержaniya <sup>137</sup>Cs v korneobitaemom sloe pochv lugovyh ekosistem = Assessment of periods of semi-decrease of <sup>137</sup>Cs content in the root layer of soils of meadow ecosystems. *Radiation Biology. Radioecology*. 1997;37(2):267–280 (In Russ.).]
6. Петряев Е.П. Экспериментальные исследования форм нахождения радионуклидов в почвах загрязненных районов Белоруссии. Принципы и методы ландшафтно-геохимических исследований миграции радионуклидов: Тез. докл. всесоюз. совещ. Суздаль, 1989. С. 104. [Petryaev E.P. Eksperimental'nye issledovaniya form nahozhdeniya radionuklidov v pochvah zagryaznennyh rajonov Belorussii = Experimental studies of the forms of radionuclides in the soils of polluted areas of Belarus. Principles and methods of landscape-geochemical studies of radionuclide migration: Tez. dokl. everywhere. the meeting. Suzdal, 1989. p. 104 (In Russ.).]
7. Гребенщикова Н.В., Подоляк А.Г. Динамика биологической доступности <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в луговых экосистемах Белорусского Полесья. Итоги научных исследований в области радиоэкологии: Сб. науч. тр. Ин-т радиологии; под ред. С.К. Фирсаковой. Гомель, 1996. С. 34. [Grebenshchikova N.V., Podolyak A.G. Dinamika biologicheskoj dostupnosti <sup>137</sup>Cs i <sup>90</sup>Sr v lugovyh ekosistemah Belorusskogo Poles'ya = Dynamics of bioavailability of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr in meadow ecosystems of the Belarusian Polesie. The results of scientific research in the field of radioecology: collection of scientific tr. Institute of Radiology; ed. by S.K. Firsakova. Gomel, 1996. p. 34 (In Russ.).]
8. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: Биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий. Под ред. чл.-корр. РАН Н.И. Санжаровой и проф. С.В. Фесенко М.: РАН, 2018. 278 с [Radioekologicheskie posledstviya avarii na Chernobyl'skoj AES: Biologicheskie efekty, migraciya, reabilitaciya zagryaznennyh territorij = Radioecological consequences of the Chernobyl accident: Biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas. Ed. by chl.-corr. RAS N.I. Sanzharova and Prof. S.V. Fesenko. M.: RAS, 2018. 278 p (In Russ.).]
9. Юдинцева Е.В., Гулякин И.В. Агрохимия радиоактивных изотопов стронция и цезия. М.: Атомиздат, 1968. 472 с [Yudintseva E.V., Gulyakin I.V. Agrohimiya radioaktivnyh izotopov stronciya i ceziya = Agrochemistry of radioactive isotopes of strontium and caesium. M.: Atomizdat, 1968. 472 p (In Russ.).]
10. Absalom J.P., Grout N.M.J., Young S.D. Modeling radiocesium fixation in upland organic soils of northwest England. *Environ. Sci. Technol.* 1996;30:2735–2741.
11. Сельскохозяйственная радиоэкология. Под ред. Р.М. Алексахина и Н.А. Корнеева. М.: Экология, 1992. 400 с [Sel'skohozyajstvennaya radioekologiya = Agricultural radioecology. Ed. by R.M. Alexakhin and N.A. Korneev. M.: Ecology, 1992. 400 p (In Russ.).]
12. 35 лет после чернобыльской катастрофы: итоги и перспективы преодоления ее последствий: национальный доклад Республики Беларусь. Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Минск: ИВЦ Минфина, 2020. 152 с [35 let posle chernobyl'skoj katastrofy: itogi i perspektivy preodoleniya ee posledstviy: nacional'nyj doklad Respubliki Belarus' = 35 years after the Chernobyl disaster: results and prospects of

- overcoming its consequences: national report of the Republic of Belarus / Department for the Elimination of the Consequences of the Chernobyl disaster of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus. Minsk: IVC of the Ministry of Finance, 2020. 152 p (In Russ.).
13. Методика крупномасштабного агрохимического и радиационного обследования почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь. И.М. Богdevич и др.; Нац. акад. наук Беларуси, Институт почвоведения и агрохимии. Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2020. 45 с [Metodika krupnomasshtabnogo agrohimicheskogo i radiacionnogo obsledovaniya pochv sel'skohozyajstvennyh zemel' Respubliki Belarus' = Methodology of large-scale agrochemical and radiation examination of soils of agricultural lands of the Republic of Belarus. I.M. Bogdevich et al.; National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Soil Science and Agrochemistry. Minsk: Institute of System Research in Agriculture of the National Academy of Sciences of Belarus, 2020. 45 p (In Russ.).]
  14. СТБ 1059.98. Радиационный контроль. Подготовка проб для определения  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Введ. 01.07.1998. Минск: Белстандарт, 1998. 22 с [STB 1059.98. Radiacionnyj kontrol'. Podgotovka prob dlya opredeleniya  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{137}\text{Cs}$  = STB 1059.98. Radiation monitoring. Sample preparation for the determination of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$ . Introduction. 01.07.1998. Minsk: Belstandart, 1998. 22 p (In Russ.).]
  15. МВИ. МН 1932-2003 “Методика радиохимического определения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в почвах и растениях без разделения в системе стронций-кальций” [MVI. MN 1932–2003 “Metodika radiohimicheskogo opredeleniya udel'noj aktivnosti  $^{90}\text{Sr}$  v pochvah i rasteniyah bez razdeleniya v sisteme stroncij-kal'cij” = MVI. MN 1932–2003 “Method of radiochemical determination of the specific activity of  $^{90}\text{Sr}$  in soils and plants without separation in the strontium-calcium system” (In Russ.).]
  16. Павлоцкая Ф. И. Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах М.: Атомиздат, 1974. 216 с [Pavlotskaya F. I. Migracija radioaktivnyh produktov global'nyh vypadenij v pochvah = Migration of radioactive products of global precipitation in soils M.: Atomizdat, 1974. 216 p (In Russ.).]

## Content of $^{137}\text{Cs}$ and $^{90}\text{Sr}$ Forms in Sod-Podzolic Soils of Belarus in the Long Period of the Accidents at the Chernobyl NPP

N. N. Tsybulka<sup>1\*</sup>, Yu. V. Putyatin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>International Sakharov Environmental Institute, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Institute of Soil Science and Agrochemistry, Minsk, Belarus

\* E-mail: nik.nik1966@tut.by

The content of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  forms in sod-podzolic automorphic and semi-hydromorphic (gleamy) soils of different granulometric composition (loamy, sandy loam, sandy) was studied. It was found that during the long post-accident period, a transformation took place in the soils of the forms  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$ , and a dynamic equilibrium in their content occurred. The content of  $^{137}\text{Cs}$  in the form available to plants is currently an insignificant proportion — 5-15%. On the contrary,  $^{90}\text{Sr}$  compounds are mainly found in readily available forms, amounting to 60 to 75% in sod-podzolic soils, on average — 67%. This determines its high transitions into plants, especially on mineral soils.

**Keywords:** soddy-podzolic soils, hydromorphism, granulometric composition,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , content forms

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цыбулько Николай Николаевич — доктор сельскохозяйственных наук, профессор. Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова Белорусского государственного университета (ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Республика Беларусь). ORCID.org/0000-0001-7746-6990. E-mail: nik.nik1966@tut.by.

Путятин Юрий Викторович — доктор сельскохозяйственных наук, профессор. Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Беларуси (ул. Казинца, 90, 220108, г. Минск, Республика Бела-

русь). ORCID.org/0000-0001-7746-6990. E-mail: put@tut.by.

### BIO NOTE

Tsybulka Mikalai — Doctor of Agricultural Sciences, Professor. International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (Dolgobrodskaya str., 23/1, 220070, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nik.nik1966@tut.by

Putyatin Yuri — Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Institute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences of Belarus (Kazinets str., 90, 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: put@tut.by.