УДК 631.43.539.16

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ^{137}Cs В ПОЧВАХ ЛЕСНЫХ БИОЦЕНОЗОВ В ОТДАЛЕННЫЙ ПЕРИОД ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Е. Б. ЕВСЕЕВ[1)], ***Н. Н. ЦЫБУЛЬКО***[2)], ***Г. Ф. ЛАСУТА***[3)]

[1)]*Полесский государственный радиационно-экологический заповедник*
ул. Терешковой, 7, 247618, г. Хойники, Беларусь
[2)]*Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,*
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь
[3)]*Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь,*
ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь

Изучены закономерности вертикального распределения ^{137}Cs чернобыльского происхождения в профиле дерново-подзолистой глеевой песчаной, торфянисто-подзолисто-глеевой и торфянисто-глеевой почв лесных биоценозов, представленных березняком черничным, березняком кисличным и березняком папоротниковым, в отдаленный послеаварийный период. Анализ вертикального распределения ^{137}Cs в почвенных профилях изучаемых типов почв показал, что процессы миграции ^{137}Cs в ненарушенных почвах лесных биоценозов протекают достаточно медленно, 85–94 % его сконцентрировано в верхнем 10-сантиметровом слое почвы. Интенсивность вертикальной миграции ^{137}Cs зависела от типовой принадлежности почв, степени их гидроморфизма, гранулометрического состава и подстилающей породы в самом верхнем слое. Более интенсивно миграция радионуклида протекала в условиях повышенного увлажнения на торфянисто-глеевой низинной, далее на дерново-подзолистой глеевой песчаной и менее интенсивно – на торфянисто-подзолисто-глеевой почвах. На торфянисто-глеевой низинной и дерново-подзолистой глеевой песчаной почвах в верхних слоях 0–5 см и 0–10 см было сосредоточено соответственно 63–66 и 85–86 % радионуклида, а центры запаса его находились на уровне 8,5 и 6,6 см. На торфянисто-подзолисто-глеевой почве в этих слоях было сконцентрировано соответственно 86 и 94 % ^{137}Cs, а центр запаса его располагался на уровне 5,8 см. Это обусловлено наличием уплотненного подзолистого горизонта.

Ключевые слова: плотность загрязнения; ^{137}Cs; вертикальная миграция; почвенный профиль; лесные биоценозы.

Образец цитирования:
Евсеев ЕБ, Цыбулько НН, Ласута ГФ. Вертикальное распределение ^{137}Cs в почвах лесных биоценозов в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2026;3:86–95.
https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-3-86-95

For citation:
Evseev EB, Tsybulka MM, Lasuta GF. Vertical distribution of ^{137}Cs in the soil profile forest biocenoses in the remote period after the Chernobyl accident. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2026;3:86–95. Russian.
https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-3-86-95

Авторы:
Евгений Борисович Евсеев – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; заведующий отделом радиационно-экологического мониторинга.
Николай Николаевич Цыбулько – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; начальник научно-исследовательского сектора.
Геннадий Федорович Ласута – кандидат сельскохозяйственных наук; профессор кафедры гуманитарных наук.

Authors:
Evgeny B. Evseev, PhD (agriculture), docent; head of the department of radiation and environmental monitoring.
evsey89@mail.ru
Mikalai M. Tsybulka, doctor of science (agriculture), full professor; head of the research sector.
nik.nik1966@list.ru
Gennady F. Lasuta, PhD (agriculture); professor of the department of humanities.
Lasuta_g@mail.ru

VERTICAL DISTRIBUTION OF ^{137}Cs IN THE SOIL PROFILE FOREST BIOCENOSES IN THE REMOTE PERIOD AFTER THE CHERNOBYL ACCIDENT

E. B. EVSEEV[a], ***M. M. TSYBULKA***[b], ***G .F. LASUTA***[c]

[a]*Polessky State Radiation and Ecological Reserve,*
7 Tserashkovay Street, Khoiniki 247618, Belarus
[b]*International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,*
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
[c]*University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus,*
25 Mashynabudaŭnikoŭ Street, Minsk 220118, Belarus
Corresponding author: E. B. Evseev (evsey89@mail.ru)

Studied of vertical distribution of ^{137}Cs of Chernobyl origin in the profile of sod-podzolic gley sandy, peat-podzolic-gley and peat-gley soils of forest biocenoses represented by blueberry birch, acid birch and fern birch in the remote post-accident period have been studied. Migration processes of ^{137}Cs in undisturbed soils of forest biocenoses proceed rather slowly. Analysis of the vertical distribution of radionuclide in the soil profiles of the studied soil types showed that 85–94 % of it is concentrated in the upper 10-centimeter soil layer. The intensity of vertical migration of ^{137}Cs depended on the type of soil, the degree of its hydromorphism, the granulometric composition and the underlying rock of the uppermost. The migration of radionuclide proceeded more intensively in conditions of increased moisture on peat-gley lowland soil, then on sod-podzolic gley sandy soil, less intensively on peat-podzolic gley soil. On peat-gley lowland and sod-podzolic gley sandy soils, 63–66 % and 85–86 % of radionuclide were concentrated in the upper layers of 0–5 and 0–10 cm, respectively, and its reserve centers were at the level of 8.5 and 6.6 cm. On peat-podzolic-gley soil, 86 and 94 % of ^{137}Cs were concentrated in these layers, respectively, and its reserve center was located at the level of 5.8 cm. This is due to the presence of a compacted podzolic horizon.

Keywords*:* pollution density; ^{137}Cs; vertical migration; soil profile; forest biocenoses.

Введение

В результате аварии на Чернобыльской АЭС радиоактивному загрязнению подверглись огромные территории, которые существенно различались, с одной стороны, по геоморфологическим и гидрологическим условиям, составу почвенного покрова, а с другой – по плотности загрязнения, составу и физико-химическим свойствам радиоактивных выпадений. Это явилось предпосылкой изучения горизонтальной и вертикальной миграции «чернобыльских» радионуклидов в различных ландшафтах.

Вертикальное распределение радионуклидов в почвенном профиле является определяющим фактором, влияющим на размеры накопления их в растениях, а также одним из параметров при определении мощности дозы γ-излучения и эффективной дозы внешнего облучения человека [1; 2]. Пространственно-временная оценка вертикального распределения радионуклидов в почве важна для прогноза поступления их в растения [3], временной динамики доз внешнего облучения [4; 5], вероятности загрязнения грунтовых вод [6].

Миграция радионуклидов в почвенном профиле происходит в результате конвективного переноса (фильтрация атмосферных осадков, капиллярный подток влаги к поверхности в результате испарения, термоперенос влаги под действием градиента температуры), диффузии свободных и адсорбированных ионов, переноса по корневым системам растений, переноса на мигрирующих коллоидных частицах, роющей деятельности почвенных животных и механической обработки почвы [7]. Передвижение радионуклидов по профилю почвы происходит как в растворе или коллоидном состоянии, так и в составе почвенных частиц [8]. Движение ^{137}Cs с инфильтрационным потоком (лессиваж) в растворе существенно замедляется по отношению к потоку воды за счет протекающих при этом процессов сорбции – десорбции и фиксации на частицах почвы. Движение содержащих радиоцезий мелких частиц почвы обусловлено просыпанием по порам, трещинам или полостям в почве, в том числе при лессиваже, а также перемещением частиц почвы под воздействием жизнедеятельности растений и биоты [8; 9]. Свойства почвы, определяющие ее сорбционную и фиксирующую способность по отношению к радионуклиду, могут существенно меняться по профилю. По глубине могут существенно изменяться такие характеристики почвы, определяющие скорость миграции радионуклидов, как пористость, плотность, гидравлическая проводимость [10].

Проведено большое количество исследований по изучению вертикальной миграции радионуклидов. Выявлено определяющее влияние на их подвижность основных почвенных свойств, гидрологических

факторов, особенностей ландшафтов на загрязненных территориях[1]. Подвижность ^{137}Cs в наибольшей степени определяется такими свойствами почв, как гранулометрический состав, содержание органического вещества, реакция почвенного раствора, емкость катионного обмена [11–13]. Отмечается более быстрая миграция ^{137}Cs в гидроморфных почвах по сравнению с автоморфными [14]. Установлены высокие скорости миграции радионуклидов в торфяных почвах и почвах легкого гранулометрического состава [15–17]. По интенсивности передвижения радионуклидов по профилю почвы различного гранулометрического состава располагаются в следующем порядке: суглинистые < осушенные торфяные < супесчаные < песчаные [18].

Характер вертикального распределения радионуклидов в почве менялся с течением времени. В начальный период после аварии поступившие на поверхность почвы радионуклиды рассматривались как «тонкая пленка», а после выпадения атмосферных осадков они стали заглубляться в почву. В 1987–1989 гг. в загрязненных почвах наблюдалась быстрая миграция радионуклидов в растворенном виде или в форме коллоидов с инфильтрационными водами [10]. В последующем в результате сорбции ^{137}Cs на почвенных глинистых минералах количество радионуклида, мигрирующего с почвенной влагой, снизилось. Как следствие, распределение ^{137}Cs в верхней и нижней части 20-сантиметрового слоя почв стало менее контрастным, вертикальный профиль концентрации его стал существенно отличаться от экспоненциального вида распределения. В настоящее время основной запас ^{137}Cs содержится в гумусовом горизонте [19].

В результате аварии на Чернобыльской АЭС радиоактивному загрязнению ^{137}Cs с плотностью ≥ 1 Ки/км^2 подверглось 20,1 тыс. кв^2 территории лесного фонда [20]. К настоящему периоду в лесных экосистемах сформировался замкнутый цикл миграции радионуклидов, состоящий из восходящей ветви, образованной поступлением их из почвы в растительность через корневые системы и нисходящей – поступление с опадом на подстилку. В дальней зоне аварии количество ^{137}Cs, циркулирующего в насаждениях на автоморфных почвах – 3–5 %, на гидроморфных почвах – 6–12 %. Большая часть запаса ^{137}Cs в лесной экосистеме сосредоточена в подстилочно-почвенном комплексе [21].

Цель исследования: установить закономерности вертикального распределения ^{137}Cs в профиле дерново-подзолистой глеевой песчаной, торфянисто-подзолисто-глеевой и торфянисто-глеевой почв лесных биоценозов (березняки – черничный, кисличный, папоротниковый).

Материалы и методы исследований

Объектами исследований являлись почвы на пунктах постоянных наблюдений (ППН – англ. points observation site (**POS**)), заложенных на территории лесного фонда Полесского государственного радиационно-экологического заповедника.

ППН № 1 расположен на территории Новопокровского лесничества (березняк черничный). Почва: дерново-подзолистая глеевая иллювиально-гумусовая песчаная, развивающаяся на связном водно-ледниковом песке. Уровень грунтовых вод на глубине 1,34 м (рис. 1).

ППН № 2 расположен на территории Новопокровского лесничества (березняк кисличный). Почва: торфянисто-подзолисто-глеевая, развивающаяся на древесных торфах, сменяемых рыхлыми водно-ледниковыми песками. Уровень грунтовых вод на глубине 1,2 м (рис. 2).

ППН № 3 расположен на территории Новопокровского лесничества (березняк папоротниковый). Почва: торфянисто-глеевая низинная, развивающаяся на древесно-травяных торфах, подстилаемая легким суглинком, сменяемым рыхлым водно-ледниковым песком на глубине 63 см. Уровень грунтовых вод на глубине 0,72 м (рис. 3).

Пробы почвы отбирали послойно до глубины 100 см. Отбор проб проводили из слоя 0–15 см с интервалом 1 см, из слоя 15–60 см – с интервалом 5 см, из слоя 60–100 см – с интервалом 10 см. Удельную активность ^{137}Cs в пробах определяли на γ-β-спектрометре *МКС-АТ1315* с блоком детектирования для регистрации γ-излучения на основе сцинтилляционного кристалла NaI (TI) размером Ø 63×63 мм с погрешностью измерений не более 20 %.

[1]Самусик И. Д. Вертикальная миграция ^{137}Cs и ^{90}Sr в дерново-подзолистых и дерновых заболоченных почвах Беларуси, влияние удобрений на поступление этих радионуклидов в многолетние злаковые травы: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук. 06.01.03. Минск, 1999. 16 с.

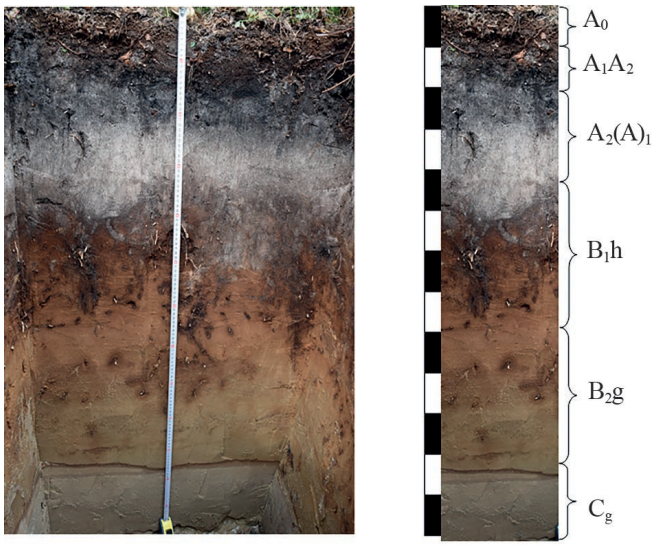


Рис. 1. Почвенный профиль ППН № 1

Fig. 1. Soil profile POS № 1



Рис. 2. Почвенный профиль ППН № 2

Fig. 2. Soil profile POS № 2



Рис. 3. Почвенный профиль ППН №3

Fig. 3. Soil profile POS № 3

Для оценки параметров вертикальной миграции ^{137}Cs в почвах рассчитывали по формуле показатель центра запаса радионуклида, характеризующий глубины, ниже и выше которых залегает 50 % общего содержания его в профиле:

$$\text{центр запаса радионуклида (см)} = \frac{\sum(A_i \times L_i)}{\sum(A_i)},$$

где A_i – плотность загрязнения i-го слоя почвы (кБк/м^2); L_i – глубина залегания i-го слоя почвы от поверхности (см).

Результаты исследования и их обсуждение

В результате исследования установлено, что спустя 38–39 лет после аварии на Чернобыльской АЭС основное количество ^{137}Cs в почвах лесных биоценозов находится в верхней части корнеобитаемого слоя.

В биоценозе березняк черничный (ППН № 1) на дерново-подзолистой глееватой иллювиально-гумусовой песчаной почве плотность загрязнения ^{137}Cs верхних ее слоев 0–1 и 1–2 см составляла 23,4 и 13,8 кБк/м^2 соответственно. С глубиной по почвенному профилю наблюдалось закономерное уменьшение содержания радионуклида. Плотность загрязнения почвенного профиля с глубины от 2–3 см до 10–15 см снизилась с 5,9 до 1,6 кБк/м^2. Плотность загрязнения радиоцезием слоев почвы глубже 15 см составляла всего 0,4–1,0 кБк/м^2 (рис. 4).

Вертикальное распределение ^{137}Cs по профилю дерново-подзолистой глееватой иллювиально-гумусовой песчаной почвы было следующим: около 86 % радионуклида сконцентрировано в слое почвы 0–10 см, в том числе 42 % – в слое 0–2 см. На глубине от 10 до 35 см находится 14 % ^{137}Cs (рис. 5).

Для оценки интенсивности вертикальной миграции радионуклидов за период, прошедший после их выпадения на поверхность почвенного покрова, используется параметр центра запаса радионуклида в почве, который представляет собой медиану распределения, характеризующую половину его запаса и соответствующую отметку в почвенном профиле [18]. В биоценозе с березняком черничным (ППН № 1) на дерново-подзолистой глеевой песчаной почве центр запаса ^{137}Cs находился на глубине 6,6 см.

Биоценоз с березняком кисличным (ППН № 2) на торфянисто-подзолисто-глеевой почве, развивающейся на древесных торфах, сменяемых рыхлыми водно-ледниковыми песками, характеризовался более высоким уровнем радиоактивного загрязнения. Так, плотность загрязнения ^{137}Cs верхних слоев почвы 0–1, 1–2 и 2–3 см составляла соответственно 210,8, 199,8 и 131,6 кБк/м^2. С глубиной поверхностная активность радионуклида в почве постепенно снижались. Плотность загрязнения ее на глубине 5–15 см составила 15,7–5,7 кБк/м^2, а на глубине 15–35 см – 5,4–1,0 кБк/м^2 (рис. 6).

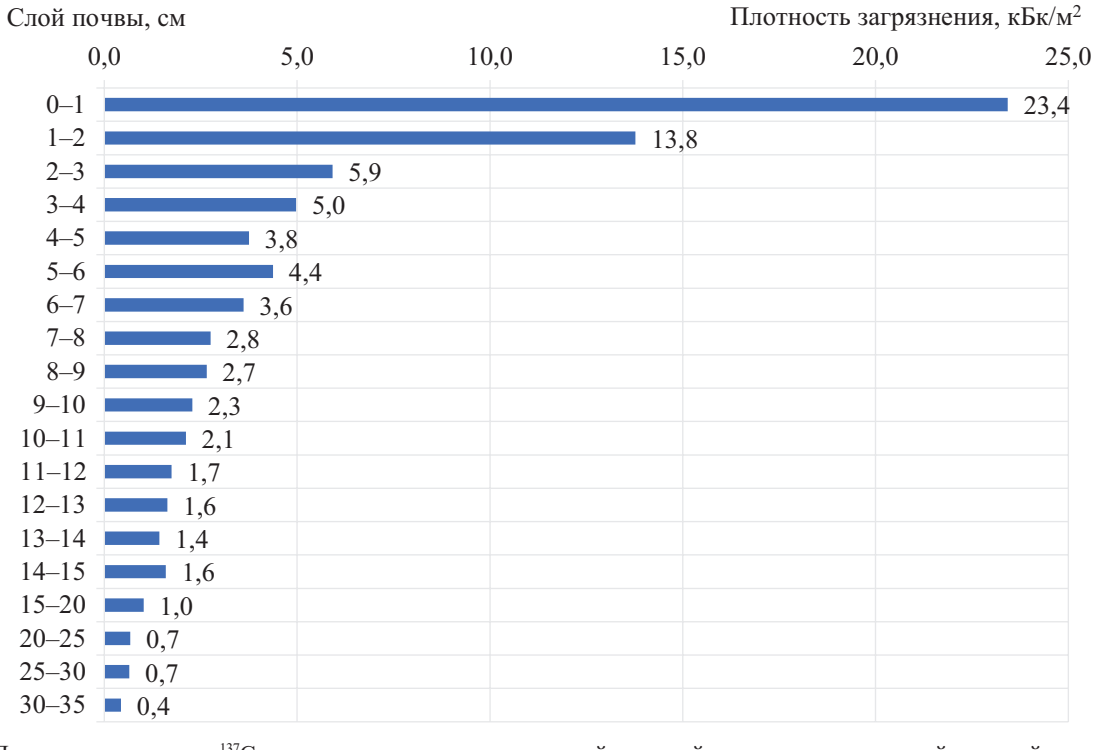


Рис. 4. Плотность загрязнения ^{137}Cs разных слоев дерново-подзолистой глееватой иллювиально-гумусовой песчаной почвы ППН № 1

Fig. 4. The density of contamination ^{137}Cs of different layers of sod-podzolic gleamy illuvial-humus sandy soil POS № 1

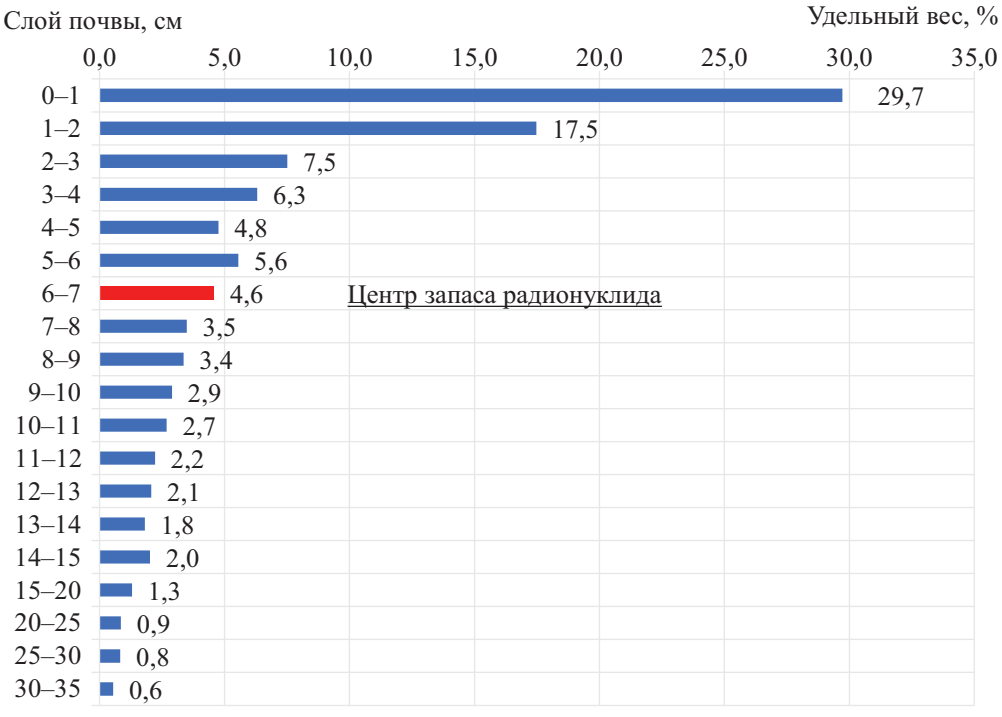


Рис. 5. Вертикальное распределение ^{137}Cs по профилю дерново-подзолистой глееватой иллювиально-гумусовой песчаной почвы ППН № 1

Fig. 5. Vertical distribution of ^{137}Cs over the profile of sod-podzolic gleamy illuvial-humus sandy soil POS № 1

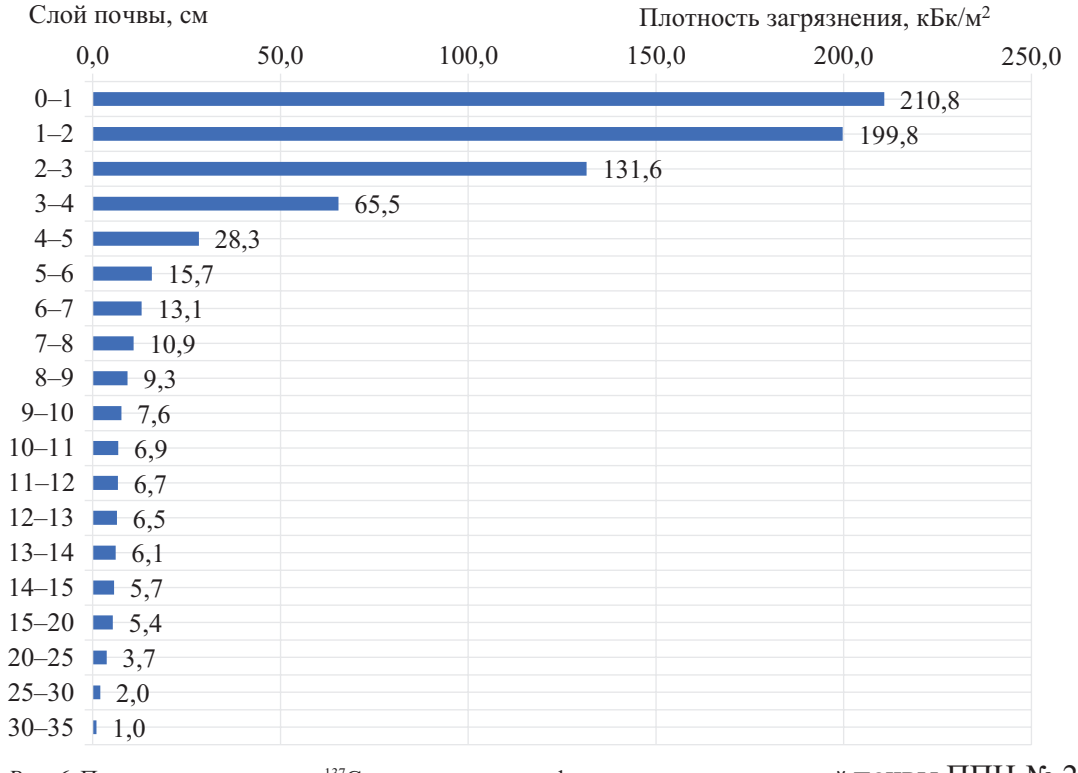


Рис. 6. Плотность загрязнения ^{137}Cs разных слоев торфянисто-подзолисто-глеевой почвы ППН № 2

Fig. 6. The pollution density is ^{137}Cs of different layers of peat-podzolic-gley soil POS № 2

Определение долевого распределения ^{137}Cs по вертикальному профилю торфянисто-подзолисто-глеевой почвы показало, что 94,0 % его концентрируется в слое 0–10 см, в том числе 55,7 % – в слое 0–2 см. На

глубине от 10 до 35 см доля ^{137}Cs всего 6 % от общего запаса. На торфяно-подзолистой почве в биоценозе с березняком кисличным центр запаса радионуклида находился на глубине 5,8 см (рис. 7).

В биоценозе с березняком папоротниковым (ППН № 3) на торфянисто-глеевой низинной почве плотность загрязнения ^{137}Cs верхнего ее слоя (0–5 см) изменялась от 30,9 до 79,5 кБк/м^2, а слоя 5–10 см – от 14,1 до 24,3 кБк/м^2. Концентрация радионуклида глубже 15 см была на порядок ниже и составляла 1,3–4,6 кБк/м^2 (рис. 8).

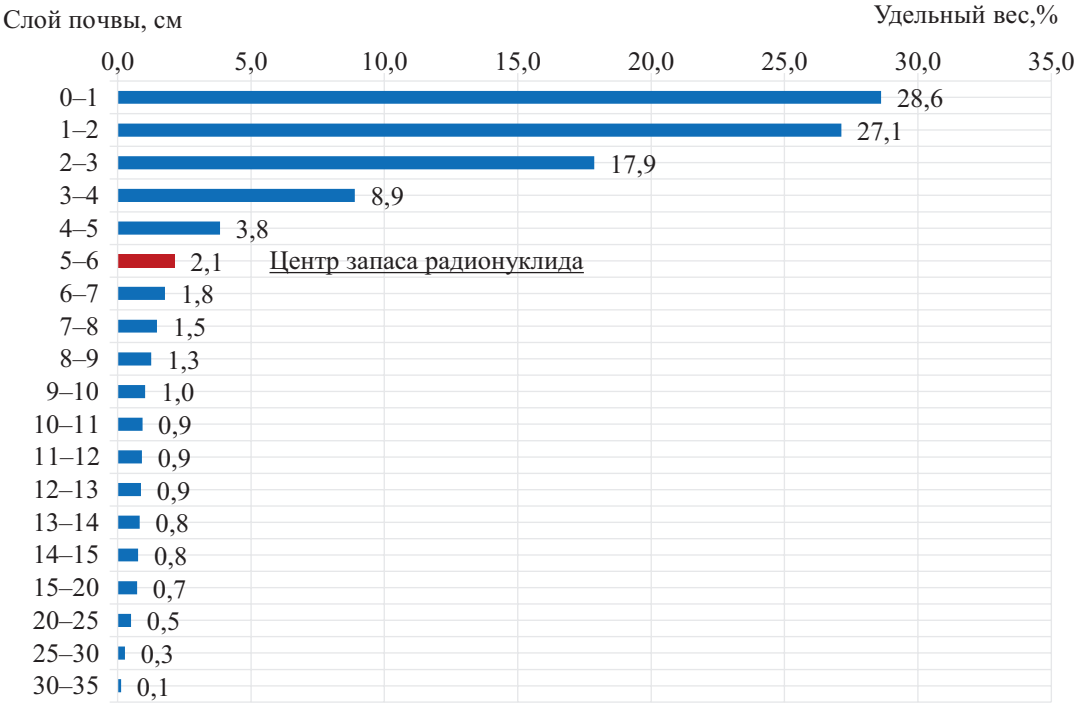


Рис. 7. Вертикальное распределение ^{137}Cs по профилю торфянисто-подзолисто-глеевой почвы ППН № 2

Fig. 7. Vertical distribution of ^{137}Cs over the profile of peat-podzolic-gley soil POS № 2

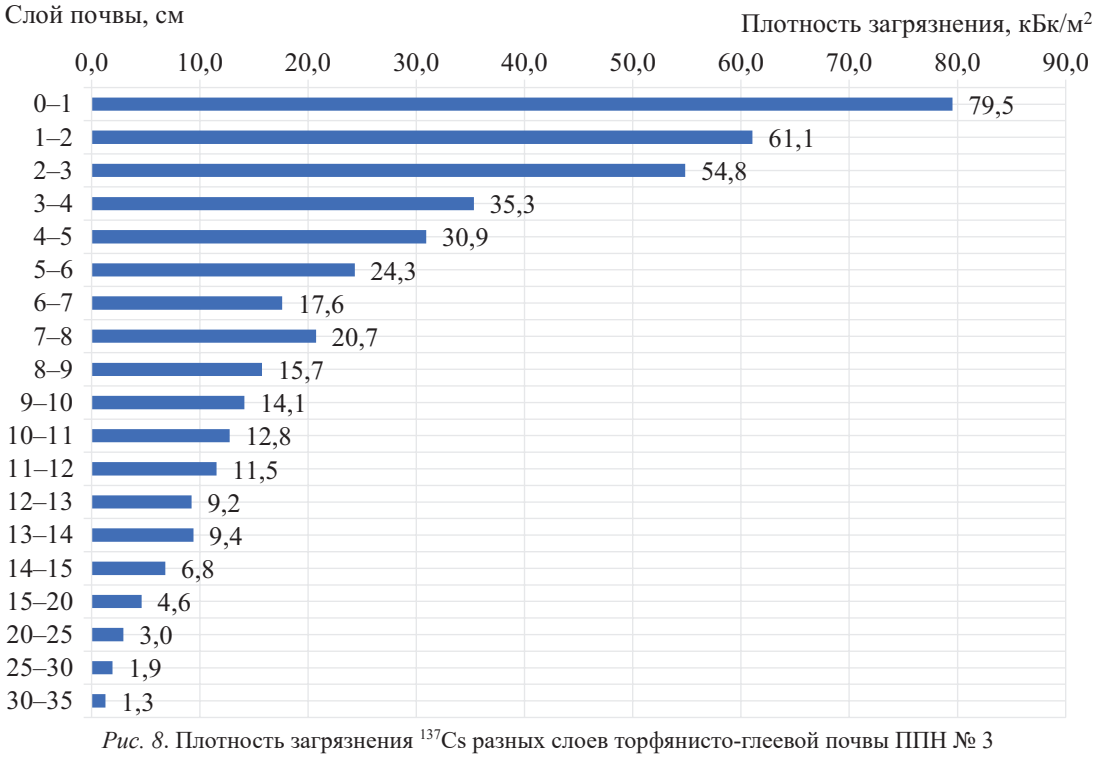


Рис. 8. Плотность загрязнения ^{137}Cs разных слоев торфянисто-глеевой почвы ППН № 3

Fig. 8. The pollution density is ^{137}Cs of different layers of peat-gley soil POS № 3

Вертикальное распределение ^{137}Cs по профилю торфянисто-глеевой почвы показало, что 85,4 % радионуклида сконцентрировано в слое почвы 0–10 см, в том числе 33,9 % – в слое 0–2 см. На глубине от 10 до 35 см находится 14,6 % ^{137}Cs. В биоценозе с березняком папоротниковым на торфянисто-глеевой почве центр запаса ^{137}Cs находился на глубине 8,5 см (рис. 9).



Рис. 9. Вертикальное распределение ^{137}Cs по профилю торфянисто-глеевой почвы ППН № 3

Fig. 9. Vertical distribution of ^{137}Cs over the profile of peat-gley soil POS № 3

Заключение

Результаты исследований показали, что миграционные процессы ^{137}Cs в естественных почвах лесных биоценозов протекают достаточно медленно и носят циклический характер, связанный с поступлением радионуклида из разложившегося слоя лесной подстилки в почву обратно при сезонных колебаниях гидротермических условий.

Анализ вертикального распределения ^{137}Cs в почвенных профилях полугидроморфной дерново-подзолистой глеевой песчаной почвы и гидроморфных торфянисто-подзолисто-глеевой и торфянисто-глеевой почв лесных биоценозов, представленных березняком черничным, березняком кисличным и березняком папоротниковым, свидетельствует, что 85–94 % радионуклида сконцентрировано в верхнем 10-сантиметровом слое почвенного профиля.

Интенсивность вертикальной миграции ^{137}Cs зависела от типовой принадлежности почв, степени их гидроморфизма, гранулометрического состава и подстилающей породы. Более интенсивно миграция радионуклида протекала в условиях повышенного увлажнения на торфянисто-глеевой низинной, далее на дерново-подзолистой глеевой песчаной и менее интенсивно на торфянисто-подзолисто-глеевой почвах. На торфянисто-глеевой и дерново-подзолистой глеевой песчаной почвах в верхних слоях 0–5 см и 0–10 см было сосредоточено соответственно 63–66 % и 85–86 % радионуклида, а центры запаса его находились на уровне 8,5 и 6,6 см. На торфянисто-подзолисто-глеевой почве в этих слоях было сконцентрировано соответственно 86 и 94 % ^{137}Cs, а центр запаса его располагался на уровне 5,8 см. Это обусловлено наличием уплотненного подзолистого горизонта.

Библиографические ссылки

1. Кузнецов ВК, Грунская ВП, Калашников КГ, Санжарова НИ. Особенности распределения ^{137}Cs в агроландшафтах склонов северной части Лесостепной зоны. *Агрохимия.* 2009;2:75–86.

2. Рамзаев ВП, Барковский АН, Варфоломеева КВ. Вертикальное распределение ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве на лугах и в лесах Брянской области в 2015–2016 гг. *Радиационная гигиена*. 2019;12(3):27–41.

3. Beresford N, Fesenko S, Konoplev A, Skuterud L, Smith J, Voigt G. Thirty years after the Chernobyl accident: What lessons have we learnt? *Journal of Environmental Radioactivity.* 2016;157:77–89.

4. Arapis G, Chesnokov A, Ivanova T, Potapov V, Sokolik G. Evaluation of dose equivalent rate reduction as a function of vertical migration of ^{137}Cs in contaminated soils. *Journal of Environmental Radioactivity* 1999;2:251–263.

5. Ramzaev V, Barkovsky A. Vertical distribution of ^{137}Cs in grassland soils disturbed by moles (Talpa europaea L.). *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;184–185:101–108.

6. Bugai DA, Waters RD, Dzhepo SP, Skalskij AS. Risks from Radionuclide Migration to Groundwater in the Chernobyl 30-km Zone. *Health Physics*. 1996;71(1):9–18.

7. Алексахин РМ, редактор. Прохоров ВМ. *Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. Физико-химические механизмы и моделирование*. Москва: Энергоатомиздат; 1981. 98 с.

8. Булгаков АА, Коноплев АВ, Попов ВЕ, Бобовникова ЦИ, Сиверина АА, Шкуратова ИГ. Механизмы вертикальной миграции долгоживущих радионуклидов в почвах 30-километровой зоны ЧАЭС. *Почвоведение*.1990;10:14–19.

9. Булгаков АА, Коноплев АВ. Моделирование вертикального переноса ^{137}Cs в почве по корневой системе дерева. *Радиационная биология. Радиоэкология*.2002;42(5):556–560.

10. Коноплев АВ, Голосов ВН, Йощенко ВИ, Нанба К, Онда Ю, Такасе Ц, Вакияма Й. Вертикальное распределение радиоцезия в почвах зоны аварии на АЭС Фукусима-1. *Почвоведение*.2016;5:620–632.

11. Агеец ВЮ. *Система радиоэкологических контрмер в агросфере Беларуси*. Минск: [б. и.]; 2001. 250 с.

12. Богдевич ИМ, Тарасюк СВ, Новикова ИИ, Довнар ВА, Карпович ИН, Третьяков ЕС. Вертикальная миграция радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах земель запаса и доступность их растениям. *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук*. 2013;3:58–70.

13. Кузнецов ВК, Спиридонов СИ, Иванов ВВ, Санжаров АИ, Князева ЕП. Динамика распределения ^{137}Cs в почвенном профиле целинных черноземов. *Агрохимический вестник.* 2020;4:12–15.

14. Щеглов АИ. *Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистема.* В: *По материалам 10-летних исследований зоне влияния аварии на ЧАЭС*. Москва: Наука; 2000. 268 с.

15. Арастович ТВ. Влияние свойств почв на процесс вертикальной миграции радионуклидов. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия аграрных наук.* 2004;2:23–25.

16. Подоляк АГ. Влияние вертикальной миграции и форм нахождения ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах на их биологическую доступность на примере естественных лугов Белорусского полесья. *Агрохимия.* 2007;2:72–82.

17. Санжарова НИ, Фесенко СВ, редакторы. *Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий*. Москва: Российская академия наук; 2018. 278 с.

18. Гребенщикова НВ, Самусев НИ, Новак АА. Поведение радионуклидов Cs в дерново-подзолистых, почвах Гомельской области. В: *Тезисы докладоа III Всесоюзной конференции по сельско-хозяйственной радиологии. Том 1.* Обнинск: [б. и.]; 1990. с. 18–19.

19. Линник ВГ, Борисов АП, Иваницкий ОМ, Мироненко ИВ, Соколов АВ. Вертикальное распределение Cs-137 в почвах агрокатен Брянской области. *Геохимия*. 2020;12(65):1198–1211.

20. Цыбулько НН, редактор. *Опыт и результаты деятельности Республики Беларусь по радиационной защите населения и реабилитации территорий радиоактивного загрязнения вследствие аварии на Чернобыльской АЭС.* Минск: ИВЦ Минфина; 2025. 212 с.

21. Булко НИ, Толкачева НВ, Потапенко АМ, Серенкова ВА, Бутьковец ВВ. Поведение ^{137}Cs в лесных почвах (факторы, динамика, прогноз). В: Ковалевич АИ, редактор. *Лесные экосистемы: современные вызовы, состояние, продуктивность и устойчивость. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Института леса НАН Беларуси (Гомель, 13–15 ноября 2020 г.).* Гомель: [б. и.]; 2020. с. 314–319.

References

1. Kuznetsov VK, Grunskaya VP, Kalashnikov KG, Sanzharova NI. *Osobennosti raspredeleniya ^{137}Cs v agrolandshaftah sklonov severnoy chasti Lesostepnoy zony* [The peculiarities of the distribution of ^{137}Cs in the navigation system are the slope of the northern part of the Forest-steppe zone]. *Agrochemistry*. 2009;2:75–86. Russian.

2. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Varfolomeeva KV. *Vertikalnoe raspredelenie ^{137}Cs v dernovo-podzolistoy peschanoy pochve na lugah i v lesah Bryanskoy oblasti v 2015–2016 gg.* [Vertical distribution of ^{137}Cs in sod-podzolic aquatic environment occurred in Meadows and Forests of the British Republic in 2015–2016]. *Radiation Hygiene*. 2019;12(3):27–41. Russian.

3. Beresford N, Fesenko S, Konoplev A, Skuterud L, Smith J, Voit G. Thirty years after the Chernobyl accident: what lessons have we learned? *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016;157:77–89.

4. Arapis G, Chesnokov A, Ivanova T, Potapov V, Sokolik G. Evaluation of dose equivalent rate reduction as a function of vertical migration of ^{137}Cs in contaminated soils. *Journal of Environmental Radioactivity* 1999;2:251–263.

5. Ramzaev V, Barkovsky A. Vertical distribution of ^{137}Cs in grassland soils disturbed by moles (Talpa europaea L.). *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;184–185:101–108.

6. Bugai DA, Waters RD, Dzhepo SP, Skalskij AS. Risks from Radionuclide Migration to Groundwater in the Chernobyl 30-km Zone. *Health Physics*. 1996;71(1):9–18.

7. Aleksakhin RM, editor. Prokhorov V. *Migraciya radioaktivnyh zagryazneniy v pochvah. Fiziko-himicheskie mekhanizmy i modelirovanie* [Migration of radioactive contamination in soils. Physico-chemical mechanisms and modeling]. Moscow: Energoatomizdat; 1981. 98 p. Russian.

8. Bulgakov AA, Konoplev AB, Popov VE, Bobovnikova QI, Siverina AA, Shkuratova IG. *Mekhanizmy vertikalnoy migracii dolgozhivushchih radionuklidov v pochvah 30-kilometrovoy zony ChAES* [Mechanisms of vertical migration of long-lived radionuclides in the soils of the 30-kilometer zone of the Chernobyl nuclear power plant]. *Soil science*. 1990;10:14–19. Russian.

9. Bulgakov AA, Konoplev AV. *Modelirovanie vertikalnogo perenosa ^{137}Cs v pochve po kornevoy sisteme dereva* [Modeling of vertical transfer of ^{137}Cs in the soil along the root system of a tree]. *Radiation biology. Radioecology*. 2002;42(5):556–560. Russian.

10. Konoplev AV, Golosov VN, Yoshchenko VI, Nanba K, Onda Yu, Takase Ts, Wakiyama Y. *Vertikalnoe raspredelenie radioceziya v pochvah zony avarii na AES Fukusima-1* [Vertical distribution of radiocesium in the soils of the Fukushima-1 NPP accident zone]. *Soil Science*. 2016;5:620–632. Russian.

11. Ageets VU. *Sistema radioekologicheskih kontrmer v agrosfere Belarusi* [The system of radioecological countermeasures in the agricultural sphere of Belarus]. Minsk: [publisher unknown]; 2001. 250 p. Russian.

12. Bogdevich IM, Tarasyuk SV, Novikova II, Dovnar VA, Karpovich IN, Tretyakov EU. *Vertikalnaya migraciya radionuklidov ^{137}Cs i ^{90}Sr v pochvah zemel zapasa i dostupnost ih rasteniyam* [Vertical migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr radionuclides in the soils of reserve lands and their availability to plants]. *Weight of the National Academy of Sciences of Belarus. Gray agricultural Sciences*. 2013;3:58–70. Russian.

13. Kuznetsov VK, Spiridonov SI, Ivanov BB, Sanzharov AI, Knyazeva EP. *Dinamika raspredeleniya ^{137}Cs v pochvennom profile celinnyh chernozemov* [Dynamics of ^{137}Cs distribution in the soil profile of virgin chernozems]. *Agrochemical bulletin*. 2020;4:12–15. Russian.

14. Shcheglov AI. *Biogeohimiya tekhnogennyh radionuklidov v lesnyh ekosistemah: Po materialam 10-letnih issledovaniy zone vliyaniya avarii na ChAES* [Biogeochemistry of technogenic radionuclides in forest ecosystems: Based on 10-year studies of the Chernobyl accident impact zone]. Moscow: Nauka; 2000. 268 p. Russian.

15. Arastovich TV. *Vliyanie svoystv pochv na process vertikalnoy migracii radionuklidov* [The influence of soil properties on the process of vertical migration of radionuclides]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of agrarian sciences*. 2004;2:23–25. Russian.

16. Podolyak AG. *Vliyanie vertikalnoy migracii i form nahozhdeniya ^{137}Cs i ^{90}Sr v pochvah na ih biologicheskuyu dostupnost na primere estestvennyh lugov Belorusskogo polesya* [The influence of vertical migration and the presence of ^{137}Cs and ^{90}Sr in soils on their bioavailability using the example of natural meadows of the Belarusian Polesie]. *Agrochemistry*. 2007;2:72–82. Russian.

17. Sanzharova NI, Fesenko SV, editors. *Radioekologicheskie posledstviya avarii na Chernobylskoy AES: biologicheskie effekty, migraciya, reabilitaciya zagryaznennyh territoriy* [Radioecological consequences of the Chernobyl accident: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated territories]. Moscow: RAS; 2018. 278 p. Russian.

18. Grebenshchikova NV, Samusev NI, Novak AA. *Povedenie radionuklidov Cs v dernovo-podzolistyh, pochvah Gomelskoy oblasti* [Behavior of Cs radionuclides in sod-podzolic soils of the Gomel region]. In: Thesis. dokl. III Vsesoyuz. Conference on Agricultural Radiology. Volume 1. Obninsk: [publisher unknown]; 1990. p. 18–19. Russian.

19. Linnik VG, Borisov AP, Ivanitsky OM, Mironenko IV, Sokolov AV. *Vertikalnoe raspredelenie Cs-137 v pochvah agrokaten Bryanskoy oblasti* [Vertical distribution of Cs-137 in agrokaten soils of the Bryansk region]. *Geochemistry*. 2020;12(65):1198–1211. Russian.

20. Tsybulko NN, editor. *Opyt i rezultaty deyatelnosti Respubliki Belarus po radiacionnoy zashchite naseleniya i reabilitacii territoriy radioaktivnogo zagryazneniya vsledstvie avarii na Chernobylskoy AES* [The experience and results of the activities of the Republic of Belarus on radiation protection of the population and rehabilitation of territories of radioactive contamination due to the Chernobyl accident]. Minsk: IVC of the Ministry of Finance; 2025. 212 p. Russian.

21. Bulko NI, Tolkacheva NV, Potapenko AM, Serenkova VA, Butkovets BB. *Povedenie* ^{137}Cs *v lesnykh pochvah (factory, dinamika, prognoz). Lesnye ekosistemy: sovremennye vyzovy, sostoyanie, produktivnost i ustoychivost. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoy 90-letiyu Instituta lesa NAN Belarusi (Gomel, 13–15 noyabrya 2020 g.)* [Behavior of ^{137}Cs in forest soils (factors, dynamics, forecast)]. In: Kovalevich AI, editor. Forest ecosystems: modern challenges, state, productivity and sustainability: proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the Institute of Forests of the National Academy of Sciences of Belarus (Gomel, 2020 November 13–15). Gomel: [publisher unknown]; 2020. p. 314–319. Russian.

Статья поступила в редколлегию 21.07.2026.
Received by editorial board 21.07.2026.