

УДК 631.453

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-SPYC-193-223



Ссылки для цитирования:

Жерненков А.О., Кузьменкова Н.В., Парамонова Т.А. Распределение ^{137}Cs в системе “агрочернозем глинисто-иллювиальный – картофель” в ореоле радиоактивного загрязнения Тульской области // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Специальный выпуск по материалам VII конференции молодых ученых “Почвоведение: Горизонты будущего. 2023”. С. 193-223. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-SPYC-193-223

Cite this article as:

Zhernenkov A.O., Kuzmenkova N.V., Paramonova T.A., ^{137}Cs distribution in the system “agrochernozem clayey-illuvial – potato” in the area of radioactive contamination of the Tula region, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, Proceedings of the VII Conference of Young Scientists “Soil Science: Horizons of the Future. 2023”, pp. 193-223, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-SPYC-193-223

Благодарность:

Исследование проводилось в рамках НИОКТР № АААА-А21-121012290189-8, выполняемой по государственному заданию, при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды” при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90119. Авторы выражают благодарность к.б.н. Комиссаровой О.Л., к.г.н. Турыкину Л.А., Денисовой О.Е., Егорову Ф.С. и Погожеву П.Е. за неоценимый вклад в проведении полевых исследований.

Acknowledgments:

The research was carried out within the framework of Research and Development Programme No. АААА-А21-121012290189-8, performed according to the State Assignment, with the support of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University “The Future of the Planet and Global Environmental Changes” with partial financial support of the Russian Foundation for Basic Research under the research project No. 20-35-90119. The authors express their gratitude to O.L. Komissarova, Ph.D in Biological Sciences, L.A. Turykin, O.E. Denisova, F.S. Egorov and P.E. Pogozhev for their invaluable contribution to the field research.

Распределение ^{137}Cs в системе “агрочернозем глинисто-иллювиальный – картофель” в ореоле радиоактивного загрязнения Тульской области

© 2024 г. А. О. Жерненков^{1*}, Н. В. Кузьменкова^{2**},
Т. А. Парамонова^{1***}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,

факультет Почвоведения,

119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.12,

*<https://orcid.org/0000-0003-4856-2312>, e-mail: zhiernienkov99@mail.ru,

***<https://orcid.org/0000-0001-8179-8074>,

e-mail: paramonovata@my.msu.ru.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,

Химический факультет,

119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 3,

**<https://orcid.org/0000-0003-0025-9998>, e-mail: kuzmenkovanv@my.msu.ru.

Поступила в редакцию 01.02.2024, после доработки 22.02.2024,

принята к публикации 21.08.2024

Резюме: Исследованы особенности вертикального распределения ^{137}Cs в профиле агрочернозема глинисто-иллювиального, а также биогенная миграция радионуклида в системе “почва–растение” агроценоза картофеля сорта “Гала” в центральной части Плавского радиоактивного пятна Тульской области. Показано, что спустя 35 лет после Чернобыльской аварии плотность поверхностного радиоактивного загрязнения пахотных почв региона превышает допустимый уровень в ≈ 5 раз. Глубина проникновения ^{137}Cs вниз по профилю в основном определяется приемами агротехнической обработки почв, и основная часть его запасов сосредоточена в верхнем 30-сантиметровом пахотном слое, что определяет прямой контакт радионуклида с подземными органами картофеля (корнями, столонами и клубнями). Несмотря на это, в растения картофеля переходит не более 0.02% общих запасов ^{137}Cs , содержащихся в системе “агрочернозем–картофель”. Также установлено, что для растений картофеля характерна контрастность распределения величин удельной активности ^{137}Cs по органам и тканям, при которой столоны и тонкие корни в наибольшей, а клубни – в наименьшей степени концентрируют радионуклид на единицу биомассы. В целом уровни накопления ^{137}Cs в сырой и сухой массе клубней картофеля, а также в продуктах, прошедших кулинарную обработку (варка “в мундире”, варка

очищенной мякоти), соответствуют санитарно-гигиеническим нормам, что обосновывает низкие радиационно-экологические риски включения картофеля в севообороты на землях сельскохозяйственного назначения в ореоле Плавского радиоактивного пятна Тульской области.

Ключевые слова: Чернобыльская авария; цезий-137 (^{137}Cs); радиоактивное загрязнение; экологические риски; чернозем.

^{137}Cs distribution in the system “agrochernozem clayey-illuvial – potato” in the area of radioactive contamination of the Tula region

© 2024 A. O. Zhernenkov^{1*}, N. V. Kuzmenkova^{2**},
T. A. Paramonova^{1***}

¹Lomonosov Moscow State University,
Faculty of Soil Science,

Bld. 12, 1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation

*<https://orcid.org/0000-0003-4856-2312>, e-mail: zhiernienkov99@mail.ru,

***<https://orcid.org/0000-0001-8179-8074>,

e-mail: paramonovata@my.msu.ru.

²Lomonosov Moscow State University,

Bld. 3, 1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,

**<https://orcid.org/0000-0003-0025-9998>, e-mail: kuzmenkovanv@my.msu.ru.

Received 01.02.2024, Revised 22.02.2024, Accepted 21.08.2024

Abstract: The features of vertical distribution of ^{137}Cs in the profile of clayey-illuvial agrochernozem, as well as biogenic migration of the radionuclide in the system “soil–plant” of potato agrocenosis have been studied. The research was conducted on the field, occupied by potato variety “Gala”, located in the central part of Plavsky radioactive hotspot of Tula region. It is shown that 35 years after the Chernobyl accident the density of surface radioactive contamination of arable soils in the region exceeds the permissible level by ≈ 5 times. The depth of ^{137}Cs penetration down the soil profile is mainly determined by methods of agrotechnical soil treatment, and the main part of its inventories is concentrated in the upper 30-cm arable layer. This results in the direct contact of the radionuclide with underground organs of potato (roots, stolons and tubers). However, no more than 0.02% of the total ^{137}Cs inventories contained in the system “agrochernozem–potato” is transferred to potato plants. It was also established that potato plants are characterized by contrasting distribution of ^{137}Cs specific activity values which varies with

organs and tissues. Stolons and thin roots accumulate the radionuclide to the greatest extent per biomass, while tubers, on the contrary, – to the least extent. In general, the levels of ^{137}Cs accumulation in the raw and dry weight of potato tubers, as well as in the products that have undergone culinary processing (boiling the unpeeled and peeled potatoes), correspond to sanitary-hygienic norms, which substantiates the low ecological risks of including potatoes in crop rotations on agricultural land in the area of the Plavsky radioactive hotspot of the Tula region.

Keywords: Chernobyl accident; cesium-137 (^{137}Cs); radioactive contamination; environmental risks; chernozem.

ВВЕДЕНИЕ

Авария на Чернобыльской АЭС в 1986 г. стала причиной радиоактивного загрязнения обширных территорий Европейского континента долгоживущим ($T_{1/2}$ 30.08 лет) техногенным радионуклидом ^{137}Cs (Live Chart of Nuclides, 2024). Среди продуктов аварийного чернобыльского выброса ^{137}Cs имел особое значение, поскольку относился к наиболее легкоплавким “летучим” элементам, достигшим тропосферного слоя в виде мелкодисперсных парогазовых аэрозолей, в то время как тугоплавкие и переходные радионуклиды (^{90}Sr , $^{238,239,240,241}\text{Pu}$, ^{241}Am и др.) были ассоциированы в составе топливных микрочастиц более крупной размерности и в основном выпали на подстилающую поверхность в радиусе нескольких десятков километров от аварийного реактора (Атлас загрязнения Европы цезием..., 1997). Благодаря же летучести ^{137}Cs , его интенсивному тропосферному переносу на большие расстояния от источника выброса и дальнейшим конденсационным выпадениям с дождевыми осадками было образовано множество удаленных от эпицентра аварии очагов загрязнения наземных экосистем с плотностью поверхностного радиоактивного загрязнения почв выше допустимого уровня 37 кБк/м^2 , суммарная площадь которых составила $216\,000 \text{ км}^2$ (Атлас загрязнения Европы цезием..., 1997).

В России наиболее значительные по интенсивности накопления в почвах ореолы загрязнения образовались на Европейской территории в Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областях. В пределах последней сформировалось Плавское радиоак-

тивное пятно (ПРП) с первичными уровнями накопления ^{137}Cs в почвах в диапазоне 185–555 кБк/м², причем более 80% почв принадлежало к пахотным угодьям как в момент Чернобыльской аварии, так и в последующие годы (Региональный доклад..., 2021). Данный факт вплоть до настоящего времени создает экологические риски распространения ^{137}Cs по коротким пищевым цепям “сельскохозяйственная культура – (сельскохозяйственное животное) – человек”.

На сегодняшний день Тульская область является одним из важнейших производителей сельскохозяйственной продукции в Центральной России. Среди культур, выращиваемых на ее территории, в частности на территории ПРП, существенную роль играет картофель, по валовому сбору которого Тульская область занимает 2-е место в стране (Регионы России..., 2022). В России картофель – традиционно выращиваемая сельскохозяйственная культура, которая занимает важное место в рационе россиян и, согласно современным требованиям здорового питания, рекомендуется к ежегодному потреблению в количестве 90 кг на человека (Рекомендации по рациональным нормам..., 2016). На территории ПРП картофель выращивается местным населением на приусадебных участках для обеспечения собственных нужд, а также занимает постоянное место в севооборотах на полях агрохолдингов и крупных фермерских хозяйств. Таким образом, распространение ^{137}Cs , накопленного в пахотных почвах ПРП, по пищевым цепям происходит как путем прямой биогенной миграции радионуклида на локальном уровне, так и на основе механизма социальной миграции (на региональном и надрегиональном уровнях).

Целью настоящей работы являлась оценка параметров биогенной миграции ^{137}Cs в системе “агрочернозем–картофель” на территории ПРП Тульской области в современный период и анализ радиационно-гигиенических рисков, создаваемых для человека при потреблении продукции растениеводства, содержащей техногенный ^{137}Cs . При этом учет накопления радиоцезия не только в поедаемых клубнях картофеля, но и в его несъедобных надземных частях, корнях и столонах позволил определить общий объем перехода радионуклида из почвы в растения, а также выявить меха-

низмы детоксикации отдельных органов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования послужил расположенный в ≈ 4 км к западу от г. Плавска (центральная часть ПРП) агроценоз картофеля, почвы и растения которого были опробованы в сентябре 2022 г. (рис. 1). Предметно изучались: почва – глинисто-иллювиальный агрочернозем, являющийся основным компонентом почвенного покрова ПРП; а также картофель (*Solanum tuberosum* L.) сорта “Гала” (“Gala”). Глинисто-иллювиальные агрочерноземы территории ПРП характеризуются типичными для Среднерусской возвышенности свойствами пахотных горизонтов: $pH_{\text{водн}} 6.3 \pm 0.4$, $C_{\text{орг}} 4.6 \pm 0.8$, гранулометрический состав легкоглинистый с преобладанием пылеватых фракций (до 84%) (Шопина и др., 2020). Сорт картофеля “Гала” введен в использование на территории России в 2008 г., имеет столовое назначение, отличается среднеранним сроком созревания, средней урожайностью 216–263 ц/га, низким содержанием крахмала (10.2–13.2%) и хорошей лежкостью (89%) (Еланский и др., 2013).

Территория ПРП располагается на Среднерусской возвышенности в пределах лесостепной зоны. Климат умеренно-континентальный со среднегодовыми температурами от 3.6 до 4.2 °C; продолжительность периода вегетации – 173–182 дн. (с середины апреля до середины октября) (Тульская область: агроклиматические условия, 2024). Согласно данным метеостанции в г. Плавск, в вегетационный сезон 2022 г. средняя температура составляла +18.1 °C, сумма выпавших осадков – 150 мм, что не отличалось от среднестатистических показателей климатической нормы района исследования (Архив погоды в Плавске, 2024).

Опорная площадка с агроценозом картофеля располагалась в транзитно-элювиальной позиции междуречья рек Плава и Локна (приток р. Плавы 1-го порядка) на абсолютной высоте 218 м с общим уклоном на северо-восток и крутизной склона $\approx 5^\circ$.



Рис. 1. Местоположение опорной площадки с агроценозом картофеля на совмещенном плане спутникового снимка программы Google Earth (2020–2021) и картосхемы загрязнения почв Тульской области после Чернобыльской аварии на период 2016 г. (Атлас современных и прогнозных аспектов..., 2009).

Fig. 1. Location of the reference plot with potato agroecosystem on the combined plan of the Google Earth satellite image (2020–2021) and the map scheme of soil contamination of the Tula region after the Chernobyl accident for the period of 2016 (Atlas of modern and forecast aspects..., 2009).

Согласно агротехнике возделывания картофеля в черноземной зоне, осенью 2021 г., предшествующей посадке, проводилась зяблевая вспашка почвы на глубину 30 см с внесением минеральных

удобрений (Диаммофоска – 450–500 кг/га, Калимаг – 350 кг/га); весной 2022 г. производилось предпосевное культивационное рыхление на глубину 8–10 см с нарезкой гребней высотой ≈ 25 см и глубокое чизелевание почвы до глубины 45–55 см, а также внесение 300–400 кг/га азотнокислого аммония и проведение мероприятий по защите растений от болезней, вредителей и сорняков; в период бутонизации картофель поливался по потребностям с помощью дождевальной установки (максимальная доза полива – 10 мм за проход), а также проводилась его внекорневая подкормка карбамидно-аммиачной смесью с внесением удобрения в количестве ≈ 150 кг/га.

Образцы почвы отбирались с поля непосредственно перед уборкой урожая из профиля до глубины 110 см по генетическим горизонтам агрочернозема: $A_{\text{пах}}'$ (культивационный) – $A_{\text{пах}}''$ (основная вспашка) – АВ – B_{Ca} – BC_{Ca} , а также послойно с шагом в 10 см с помощью кольцевого пробоотборника ПГ-450, позволяющего учитывать плотность сложения почвы. Повторность точек послойного пробоотбора почв была трехкратной. Образцы надземной и подземной биомассы картофеля отбирались отдельно также в трехкратной повторности на совмещенных с точками послойного пробоотбора почв укосных площадках площадью 0.25 м^2 , расположенных с учетом междурядий 80 ± 5 см. Дополнительно фракции растений картофеля – ягоды, листья, стебли, столоны, клубни и корни – отбирались в количестве от 1 кг (ягоды) до 10 кг (клубни) сырой массы по всей площади опорной площадки размером $25 \times 25 \text{ м}^2$.

В целях гомогенизации проб в лабораторных условиях образцы почвы взвешивались для определения полевой влажности, высушивались до воздушно-сухого состояния и измельчались на лабораторной мельнице с последующим просеиванием мелкозема через сито с диаметром ячейки 1 мм. Надземные части картофеля промывались путем замачивания и ополаскивания в текущей воде с финальной промывкой дистиллированной водой. Корни и столоны растений промывались путем первичного замачивания, переносились на сито с ячейкой 1 мм и тщательно отмывались от мелкозема почвы при многократном попеременном промывании под

напорной струей воды и замачивании в стоячей воде, фракция тонких корней собиралась на сито с диаметром ячейки 0.5 мм и в дальнейшем отмывалась от остаточной примеси почвенного мелкозема путем декантации. Разделение корней на крупную (более 2 мм) и среднюю (0.5–2 мм) фракции биомассы производилось вручную. Клубни картофеля отмывались от примесей почвы с использованием бытовой щетки-утюжка при попеременном воздействии стоячей и напорной воды. Их разделение на перидерму и мякоть осуществлялось с помощью овощечистки. После учета сырой биомассы выделенных органов и тканей растений они высушивались при 75 °С в течение 48 часов с последующим определением абсолютно сухой биомассы и содержания сухого вещества. Для дальнейших анализов пробы растений гомогенизировались путем измельчения на лабораторной мельнице.

Для определения величин удельных активностей ^{137}Cs в пробах почвы и растений применялся гамма-спектрометрический метод в геометрии “дента”, либо “чашка Петри” диаметром 4 см (для проб тонких корней). Измерения проводились на сцинтилляционном гамма-спектрометре “Мультирад” с блоком детектирования БДКС-63-01А (Россия) и программой обработки спектров “Прогресс 5.1” для почвы, или на полупроводниковом гамма-спектрометре Canberra GR 3818 с детектором из особо чистого германия HPGe (США) для фракций биомассы картофеля.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В период непосредственно после Чернобыльской аварии Плавский район Тульской области вошел в перечень пострадавших территорий и был отнесен к зоне проживания с правом на отселение, где плотность поверхностного радиоактивного загрязнения почв ^{137}Cs попадала в диапазон варьирования 185–555 кБк/м² (О социальной защите..., 1991). Опробование пахотных почв орела загрязнения спустя ≈ 35 лет после Чернобыльской аварии показало, что в отдаленный период после радиоактивных выпадений уровень накопления ^{137}Cs в пахотном 30-сантиметровом слое (система подгоризонтов $A_{\text{пах}}' - A_{\text{пах}}''$) черноземов центральной части ПРП на опорной площадке с агросистемой картофеля составил

171 ± 14 кБк/м² при средневзвешенной величине удельной активности 537 ± 101 Бк/кг (табл. 1), что все еще в ≈ 5 раз превышало допустимые в России показатели аккумуляции ¹³⁷Cs в почвах (Критерии оценки..., 1992). В подпахотном горизонте АВ также фиксировались достаточно высокие величины удельной активности и запасов ¹³⁷Cs. С учетом радионуклида, проникшего за пределы агротурбированной толщи чернозема, его общие запасы в профиле достигали 276 ± 53 кБк/м², что уже в ≈ 7.5 раз превышало нормативные величины и свидетельствовало о долговременном характере радиоактивного загрязнения наземных экосистем после крупных аварий на объектах ЯТЦ.

Показатели накопления ¹³⁷Cs в почве существенно изменялись между точками опробования, в частности, для пахотной толщи агрочерноземов коэффициент вариации C_v составлял около 20% для величин удельной активности радионуклида и около 10% – для величин его запасов. Подобная неоднородность пространственного распределения ¹³⁷Cs в почвах ПРП даже в пределах части одного пахотного угодья исходно определялась поступлением радиоактивных выпадений в наземные экосистемы территории за 1–2 инцидента дождевых осадков с 26 апреля по 10 мая 1986 г. (Арутюнян и др., 1993; Атлас современных и прогнозных аспектов..., 2009). В последующие годы различные авторы отмечали сохранение пространственной неоднородности плотности радиоактивного загрязнения агрочерноземов ПРП на участках размерах от 10×10 до 50×50 м² с коэффициентом вариации порядка 20% (Golosov et al., 1999; Липатов и др., 2007; Шамшурина и др., 2016; Zhidkin et al., 2020; Парамонова и др., 2021), что фиксировалось не только для почв пахотных угодий, но также для почв залежей и лесных экосистем (Липатов и др., 2007; Липатов и Щеглов, 2014). В целом варьирование показателей пространственной неоднородности загрязнения почв ¹³⁷Cs на уровне $\approx 20\%$, по-видимому, можно признать характерной чертой геохимических ореолов конденсационных выпадений радиоцезия (Kirchner, 2013), равно как и дочернобыльских глобальных радиоактивных выпадений (Sutherland, 1996).

Таблица 1. Вариационно-статистическая характеристика накопления ^{137}Cs в горизонтах профиля агрочернозема глинисто-иллювиального на территории ПРП (n = 3)
Table 1. Variation-statistical characterization of ^{137}Cs accumulation in horizons of agrochernozem clayey-illuvial profile on the territory of the Plavsk Radioactive Spot (n = 3)

Показатель	Горизонт, глубина (см)	Среднее	Доверительный интервал, $\pm$	Размах (min–max)	Cv, %
Удельная активность, Бк/кг	A _{пах} ' (0–12)	533.0	140.9	417.3–664.8	23
	A'' (12–30)	539.2	106.3	437.2–622.1	17
	AB (30–55)	382.9	153.3	288.5–538.0	35
	Bca (55–83)	28.3	3.9	25.0–31.9	12
	BCsa (83–110)	1.9	0.4	1.5–2.0	19
Запасы, кБк/м ²	A _{пах} ' (0–12)	68.4	13.5	64.8–81.7	16
	A _{пах} '' (12–30)	102.7	14.3	104.0–114.6	7
	AB (30–55)	95.2	32.3	83.1–127.8	30
	Bca (55–83)	8.8	2.4	9.7–10.3	4
	BCsa (83–110)	0.6	0.3	0.7–0.8	9

Основными факторами радиальной миграции ^{137}Cs в почвах являются диффузия, биотурбации, просыпание по крупным трещинам и порам, заглубление инкорпорированного в биомассу радионуклида при росте и развитии корневых систем растений, эти процессы протекают с малой интенсивностью и лишь локально; однако в почвах пахотных угодий к ним добавляется фактор агротурбаций, несоизмеримо более значимо влияющий на профильное распределение ^{137}Cs (Сельскохозяйственная радиоэкология, 1992). Миграция ^{137}Cs в растворенном состоянии для почв и ландшафтов лесостепной зоны весьма незначительна благодаря его прочной необменной фиксации в межпакетных пространствах глинистых минералов, иллита и других гидрослюдов (Sanzharova et al., 2002). Более детальное изучение радиального распределения ^{137}Cs в профиле агрочернозема ПРП с агроценозом картофеля выявило четкую связь с приемами агротехнической обработки пахотных почв: максимальные показатели отмечаются в верхних 30 см почвы, которые соответствовали общей мощности агротурбированного слоя; в пределах нижележащих слоев, вплоть до глубины 50 см, совпадающей с нижней границей обработки почвы путем глубокого чизелевания, они также были высокими; в то время как за пределами толщи почвы, охваченной агротехническими приемами, на глубине 50–60 см и ниже фиксировались лишь незначительные или следовые количества ^{137}Cs (рис. 2).

В пределах пахотного горизонта почв, регулярно подвергающегося вспашке с оборотом пласта и боронованию, величины удельной активности ^{137}Cs были распределены относительно равномерно, а увеличение величин запасов радионуклида в слое 20–30 см определялось наличием в нижней части подгоризонта $A_{\text{пах}}$ уплотненной “плужной подошвы”. Аккумуляция ^{137}Cs в пределах пахотного горизонта в целом составляла около 65% от пула радионуклида в агрочерноземе. Ниже агротурбированной толщи характер профильного распределения ^{137}Cs изменялся на регрессивно-аккумулятивный с ярко выраженным убыванием его содержания ниже 50 см.

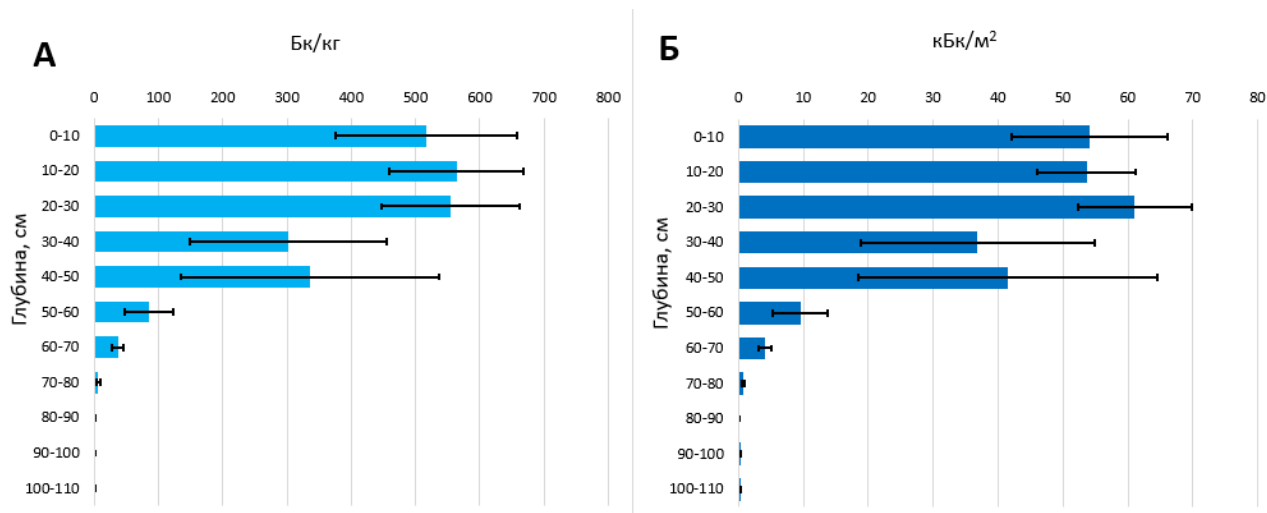


Рис. 2. Распределение средних величин удельной активности (А) и запасов (Б) ^{137}Cs по профилю агрочернозема (здесь и далее отрезки на столбиках означают доверительный интервал при $p = 0.95$ и $n = 3$).

Fig. 2. Distribution of mean values of ^{137}Cs specific activity (А) and ^{137}Cs reserves (Б) down the agrochernozen profile (here and further bars indicate confidence interval at $p = 0.95$ and $n = 3$).

В целом, глубина значимого проникновения ^{137}Cs в толщу агрочернозема (по критерию наличия 80% общих запасов) в агроценозе картофеля оценивалась как 40 см, а в слое 0–60 см, затронутом агротехническими приемами, сосредоточено $\approx 98\%$ запасов радионуклида.

Если нисходящая радиальная миграция ^{137}Cs по профилю пахотного чернозема с агроценозом картофеля определялась в основном процессами механогенеза с доминированием агрогенной компоненты, то переход ^{137}Cs из почвы в растения носил биогенный характер и зависел от ряда факторов: доли подвижных соединений в общем пуле радиоцезия, климатических и погодных условий, биологических характеристик культуры, включая видовые, сортовые, фенологические и др. особенности (Tamponnet et al., 2008; Burger and Lichtscheidl, 2018). В целом биологическая доступность ^{137}Cs для растений в агрочерноземах ПРП незначительна, поскольку доля водорастворимой фракции радионуклида составляет здесь менее 0.1%, а обменной фракции – не более 1% (Комиссарова и др., 2022). Выращиваемые на территории основные сельскохозяйственные культуры (пшеница, кукуруза, рапс и др.) также обладают способностью дискриминировать процесс корневого поглощения потенциально фитотоксичного ^{137}Cs , что снижает интенсивность его биогенной миграции в системе “почва-растение” (Komissarova, Paramonova, 2019). Анализ параметров накопления ^{137}Cs в растениях исследуемого агроценоза картофеля показал, что культура не являлась исключением из общего правила и, как и другие компоненты полевых и кормовых севооборотов на территории ПРП, относилась к дискриминаторам корневого потребления радионуклида. Так, средняя величина удельной активности ^{137}Cs в общей биомассе растений картофеля в 35 раз меньше, чем в пахотном горизонте почвы, приравнивающимся к корнеобитаемому слою, а запасы радионуклида в растительном блоке на 4 порядка меньше, чем в почвенном (табл. 2).

Между надземной (стебли, листья, ягоды) и подземной (клубни, столоны, корни) фракциями биомассы картофеля отмечалось неоднородное распределение ^{137}Cs как по показателям средних величин удельной активности, так и по емкости депонирова-

ния. Если в целом растения отличались базипетальной дифференциацией ¹³⁷Cs (т. е. более высокие значения величин удельной активности радиоцезия фиксировались в надземных органах), то основные запасы элемента сосредотачивались в подземных органах за счет доминирования их массы. Вариабельность показателей накопления ¹³⁷Cs в растениях картофеля была несколько ниже, чем в пахотном горизонте агрочернозема для величин удельной активности, и сходной с вариабельностью для почвенной компоненты для величин запасов.

Таблица 2. Вариационно-статистическая характеристика накопления ¹³⁷Cs в биомассе растений картофеля на территории ПРП (n от 3 до 6)
Table 2. Variation-statistical characterization of ¹³⁷Cs accumulation in the biomass of potato plants in the PRH territory (n from 3 to 6)

Показатель	Фракция биомассы	Среднее	Доверительный интервал, ±	Размах (min – max)	Cv, %
Удельная активность, Бк/кг	надземная	38.9	20.9	31.2–47.9	22
	подземная	9.4	0.4	7.5–11.3	12
	общая	14.4	6.6	11.5–17.5	15
Запасы, Бк/м ²	надземная	9.7	5.5	8.7–25.1	51
	подземная	11.5	2.6	8.6–13.3	22
	общая	21.2	3.6	15.5–25.0	23

Известно, что распределение минеральных веществ по органам и тканям для многих химических элементов неоднородно и зависит от их биохимических функций в растениях, а при неопределенной физиологической роли – от ряда причин, в том числе от степени фитотоксичности (Баргальи, 2005). По отношению к степени концентрации ¹³⁷Cs органы и морфоны картофеля можно было упорядочить по величине убывания показателей удельной активности в следующие ряды (рис. 3):

- для фракций надземной биомассы: стебли < плоды < листья;
- для фракций подземной биомассы: мякоть клубня < крупные корни < перидерма клубня < средние корни < тонкие корни, столоны.

Таким образом, между отдельными морфофизиологическими компонентами биомассы картофеля отмечалась 25-кратная разница по уровням удельной активности ^{137}Cs , подтверждавшая достоверность различий между ними. Более всего на единицу массы накапливали радионуклид тонкие корни, через которые осуществлялось наиболее активное всасывание ^{137}Cs в растение, а также столоны, по которым происходил нисходящий транспорт запасных веществ (крахмала) из фотосинтезирующих органов в клубни картофеля. Эти органы выполняли функции эффективных барьеров при биогенной миграции радионуклида из почвы в картофель и внутри самого растения. Подобную функцию осуществляла и перидерма клубней картофеля, в которой на единицу массы накапливалось в ≈ 4.5 раза больше ^{137}Cs , чем в мякоти клубня, состоящей в основном из тканей паренхимы. Тонкие всасывающие корни, столоны, перидерма клубней относились к компонентам подземной биомассы картофеля. Можно было бы в этой связи предположить, что причиной повышения величин удельной активности радионуклида в этих фракциях был непосредственный контакт с ^{137}Cs -содержащим мелкоземом почв. Однако в средних и крупных корнях не обнаруживалось увеличение интенсивности накопления радиоцезия. Следовательно, только органы и ткани подземной биомассы, характеризующиеся наиболее интенсивным метаболизмом и относительно обогащенные проводящими тканями (трахеидами, сосудами, ситовидными клетками и трубками), были способны к относительному концентрированию радионуклида.

Клубни картофеля по величинам удельной активности относились к фракции биомассы, в наименьшей степени накапливающей ^{137}Cs на единицу массы.

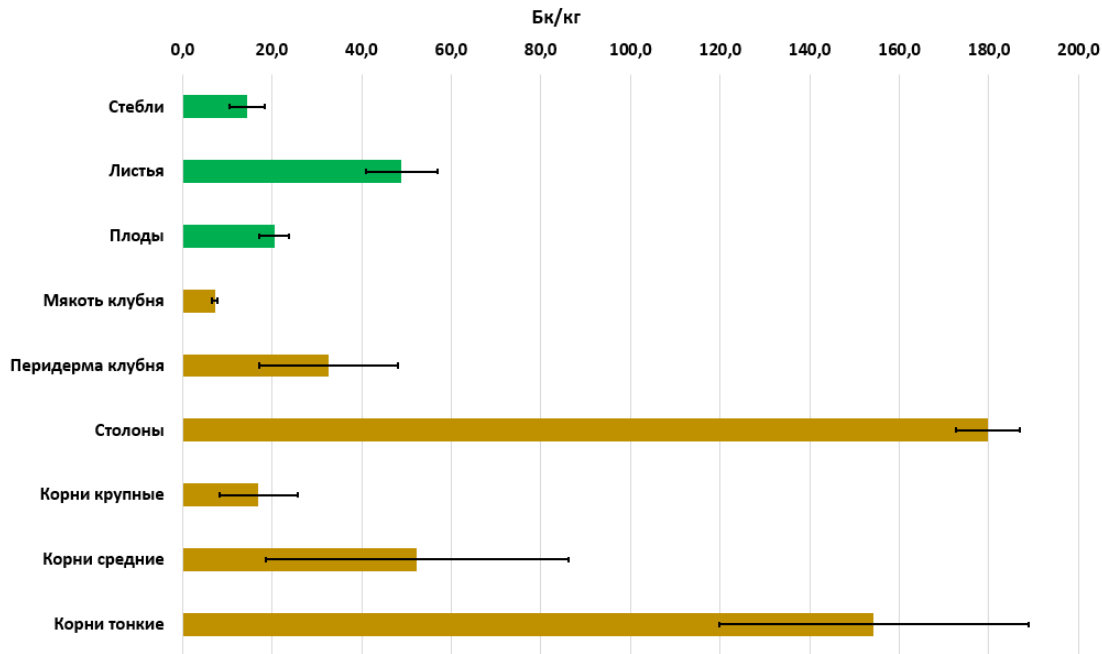


Рис. 3. Распределение средних величин удельной активности ^{137}Cs по органам и тканям растений картофеля (n от 3 до 6).

Fig. 3. Distribution of mean values of ^{137}Cs specific activity in organs and tissues of potato plants (n from 3 to 6).

Количественная оценка интенсивности перехода радионуклида из агрочерноземов ПРП в клубни картофеля по показателю коэффициента накопления (КН, равному отношению величин удельной активности радионуклида в растении, либо его части, к таковым величинам в почве) продемонстрировала хорошее согласие с величинами, установленными в более ранние сроки, которые рекомендованы МАГАТЭ в качестве ориентировочных для сочетания “почвы глинистого гранулометрического состава – клубневые культуры”:

- 2.5×10^{-2} – для зоны умеренного климата (IAEA TECDOC..., 2010);
- 4.2×10^{-2} – для зоны аридного климата (IAEA TECDOC ..., 2021);
- 2.7×10^{-2} – в настоящем исследовании.

При характерной дифференциации ^{137}Cs по фракциям биомассы картофеля объемы его депонирования в отдельных органах в большей степени определялись биологической продуктивностью культуры и структурой ее биомассы, чем зависели от особенностей распределения величин удельной активности по морфофизиологическим фракциям (рис. 4). Емкость растительной компоненты агроценоза не превышала 0.02% от пула ^{137}Cs в системе “почва–растение”, но при этом более 65% запасов ^{137}Cs , перешедшего из радиоактивно загрязненной почвы, сосредотачивалось в клубнях как в наиболее продуктивных органах картофеля и отчуждалось из локального биологического круговорота.

С учетом биологической урожайности картофеля на опорном участке, достигавшей 631 ц/га, что указывало на высокоэффективную агротехнику выращивания культуры на территории ПРП (Скрябин, 2022), в пищевые цепи населения поступало около 110 кБк/га. При этом сопоставление средней величины удельной активности ^{137}Cs в клубнях картофеля с требованиями санитарно-гигиенической безопасности продукции, потребляемой населением (Гигиенические требования..., 2011), показало, что выращиваемый на территории ПРП картофель полностью удовлетворял до-

пустимым лимитам накопления радионуклида с ≈ 50 -кратным “дефицитом” по отношению к нормативным показателям (табл. 3).

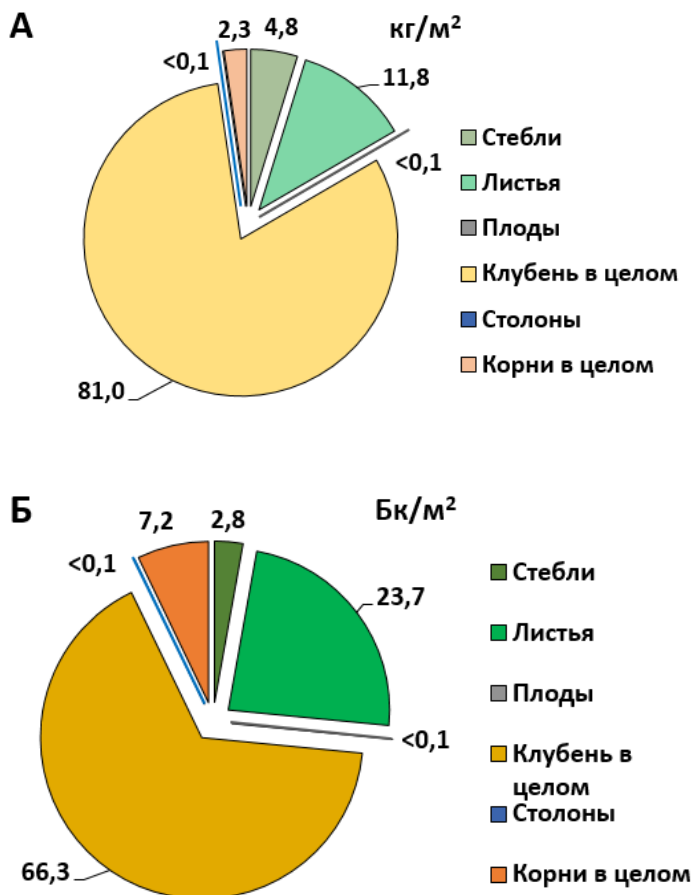


Рис. 4. Распределение долей запасов ^{137}Cs по органам растений картофеля, %.

Fig. 4. Distribution of shares of ^{137}Cs inventories among potato plant organs, %.

Таблица 3. Санитарно-гигиеническая оценка накопления ^{137}Cs в клубнях картофеля и расчет индивидуальной годовой эффективной дозы облучения (D_{eff}) для взрослого человека при поедании картофеля, выращенного на территории ПРП

Table 3. Sanitary and hygienic assessment of ^{137}Cs accumulation in potato tubers and calculation of individual annual effective radiation dose (D_{eff}) for an adult person when eating potatoes grown in the territory of the PRH

Вариант	Удельная активность ^{137}Cs , Бк/кг		Предельно допустимый уровень, Бк/кг	D_{eff} , мкЗв/год/чел	
	сырая масса	сухая масса		при потреблении по рекомендациям в РФ	при потреблении по оценке ВОЗ
Сырая масса без обработки	1.5	9.2	80	1.7×10^{-6}	1.6×10^{-12}
Клубень в мундире после варки	1.3	7.1	80	1.5×10^{-6}	1.4×10^{-12}
Очищенный клубень после варки	1.1	6.6	80	1.2×10^{-6}	1.1×10^{-12}
Чипсы из картофеля	—	9.2	600	—	—

В случае гипотетического использования картофеля столового сорта “Гала” на корм домашнему скоту и птице выявленный уровень удельной активности ^{137}Cs в клубнях также был бы на порядок меньше допустимой величины 60 Бк/кг (на сырую массу), согласно ВП 13.5.13/06-01 (введены в 2000 г., утратили силу в 2016 г.).

При изготовлении сушеного картофеля (чипсов) содержание радионуклида в готовой продукции не изменялось; однако при варке происходило некоторое увеличение массы клубней (на 3–10%) за счет связывания влаги отвара клеточным крахмалом в процессе его клейстеризации, и на этом фоне в клубнях происходило незначительное снижение величин удельной активности ^{137}Cs (на 13–27%), более заметное при варке очищенного картофеля, чем при его приготовлении “в мундире”. В этой связи сравнение величин удельной активности ^{137}Cs в клубнях картофеля после его сушки или термической кулинарной обработки с предельно допустимыми уровнями накопления радионуклида в пищевых продуктах также продемонстрировало санитарно-гигиеническую безопасность использования картофеля, выращенного в ореоле ПРП.

Дополнительный расчет годовой эффективной дозы облучения взрослого человека при поедании ^{137}Cs -содержащего картофеля, произведенного на территории ПРП, по нормам потребления в России и в странах Восточной Европы (Минздрав РФ Закон от 19.08.2016 № 614; Food regional diets, 2003) подтвердил, что величина показателя D_{eff} составляла менее 0.01% от установленной Международной комиссией по радиационной защите (ICRP) допустимой дозы облучения человека от техногенных источников, составляющей 1 мЗв в год (Use of Dose Quantities in Radiological Protection, 2021). Таким образом, совокупный анализ параметров перехода ^{137}Cs в продукцию столового картофеля сорта “Гала” на территории ПРП позволил заключить, что выращивание картофеля и его последующее потребление в пищу не создает экологических рисков для здоровья населения.

ВЫВОДЫ

1. Плотность поверхностного радиоактивного загрязнения пахотных горизонтов агрочерноземов в агроценозе картофеля на территории ПРП составляет в настоящее время 171 ± 14 кБк/м², что в ≈ 5 раз превышает допустимый уровень. При этом 65% запасов радионуклида сосредоточено в пределах горизонта $A_{\text{пах}}$, что определяет тесный контакт ^{137}Cs -содержащего мелкозема почв с корневой системой и клубнями картофеля. За пределы пахотного горизонта благодаря глубокому чизелеванию было перемещено 35% общих запасов ^{137}Cs , значимо проникшего в настоящее время до 40 см.

2. К концу вегетационного периода за счет прочной фиксации ^{137}Cs глинистыми минералами агрочерноземов и дискриминации его корневого потребления в растения картофеля переходит не более 0.02% ^{137}Cs , содержащегося в системе “почва–растение”.

3. Для картофеля характерна высокая контрастность дифференциации величин удельной активности ^{137}Cs по органам и тканям растений. Наибольшими показателями отличаются столоны (179.8 Бк/кг) и тонкие корни картофеля (154.4 Бк/кг), наименьшими – мякоть клубня (7.3 Бк/кг). Вместе с тем основным депо накопления радионуклида служат клубни картофеля, доминирующие в структуре его биомассы и накапливающие более 65% ^{137}Cs , перешедшего в процессе биогенной миграции из почвы в растение.

4. Интенсивность перехода ^{137}Cs в клубни картофеля в исследованном агроценозе на глинистом агрочерноземе хорошо согласуется с ориентировочными величинами КН, рекомендованными МАГАТЭ. Сохранение относительного постоянства величин КН для систем “почва–растение”, генерализованных на основе свойств почв и агропроизводственно-ботанических групп растений (IAEA TECDOC, 2006; IAEA TECDOC, 2010), в отдаленном периоде после чернобыльских аварийных выпадений позволяет прогнозировать уровни загрязнения сельскохозяйственной продукции, выращиваемой на землях пострадавших регионов.

5. Величины удельной активности ^{137}Cs в клубнях картофеля полностью удовлетворяют санитарно-гигиеническим нормам

СанПиН 2.3.2.1078-01 “Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов” и ограничениям индивидуальной годовой эффективной дозы для взрослого населения (в мЗв/год/чел).

6. Кулинарная обработка картофеля (сушка, отваривание очищенных и неочищенных клубней в воде) не оказывает существенного влияния на величину удельной активности ^{137}Cs в подготовленном к непосредственному потреблению человека продукте питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматический справочник по Тульской области. Упр. гидрометеорол. службы центр. областей. М., 1966. 132 с.
2. *Алексахин Р.М., Корнеева Н.А.* Сельскохозяйственная радиоэкология. М.: Экология, 1992.
3. *Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Васильев С.К., Евдокимов И.В., Петров Б.Ф., Плескачевский Л.А.* Статистические характеристики пространственного распределения загрязнения территорий радионуклидами вследствие аварии на Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. 1993. Т. 75. № 6. С. 448–453.
4. Архив погоды в Плавске. URL: [https://tp5.ru/Архив погоды в Плавске](https://tp5.ru/Архив_погоды_в_Плавске).
5. *Баргальи Р.* Биогеохимия наземных растений: экофизический подход к биомониторингу и биовосстановлению / под ред. *Касимова Н.С.* М.: Геос, 2005.
6. ВП 13.5.13/06-01 “Ветеринарно-санитарные требования к радиационной безопасности кормов, кормовых добавок, сырья кормового. Допустимые уровни содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs ” (введены в 2000 г., утратили силу в 2016 г.). URL: <https://kremlin-moscow.com/482158>.
7. *Де Корт М., Дюбуа Г., Фридман Ш.Д., Герменчук М.Г., Израэль Ю.А., ЯнсSENS А., Джонес А.Р., Келли Г.Н., Квасникова Е.В., Матвеев И.И., Назаров И.М., Покумейко Ю.М., Ситак В.А., Стукин Е.Д., Табачный Л.Я., Цатуров Ю.С., Авдюшин С.И.* Атлас загрязнения Европы цезием после Чернобыльской аварии. Люксембургское бюро для официальных изданий Европейских сообществ, 1998. 78 с.
8. *Еланский С.Н.* (общ. ред.). Сорта картофеля, возделываемые в России: М.: Агроспас, 2013. 144 с.

9. Закон РФ “О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС” от 15.05.1991 N 1244-1. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5323/.
10. Израэль Ю.А., Богдевич И.М., Марченко Т.А., Цыбулько Н.Н., Алексахин Р.М., Большой Л.А., Ильин Л.А., Квасникова Е.В., Марадудин И.И., Анципов Г.В., Герменчук М.Г., Кенигсберг Я.Э., Карбанович Л.Н., Вакуловский С.М., Гаврилин Ю.И., Горячев Е.А., Радин А.И., Раздайковин А.Н., Санжарова Н.И., Симонов А.В., Снакин В.В., Хрисанов В.Р., Челюканов В.В., Аверин В.С., Бондарь Ю.И., Булавик И.М., Жукова О.М., Конопля Е.Ф., Луговская О.М., Лукьяненко Л.А., Поплыко И.Я., Черныш А.Ф. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварий на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси. Минск, 2009. 136 с.
11. Израэль Ю.А., Назаров И.М., Фридман Ш.Д., Квасникова Е.В. Радиоактивное загрязнение Европейской части СНГ в 1992 году после аварии на Чернобыльской АЭС. Методика и некоторые результаты аэрогамма-спектральной съемки Европейской части России. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. С. 16–51.
12. Комиссарова О.Л., Парамонова Т.А., Кузьменкова Н.В., Турыкин Л.А., Павлов К.В., Щеглов А.И. Сравнительный анализ биологической миграции цезия-137 и стабильного калия в агроценозах черноземной зоны // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2022. № 4. С. 20–30.
13. Липатов Д.Н., Щеглов А.И., Цветнова О.Б. Содержание и распределение ¹³⁷Cs в почвах лесных и агроэкосистем Тульской области // Радиационная биология. Радиоэкология. 2007. Т. 47. № 5.
14. Липатов Д.Н., Щеглов А.И. Пространственное варьирование коэффициентов квазидиффузии ¹³⁷Cs в серых лесных почвах в дальней зоне загрязнения от Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т. 54. № 5.
15. Минздрав РФ. Рекомендации по рациональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающих современным требованиям здорового питания: Приказ от 19.08.2016 г. № 614. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=451458>.
16. Минприроды РФ. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. Утверждены 30.11.1992. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901797511>.
17. Парамонова Т.А., Комиссарова О.Л., Иванов М.М., Турыкин Л.А., Беляев В.Р., Мамихин С.В. Оценка пространственной неоднородности

радиоактивного загрязнения пахотных черноземов Плавского цезиевого пятна на основе случайного и систематического методов опробования // Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС. Сборник докладов междунар. научно-практической конференции. Обнинск, 2021. С. 208–211.

18. Регионы России. Основные характеристики субъектов Российской Федерации, Росстат. Статистический сборник. М.: 2022. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13205>.

19. Росреестр. Региональный доклад о состоянии и использовании земель в Тульской области в 2020 году. Тула, 2021. URL: <https://rosreestr.gov.ru/upload/to/tulskaya-oblast/statistika-i-analitika/doklady/Региональный%20Доклад%202020%20Тульская%20область.pdf>.

20. СанПиН 2.3.2.1078-01 “Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов”. URL: <https://www.madou47.ru/wp-content/uploads/2020/10/СанПиН-2.3.2.1078-01-Гигиенические-требования.pdf>.

21. Скрыбин А.А. Биологическая урожайность и ее структура разных по скороспелости сортов картофеля в зависимости от предпосадочной подготовки почвы // Е-Scio. 2022. № 1(64).

22. Тульская область: агроклиматические условия. URL: <https://yadyra.ru/agroklimaticheskie-i-pochvennie-usloviya/tulskaya-oblast-agroklimaticheskie-usloviya.html>.

23. Шамигурина Е.Н., Голосов В.Н., Иванов М.М. Пространственно-временная реконструкция поля выпадения чернобыльского ^{137}Cs на почвенный покров в верховьях бассейна реки Локны // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. № 4. С. 414–425.

24. Шопина О.В., Семенов И.Н., Пармонова Т.А., Комиссарова О.Л. Баланс элементов в системе “агрочернозем глинисто-иллювиальный – сельскохозяйственные растения” на Плавском плато (Тульская область России) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 91–108. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-105-91-108](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-105-91-108).

25. Burger A., Lichtscheidl I. Stable and radioactive cesium: A review about distribution in the environment, uptake and translocation in plants, plant reactions and plants' potential for bioremediation // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 618.

26. Golosov V.N., Panin A.V., Markelov M.V. Chernobyl ^{137}Cs Redistribution in the Small Basin of the Lokna River, Central Russia // Physics and Chemistry of the Earth, Pergamon Press Ltd., 1999.

27. *Harrison J.D., Balonov M., Bochud F.* Use of Dose Quantities in Radiological Protection, International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 147. Ann. ICRP 50. 2021.
28. *Ibragim E.G., Yakubu N., Nnamonu L., Yakubu J.M.* Gems, Food regional diets: regional per capita consumption of raw and semi-processed agricultural commodities, WHO (World Health Organization); prepared by the Global Environment Monitoring System, Food Contamination Monitoring and Assessment Programme (GEMS/Food). Geneva, 2003.
29. IAEA, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Tech. Rep. Ser. No. 472. Vienna, 2010. 340 p.
30. IAEA, Soil–Plant Transfer of Radionuclides in Non-temperate Environments. Tech. Rep. Ser. No. 1979. Vienna, 2021. 98 p.
31. IAEA, Classification of Soil Systems on the Basis of Transfer Factors of Radionuclides from Soil to Reference Plants. Tech. Rep. Ser. No. 1497. Vienna, 2006. 260 p.
32. *Kirchner G.* Establishing reference inventories of ^{137}Cs for soil erosion studies: Methodological aspects // *Geoderma*. 2013. Vol. 211–212. P. 107–115.
33. *Komissarova O., Paramonova T.* Land use in agricultural landscapes with chernozems contaminated after chernobyl accident: Can we be confident in radioecological safety of plant foodstuff // *International Soil and Water Conservation Research*. 2019. Vol. 7. No. 2. P. 158–166.
34. Live Chart of Nuclides. URL: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.
35. *Sanzharova N.I., Fesenko S.V., Spiridonov S.* The Classification of Russian Soils on the Basis of Transfer Factors of Radionuclides from Soil to Farm Crops // *Radioprotection*. 2002. No. 37. C1-521-C1-526. DOI: [10.1051/radiopro/2002097](https://doi.org/10.1051/radiopro/2002097).
36. *Sutherland R.A.* Caesium-137 soil sampling and inventory variability in reference locations: a literature survey // *Hydrological Processes*. 1996. Vol. 10. P. 43–53.
37. *Tamponnet C., Martin-Garin A., Gonze M.A., Parekh N., Vallejo R., Sauras-Yeaha T., Casadesus J., Plassard C., Staunton S., Norden M., Avila R., Shaw G.* An overview of BORIS: Bioavailability of radionuclides in soils // *J. Environ. Radioact.* 2008. Vol. 99. P. 820–830.
38. *Zhidkin A.P., Shamshurina E.N., Golosov V.N., Komissarov M.A., Ivanova N.N., Ivanov M.M.* Detailed study of post-Chernobyl Cs-137 redistribution in the soils of a small agricultural catchment (Tula region, Russia) // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020.

REFERENCES

1. *Agroklimaticheskij spravochnik po Tul'skoj oblasti*. Upr. gidrometeorol. sluzhby centr. oblastej (Agroclimatic reference book for the Tula region. Dep. hydrometeorol. service center region), Moscow, 1966, 132 p.
2. Aleksahin R.M., Korneeva N.A., Sel'skhozjajstvennaja radiojekologija (Agricultural radioecology), Moscow: Ekologija, 1992.
3. Arutjunjan R.V., Bol'shov L.A., Vasil'ev S.K., Evdokimov I.V., Petrov B.F., Pleskachevskij L.A., Statisticheskie harakteristiki prostranstvennogo raspredelenija zagriznjenja territorij radionuklidami vsledstvie avarii na Chernobyl'skoj AES (Statistical characteristics of the spatial distribution of contamination of territories with radionuclides due to the accident at the Chernobyl nuclear power plant), *Atomnaja energija*, 1993, Vol. 75, No. 6, pp. 448–453.
4. Weather archive in Plavsk, URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Плавске.
5. Bargalyi R., Kasimov N.S. (Ed.), *Biogeoхимия наземных растений: экофизический подход к биомониторингу и биовосстановлению* (Biogeochemistry of terrestrial plants: an ecophysical approach to biomonitoring and biorecovery), Moscow: Geos, 2005.
6. VP 13.5.13/06-01 “Veterinary and sanitary requirements for radiation safety of feed, feed additives, feed raw materials. Permissible levels of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs” (introduced in 2000, expired in 2016), URL: <https://kremlin-moscow.com/482158>.
7. De Kort M., Dubois G., Friedman Sh.D., Germenchuk M.G., Israel Yu.A., Janssens A., Jones A.R., Kelly G.N., Kvasnikova E.V., Matveenko I.I., Nazarov I.M., Pokumeiko Yu.M., Sitak V.A., Stukin E.D., Tabachny L.Ya., Tsurov Yu.S., Avdyushin S.I., *Atlas zagriznjenja Evropy ceziem posle Chernobyl'skoj avarii* (Atlas of cesium contamination of Europe after the Chernobyl accident), Luxembourg Office for Official Publications of the European Communities, 1998. 78 p.
8. Elansky S.N. (Ed.), *Sorta kartofelja, vzdelyvaemye v Rossii* (Potato varieties cultivated in Russia), Moscow: Agrosplas, 2013, 144 p.
9. Law of the Russian Federation “On social protection of citizens exposed to radiation as a result of the Chernobyl nuclear power plant disaster” dated 15.05.1991 No. 1244-1, URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5323/.
10. Israel Yu.A., Bogdevich I.M., Marchenko T.A., Tsybulko N.N., Aleksakhin R.M., Bolshov L.A., Ilyin L.A., Kvasnikova E.V., Maradudin I.I., Antsipov G.V., Germenchuk M.G., Koenigsberg Ya.E., Karbanovich L.N.,

Vakulovsky S.M., Gavrilin Yu.I., Goryachev E.A., Radin A.I., Razdaivodin A.N., Sanzharova N.I., Simonov A.V., Snakin V.V., Khrisanov V.R., Chelyukanov V.V., Averin V.S., Bondar Yu.I., Bulavik I.M., Zhukova O.M., Hemp E.F., Lugovskaya O.M., Lukyanenko L.A., Poplyko I.Ya., Chernysh A.F., (Atlas of current and forecast aspects of the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant in the affected territories of Russia and Belarus), Minsk, 2009. 136 p.

11. Izrael Yu.A., Nazarov I.M., Fridman Sh.D., Kvasnikova E.V., *Radioaktivnoe zagryaznenie Evropejskoj chasti SNG v 1992 godu posle avarii na Chernobyl'skoj AJeS. Metodika i nekotorye rezul'taty aero-gamma-spektral'noj s'emki Evropejskoj chasti Rossii* (Radioactive contamination of the European part of the CIS in 1992 after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. Methodology and some results of airborne gamma-spectral survey of the European part of Russia), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1994, pp. 16–51.

12. Komissarova O.L., Paramonova T.A., Kuzmenkova N.V., Turykin L.A., Pavlov K.V., Shcheglov A.I., *Sravnitel'nyj analiz biologicheskoy migracii cezija-137 i stabil'nogo kalija v agrocenozah chernozemnoj zony* (Comparative analysis of biological migration of cesium-137 and stable potassium in agrocenoses of the chernozem zone), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*, 2022, No. 4, pp. 20–30.

13. Lipatov D.N., Shcheglov A.I., Tsvetnova O.B., *Soderzhanie i raspredelenie ¹³⁷Cs v pochvah lesnyh i agrojekosistem Tul'skoj oblasti* (Content and distribution of ¹³⁷Cs in soils of forest and agroecosystems of the Tula region), *Radiacionnaja biologija i Radioekologija*, 2007, Vol. 47, No. 5.

14. Lipatov D.N., Shcheglov A.I., *Prostranstvennoe var'irovanie koeficientov kvazidiffuzii ¹³⁷Cs v seryh lesnyh pochvah v dal'nej zone zagryaznenija ot Chernobyl'skoj AES* (Spatial variation of ¹³⁷Cs quasi-diffusion coefficients in gray forest soils in the far zone of contamination from the Chernobyl NPP), *Radiacionnaja biologija i Radioekologija*, 2014, Vol. 54, No. 5.

15. Ministry of Health of the Russian Federation. Recommendations on rational consumption standards of food products that meet modern requirements for healthy eating: Order of 19.08.2016 No. 614, URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=451458>.

16. Ministry of Natural Resources of the Russian Federation. Criteria for assessing the environmental situation of territories to identify emergency environmental situations and environmental disaster zones. Approved on 30.11.1992, URL: <https://docs.cntd.ru/document/901797511>.

17. Paramonova T.A., Komissarova O.L., Ivanov M.M., Turykin L.A., Belyaev V.R., Mamikhin S.V., *Ocenka prostranstvennoj neodnorodnosti*

radioaktivnogo zagriznenija pahotnyh chernozemov Plavskogo cezievogo pjatna na osnove sluchajnogo i sistematicheskogo metodov oprobovanija (Assessment of spatial heterogeneity of radioactive contamination of arable chernozems of the Plavsk cesium spot based on random and systematic sampling methods), In: *Radiojekologicheskie posledstvija radiacionnyh avarij: k 35-oj godovshhine avarii na ChAES* (Radioecological consequences of radiation accidents: on the 35th anniversary of the Chernobyl accident), Collection of reports of the international. scientific and practical conference, Obninsk, 2021, pp. 208–211.

18. Regions of Russia. Main characteristics of the constituent entities of the Russian Federation, Rosstat. Statistical digest, Moscow: 2022, URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13205>.

19. Rosreestr. Regional report on the state and use of land in the Tula region in 2020, Tula, 2021, URL: https://rosreestr.gov.ru/upload/to/tulskaya-oblast/statistika-i-analitika/doklady/Региональный%20Доклад%202020_Тульская%20область.pdf.

20. SanPiN 2.3.2.1078-01 “Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products”, URL: <https://www.madou47.ru/wp-content/uploads/2020/10/СанПиН-2.3.2.1078-01-Гигиенические-требования.pdf>.

21. Skryabin A.A., Biologicheskaja urozhnost' i ee struktura raznyh po skorospelosti sortov kartofelja v zavisimosti ot predposadochnoj podgotovki pochvy (Biological yield and its structure of potato varieties with different early maturity depending on pre-planting soil preparation), *E-Scio*, 2022, No. 1(64).

22. Tula region: agroclimatic conditions, URL: <https://yadyra.ru/agroklimaticheskie-i-pochvennie-usloviya/tulskaya-oblast-agroklimaticheskie-usloviya.html>.

23. Shamshurina E.N., Golosov V.N., Ivanov M.M., Prostranstvenno-vremennaja rekonstrukcija polja vypadenija chernobyl'skogo ¹³⁷Cs na pochvennyj pokrov v verhov'jah bassejna reki Lokny (Spatio-temporal reconstruction of the fallout field of Chernobyl ¹³⁷Cs on the soil cover in the upper reaches of the Lokna River basin), *Radiacionnaja biologijao Radioekologija*, 2016, No. 4, pp. 414–425.

24. Shopina O.V., Semenov I.N., Paramonova T.A., Komissarova O.L., The balance of elements in the system “Luvic Chernozems – agricultural plants” on the Plavsk upland (Tula region of Russia), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 105, pp. 91–108. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-105-91-108](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-105-91-108).

25. Burger A., Lichtscheidl I., Stable and radioactive cesium: A review about

distribution in the environment, uptake and translocation in plants, plant reactions and plants' potential for bioremediation, *Science of The Total Environment*, 2018, Vol. 618.

26. Golosov V.N., Panin A.V., Markelov M.V., Chernobyl ¹³⁷Cs Redistribution in the Small Basin of the Lokna River, Central Russia, *Physics and Chemistry of the Earth*, 1999.

27. Harrison J.D., Balonov M., Bochud F., Use of Dose Quantities in Radiological Protection, International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 147. Ann. ICRP 50. 2021.

28. Ibragim E.G., Yakubu N., Nnamonu L., Yakubu J.M., Gems, Food regional diets: regional per capita consumption of raw and semi-processed agricultural commodities, WHO (World Health Organization); prepared by the Global Environment Monitoring System, Food Contamination Monitoring and Assessment Programme (GEMS/Food), Geneva, 2003.

29. IAEA, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, Tech. Rep. Ser. No. 472, Vienna, 2010, 340 p.

30. IAEA, Soil–Plant Transfer of Radionuclides in Non-temperate Environments, Tech. Rep. Ser. No. 1979, Vienna, 2021, 98 p.

31. IAEA, Classification of Soil Systems on the Basis of Transfer Factors of Radionuclides from Soil to Reference Plants, Tech. Rep. Ser. No. 1497, Vienna, 2006, 260 p.

32. Kirchner G., Establishing reference inventories of ¹³⁷Cs for soil erosion studies: Methodological aspects, *Geoderma*, 2013, Vol. 211–212, pp. 107–115.

33. Komissarova O., Paramonova T., Land use in agricultural landscapes with chernozems contaminated after chernobyl accident: Can we be confident in radioecological safety of plant foodstuff, *International Soil and Water Conservation Research*, 2019, Vol. 7, No. 2, pp. 158–166.

34. Live Chart of Nuclides, URL: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.

35. Sanzharova N.I., Fesenko S.V., Spiridonov S., The Classification of Russian Soils on the Basis of Transfer Factors of Radionuclides from Soil to Farm Crops, *Radioprotection*, 2002, No. 37, C1-521-C1-526, DOI: [10.1051/radiopro/2002097](https://doi.org/10.1051/radiopro/2002097).

36. Sutherland R.A., Caesium-137 soil sampling and inventory variability in reference locations: a literature survey, *Hydrological Processes*, 1996, Vol. 10, pp. 43–53.

37. Tamponnet C., Martin-Garin A., Gonze M.A., Parekh N., Vallejo R., Sauras-Yeara T., Casadesus J., Plassard C., Staunton S., Norden M., Avila R.,

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2024.
“Почвоведение: Горизонты будущего. 2023”.
Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, “Soil Science: Horizons of the Future. 2023”

Shaw G., An overview of BORIS: Bioavailability of radionuclides in soils, *J. Environ. Radioact.*, 2008, Vol. 99, pp. 820–830.

38. Zhidkin A.P., Shamshurina E.N., Golosov V.N., Komissarov M.A., Ivanova N.N., Ivanov M.M., Detailed study of post-Chernobyl Cs-137 redistribution in the soils of a small agricultural catchment (Tula region, Russia), *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020.