ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)
УДК 502.521:504.5+581.192.6(470.325)
https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-128-140

Поступила в редакцию 18.08.2025
Received 18.08.2025

С. В. Лукин[1, 2], С. Б. Говоркова[3]

[1]Белгородский филиал ФГБУ «Агрохимическая служба России», Белгород, Российская Федерация
[2]Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Российская Федерация
[3]Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д. Н. Прянишникова, Москва, Российская Федерация

РАДИОНУКЛИДЫ И ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ РОССИИ: МОНИТОРИНГ И ОЦЕНКА (БЕЛГОРОДСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Аннотация. Исследование посвящено оценке уровней содержания тяжелых металлов (ТМ) и мышьяка, а также удельной активности естественных и искусственных радионуклидов в выщелоченных, типичных и обыкновенных черноземах и сельскохозяйственных культурах Белгородской области. Установлено, что диапазон варьирования в изучаемых почвах удельной активности калия-40 составляет 460–714; тория-232 – 30,4–59,7; радия-226 – 11,3–28,5 Бк/кг. В 2023–2024 гг. максимальный предел варьирования удельной активности цезия-137 и стронция-90 в почвах не превышал 43,8 и 5,0 Бк/кг соответственно. Концентрации в почвах кислоторастворимых форм цинка, свинца, мышьяка, кадмия и ртути изменялись в интервалах 23,2–52,5; 7,7–14,2; 3,15–7,13; 0,15–0,41; 0,015–0,035 мг/кг соответственно. В черноземах обыкновенных средняя удельная активность тория-232, а также концентрации кислоторастворимых форм цинка, мышьяка и кадмия были существенно выше, чем в черноземах выщелоченных, что обусловлено более легким гранулометрическим составом последних. Содержание подвижных форм ТМ по подтипам черноземов существенно не отличалось и варьировало в пределах: цинк – 0,23–0,70; свинец – 0,28–0,73; кадмий – 0,02–0,08 мг/кг. Превышений ориентировочно допустимых и предельно допустимых концентраций анализируемых элементов в почвах не выявлено. В исследованных сельскохозяйственных растениях удельная активность радионуклидов, а также концентрации ТМ и мышьяка были ниже предельно допустимых значений, регламентированных для пищевой и кормовой продукции.

Ключевые слова: удельная активность, чернозем, цинк, свинец, кадмий, ртуть, озимая пшеница, соя, кукуруза, подсолнечник

Для цитирования: Лукин, С. В. Радионуклиды и тяжелые металлы в агроэкосистемах Центрального Черноземья России: мониторинг и оценка (Белгородская область) / С. В. Лукин, С. Б. Говоркова *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 2, pp. 128–140 (in Russian). https://doi. org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-128-140

Sergei V. Lukin[1, 2], Svetlana B. Govorkova[3]

[1]Belgorod Branch FSBI "Agrochemical Service of Russia", Belgorod, Russian Federation
[2]Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation
[3]Pryanishnikov Institute of Agrochemistry, Moscow, Russian Federation

RADIONUCLIDES AND HEAVY METALS IN AGROECOSYSTEMS OF THE CENTRAL BLACK EARTH REGION OF RUSSIA: MONITORING AND ASSESSMENT (BELGOROD REGION)

Abstract. The purpose of the study was to conduct an agroecological assessment of the content of heavy metals and arsenic, as well as the specific activity of natural and artificial radionuclides in leached, typical, ordinary chernozems and plant products in the Belgorod region. In the course of research, it was found that the variation in the studied soils of the specific activity of potassium-40 is 460–714, thorium-232 – 30.4–59.7, radium-226 – 11.3–28.5 Bq/kg. In 2023–2024, the maximum limits of variation of the specific activity of cesium-137 and strontium-90 in soils did not exceed 43.8 and 5.0 Bq/kg, respectively. The concentration in soils of acid-soluble forms of zinc, lead, arsenic, cadmium, and mercury varied in the intervals of 23.2–52.5, 7.7–14.2, 3.15–7.13, 0.15–0.41, 0.015–0.035 mg/kg, respectively. In common chernozems, the average specific activity of thorium-232, as well as the concentration of acid-soluble forms of zinc, arsenic and cadmium, was significantly higher than in leached chernozems, which is due to the lighter particle size distribution of the latter. The content of mobile forms of heavy metals by subtypes of chernozems did not differ significantly and varied within: zinc – 0.23–0.70, lead – 0.28–0.73, cadmium – 0.02–0.08 mg/kg. No excess of the APC and MPC of the studied elements in soils was detected. In the studied agricultural plants, the specific activity of cesium-137, strontium-90, as well as the content of zinc, lead, arsenic, cadmium, and mercury were below the maximum permissible values regulated for food and feed products.

© Лукин С. В., Говоркова С. Б., 2026

Keywords: specific activity, chernozem, zinc, lead, cadmium, mercury, winter wheat, soybean, corn, sunflower

For citation: Lukin S. V., Govorkova S. B. Radionuclides and heavy metals in agroecosystems of the Central Black Earth Region of Russia: monitoring and assessment (Belgorod region). *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 2, pp. 128–140 (in Russian). https://doi. org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-128-140

Введение. Одними из опаснейших техногенных загрязнителей агроэкосистем являются широко применяемые в промышленности тяжелые металлы (ТМ) и используемые в атомной энергетике искусственные радионуклиды (ИРН) [1, 2].

Основными источниками поступления ТМ в агроэкосистемы являются предприятия горнодобывающей сферы, цветной металлургии, топливно-энергетического комплекса, автотранспорт. Достаточно большое их количество может попадать в почвы при использовании высоких доз органических удобрений и особенно осадков сточных вод (ОСВ). В России минеральные удобрения с учетом относительно низких доз внесения и их химического состава не рассматриваются как важный источник загрязнения агроэкосистем ТМ [3, 4]. В некоторых зарубежных странах (Австралия, Китай и др.) кадмий, содержащийся в фосфорных удобрениях, является значимым источником загрязнения почв [5].

Искусственные радионуклиды попадают в окружающую среду в результате испытаний ядерного оружия, аварий на объектах, имеющих атомные энергетические установки. После аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. значительная часть Центральной России подверглась радиоактивному загрязнению искусственными радионуклидами – цезием-137 ($T_{1/2}$ = 30,2 года) и стронцием-90 ($T_{1/2}$ = 28,5 года) [2, 6]. В наиболее пострадавшей Брянской области в 1992–1993 гг. плотность загрязнения почвы цезием-137 на отдельных территориях превышала 100 Ки/км^2, а на 17 тыс. га сельскохозяйственных угодий – 40 Ки/км^2 [7]. В Центральном Черноземье общая площадь загрязнения земель с уровнем 1–5 Ки/км^2 составляла в Белгородской и Липецкой областях около 162, в Воронежской – 132, в Курской – 122, в Тамбовской – 51 тыс. га [6].

Агроэкологический мониторинг на территории России осуществляется региональными филиалами ФГБУ «Агрохимическая служба России». При его проведении наибольшее внимание уделяется изучению содержания в компонентах агроэкосистем таких ТМ, как кадмий (Cd), ртуть (Hg), свинец (Pb), цинк (Zn), поскольку они по степени токсичности относятся к первому классу (высокоопасные вещества). К этому же классу токсичности относится и металлоид мышьяк (As)[1] [1].

Несмотря на то что с момента чернобыльской катастрофы большая часть ИРН уже распалась, определение их удельной активности в почвах и растениях является важной составной частью агроэкологического мониторинга. Кроме того, программой мониторинга предусмотрено определение на реперных объектах удельной активности в почвах и растениях долгоживущих естественных радионуклидов (ЕРН), к основным представителям которых относятся калий-40 (^{40}K), торий-232 (^{232}Th) и радий-226 (^{226}Ra) (продукт распада тория-230 в цепи распада урана-238) [2, 6].

Российскими нормативами регламентированы дифференцированные в зависимости от гранулометрического состава и кислотности почв ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) некоторых ТМ и мышьяка. Например, для суглинистых и глинистых почв с pH_{KCl} > 5,5 ОДК кадмия составляет 2, мышьяка – 10, свинца – 130, цинка – 220 мг/кг. Предельно допустимая концентрация (ПДК) валовой ртути зафиксирована на уровне 2,1 мг/кг. Кроме того, в России установлены ПДК подвижных форм цинка (23 мг/кг) и свинца (6 мг/кг)[2]. Для нормирования содержания ИРН российским законодательством установлена система зонирования территории в зависимости от плотности загрязнения цезием-137 (критический радионуклид)[3] [2].

[1] Охрана окружающей среды. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения: ГОСТ Р 70281-2022. Введ. 01.01.2023. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2022. 5 с.

[2] Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»: постановление Гл. гос. санитар. врача Рос. Федерации от 28.01.2021 № 2 // Консультант.Плюс. Россия: справ. правовая система (дата обращения: 08.04.2024).

[3] О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС: Закон Рос. Федерации от 15.05.1991 № 1244-1 // Консультант.Плюс. Россия: справ. правовая система (дата обращения: 08.04.2024).

В пищевой продукции и кормах для сельскохозяйственных животных нормируется содержание свинца, кадмия, ртути и мышьяка, а также удельная активность цезия-137 и стронция-90[1]. Для цинка регламентированы только максимальные допустимые уровни (МДУ) содержания в кормовой продукции[2].

Цель исследований – агроэкологическая оценка содержания тяжелых металлов (цинк, свинец, кадмий, ртуть) и мышьяка, а также удельной активности естественных (калий-40, торий-232, радий-226) и искусственных радионуклидов (цезий-137, стронций-90) в черноземах выщелоченных, типичных, обыкновенных и растениеводческой продукции в Белгородской области.

Объекты и методы. Исследования проводили в Белгородской области, которая находится в юго-западной части Центрально-Черноземного экономического района России. В почвенном покрове лесостепной зоны области преобладают черноземы типичные и выщелоченные, а степной – черноземы обыкновенные (рис. 1) [8].

Исследования по изучению содержания ТМ и мышьяка в почвах и растениях проводили в течение 2016–2024 гг. на реперных объектах (участки поля площадью 4–40 га). Почвенные пробы отбирались перед посевом сельскохозяйственных культур (табл. 1). Образцы растений отбирались на реперных объектах лесостепной зоны перед началом уборки урожая[3].

Исследования по изучению удельной активности радионуклидов в почвах и растениях проводились на черноземах типичных и выщелоченных в лесостепной зоне (Ракитянский р-н)

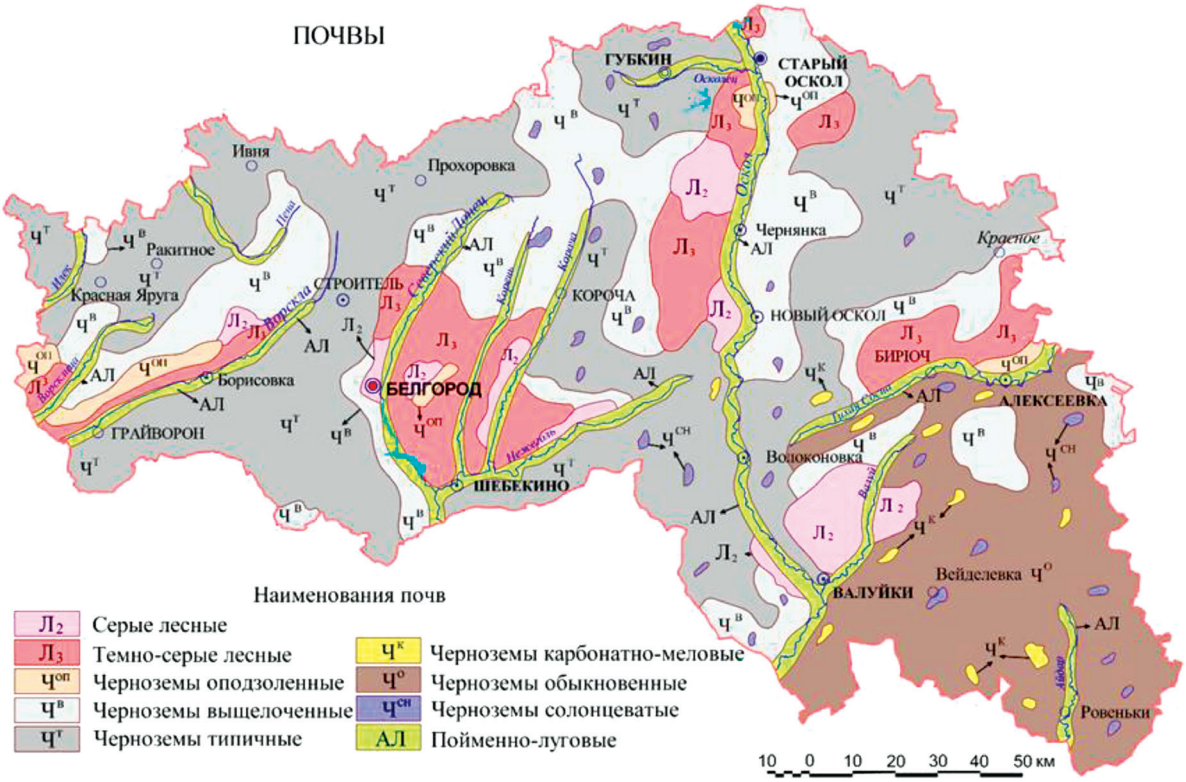

Рис. 1. Почвенный покров Белгородской области [8]

Fig.1. Soil cover of the Belgorod region [8]

[1] О безопасности зерна: ТР ТС 015/2011: (с изменениями на 15 сентября 2017 года) // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/902320395 (дата обращения: 11.04.2024).

[2] Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках: утв. Гл. упр. ветеринарии Гос. агропром. ком. СССР 7 авг. 1987 г. // Меганорм: система нормат. док. URL: https://meganorm.ru/Index2/1/4293725/4293725464.htm (дата обращения: 08.04.2024).

[3] Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения / Всерос. науч.-исслед. ин-т агрохимии, Почв. ин-т им. В. В. Докучаева; разраб.: В. Г. Сычёв [и др.]. М.: Росинформагротех, 2003. 240 с.

Таблица 1. **Характеристика почв (слой 0–25 см) реперных участков при проведении обследования на содержание тяжелых металлов**

Table 1. **Characteristics of soils (0–25 cm layer) of reference sites during survey for heavy metal content**

Почва	Содержание, %		pH_{H_2O}
	физической глины	органического вещества	
Чернозем выщелоченный	56,2	5,4	6,3
Чернозем типичный	56,8	5,6	6,7
Чернозем обыкновенный	72,5	5,2	7,8

Таблица 2. **Характеристика почв (слой 0–25 см) реперных участков при проведении радиологического обследования**

Table 2. **Characteristics of soils (layer 0–25 cm) of reference areas during radiological examination**

Почва	Содержание, %		pH_{H_2O}
	физической глины	органического вещества	
Чернозем выщелоченный	53,9	5,4	6,3
Чернозем типичный	55,1	5,5	6,6
Чернозем обыкновенный	72,5	5,6	7,8

и на черноземах обыкновенных – в степной (Вейделевский р-н) (табл. 2). Выборка для каждого подтипа почв состояла из 20 проб.

Пробы почв и растений отбирались по общепринятой в агрохимической службе методике. Все аналитические исследования проводили в аккредитованной испытательной лаборатории. Содержание кислоторастворимых форм ТМ (экстрагент 5М HNO_3) и концентрацию извлекаемых ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4,8 их подвижных форм в почве определяли методом атомно-эмиссионной спектрометрии. Концентрацию мышьяка в образцах почвы, растениеводческой продукции и удобрений определяли фотометрическим методом[1].

Определение удельной активности калия-40, тория-232, радия-226 и цезия-137 во всех образцах и стронция-90 в пробах растениеводческой продукции[2], а также стронция-90 в почвенных пробах[3] проводили по общепринятым методикам. При статистической обработке данных мониторинга использовалась программа для ЭВМ ГИС «Агроэколог Онлайн» [9].

Результаты и их обсуждение. *Радионуклиды в агроэкосистемах.* Величина естественного радиационного фона во многом определяется концентрацией в почвах естественных радионуклидов. В свою очередь, на содержание ЕРН в почвах очень сильно влияют такие ее свойства, как гранулометрический и минералогический состав, величина pH, концентрация органического углерода и др. Повышение содержания в почвах физической глины (частиц размером менее 0,01 мм), как правило, сопровождается увеличением удельной активности ЕРН [2, 10, 11].

Для почв планеты минимальные границы варьирования удельной активности калия-40, тория-232 и радия-226 оцениваются в 110, 7 и 11, а максимальные – в 740, 48 и 52 Бк/кг соответственно. При этом средняя удельная активность калия-40 составляет 370, а тория-232 и радия-226 – 26 Бк/кг [11]. В российских черноземах минимальные границы варьирования удельной активности калия-40, тория-232 и радия-226 оцениваются в 390, 22 и 12, а максимальные – в 610, 42 и 34 Бк/кг. Средняя удельная активность калия-40 оценивается в 500, тория-232 – 31,7, радия-226 – 23,1 Бк/кг [11].

В Белгородской области по средней величине удельной активности ЕРН образуют следующие убывающие ряды (Бк/кг): черноземы выщелоченные – калий-40 (539) > торий-232 (39,2) > радий-226 (17,3); черноземы типичные – калий-40 (544) > торий-232 (42,9) > радий-226 (17,4); черноземы обыкновенные – калий-40 (573) > торий-232 (46,7) > радий-226 (18,9).

[1] Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв ...

[2] Методика измерений удельной активности природных радионуклидов, цезия-137, стронция-90 в пробах объектов окружающей среды и продукции предприятий с применением спектрометра-радиометра гамма- и бета-излучений МКГБ-01 «РАДЭК» и гамма-спектрометра МКСП-01 «РАДЭК»: ФР.1.38.2011.10033.

[3] Почвы. Метод определения ^{90}Sr: ГОСТ Р 54041-2010. Введ. 01.01.2012. М.: Стандартинформ, 2012. 12 с.

Изучаемые почвы существенно не различались по величине средней удельной активности калия-40 и радия-226. Минимальные пределы варьирования удельной активности калия-40 и радия-226 зафиксированы на отметках 460 и 11,3, максимальные – 714 и 28,5 Бк/кг соответственно (табл. 3). Величина удельной активности тория-232 в черноземах обыкновенных была выше, чем в выщелоченных, что объясняется более легким гранулометрическим составом последних. В черноземах выщелоченных минимальный предел варьирования удельной активности тория-232 составлял 30,4, типичных – 30,9, обыкновенных – 34,6 Бк/кг, а максимальный – 44,0; 52,0 и 59,7 Бк/кг соответственно.

Таблица 3. **Удельная активность естественных радионуклидов в пахотных почвах, Бк/кг**

Table 3. **Specific activity of natural radionuclides in arable soils, Bq/kg**

Почва	Вариационно-статистические характеристики		
	доверительный интервал для среднего значения	пределы вариации	коэффициент вариации, %
^{40}K			
Чернозем выщелоченный	539 ± 21	460–610	8,3
Чернозем типичный	544 ± 22	468–620	8,4
Чернозем обыкновенный	573 ± 24	475–714	10,1
^{232}Th			
Чернозем выщелоченный	39,2 ± 1,6	30,4–44,0	9,1
Чернозем типичный	42,9 ± 2,2	30,9–52,0	12,9
Чернозем обыкновенный	46,7 ± 2,3	34,6–59,7	11,7
^{226}Ra			
Чернозем выщелоченный	17,3 ± 1,6	11,3–23,3	19,2
Чернозем типичный	17,4 ± 1,5	15,0–25,3	18,3
Чернозем обыкновенный	18,9 ± 1,2	16,4–28,5	15,4

Особенностью радиоактивного загрязнения почв цезием-137 является «пятнистость» и высокая неравномерность [2, 6]. Например, в 2025 г. в Лопатенском и Рожновском сельских поселениях Клинцовского района Брянской области стандартный интервал плотности загрязнения почв цезием-137 варьировал в пределах 0,2–26,0 и 2,7–38,7 Ки/км^2 соответственно [12].

В Белгородской области площадь земель сельскохозяйственного назначения, загрязненных цезием-137 в пределах 1–5 Ки/км^2, занимала около 140 тыс. га. В основном эти земли находились в восточных районах области [2].

До катастрофы на Чернобыльской АЭС минимальный предел варьирования мощности дозы гамма-излучения составлял 0,06, максимальный – 0,11 мкЗв/ч. После радиоактивных выпадений (апрель – октябрь 1986 г.) в западной части области (Ракитянский р-н) минимальный предел варьирования данного параметра зафиксирован на уровне 0,08, максимальный – 0,46 мкЗв/ч. В восточной части (Алексеевский р-н) величина мощности дозы гамма-излучения достигала 1,76 мкЗв/ч. Поэтому для снижения величины данного параметра на землях сельскохозяйственного назначения была проведена отвальная обработка почвы на глубину более 30 см, что привело к заделке ИРН в подпахотный слой. В результате уже через год после проведенных мероприятий величина мощности дозы гамма-излучения существенно снизилась и варьировала в узком диапазоне – от 0,1 до 0,21 мкЗв/ч. На востоке области минимальный предел варьирования удельной активности цезия-137 составлял 99, максимальный – 279, стронция-90 – 13 и 32 Бк/кг соответственно. На западе области удельная активность цезия-137 варьировала в пределах 15–96, стронция-90 – 9–24 Бк/кг.

В 2023–2024 гг. мощность дозы гамма-излучения на реперных объектах находилась в диапазоне от 0,07 до 0,12 мкЗв/ч. На черноземах типичных и выщелоченных западной части области средняя удельная активность цезия-137 достигала 11 Бк/кг, минимальный предел варьирования – 5,9, максимальный – 19,6 Бк/кг. Для черноземов обыкновенных в восточной части области отмечены

более высокие значения: минимальный предел варьирования удельной активности цезия-137 находился на уровне 22,2, максимальный – 43,8, средняя величина – 35,3 Бк/кг. Удельная активность стронция-90 в западной части области зафиксирована в пределах менее 3, а в восточной – менее 5 Бк/кг.

Удельная активность ЕРН и ИРН в сельскохозяйственных культурах изменяется в широком диапазоне, что определяется различными химическими свойствами радионуклидов, видовыми и сортовыми особенностями растений, условиями вегетационного периода. Помимо удельной активности радионуклидов, на их транслокацию в растения влияют агрохимические свойства почв (кислотность, содержание органического вещества, элементов-антагонистов) и такие приемы агротехники, как известкование и внесение удобрений.

По результатам опубликованных исследований удельная активность калия-40 в зерне пшеницы в среднем соответствует значению 128 Бк/кг [13]. Минимальный предел варьирования удельной активности тория-232 и радия-226 в сене многолетних трав юга Тюменской области составляет 18,7 и 7,3, максимальный – 296 и 340 Бк/кг соответственно [13]. В растениях Алтая те же показатели для тория-232 колеблются от 1 до 50 Бк/кг при средней величине 8,13 Бк/кг [14].

В наших исследованиях, проведенных на черноземах обыкновенных, наиболее высокой удельной активностью калия-40 характеризовался эспарцет по сравнению с озимой пшеницей. Как правило, содержание калия в многолетних бобовых травах выше, чем в зерновых культурах. В сене эспарцета минимальный порог варьирования удельной активности калия-40 составлял 316, максимальный – 811. Среднее значение параметра находилось на уровне 597 Бк/кг, что было близко к удельной активности этого радионуклида в почве (573 Бк/кг). В зерне озимой пшеницы средняя величина этого показателя зафиксирована на уровне 111, минимальный предел варьирования находился на уровне 90, максимальный – 130 Бк/кг. В соломе этой культуры средняя величина параметра оказалась в 1,6 раза выше, составив 182 Бк/кг (при минимальном и максимальном пределах варьирования 136 и 231 Бк/кг соответственно) (рис. 2). Уровень удельной активности тория-232 и радия-226 в сельскохозяйственных растениях не превышал 6 и 8 Бк/кг соответственно.

В продуктах питания и кормах регламентируются предельные уровни удельной активности цезия-137 и стронция-90. Например, для продовольственного зерна допустимые значения этих радионуклидов не должны превышать 60 и 11 Бк/кг, а для фуражного – 180 и 100 Бк/кг соответственно[1].

В 1986 г. в менее загрязненных западных районах области в зерне озимых культур минимальный предел удельной активности цезия-137 составлял 9,3, максимальный – 91,8; для стронция-90 эти значения достигали 0,3 и 4,5 Бк/кг соответственно. В наиболее пострадавших восточных районах минимальные пределы удельной активности цезия-137 и стронция-90 зафиксированы на уровне 10,1 и 2,0, максимальные – 190 и 5,5 Бк/кг соответственно. Столь высокий уровень загрязнения продукции, видимо, был связан с попаданием радиоактивных выпадений непосредственно на вегетирующие растения. Однако уже через год минимальные и максимальные пределы варьирования удельной активности цезия-137 в зерне распределились таким образом: в западных районах – 1,3 и 3,4,

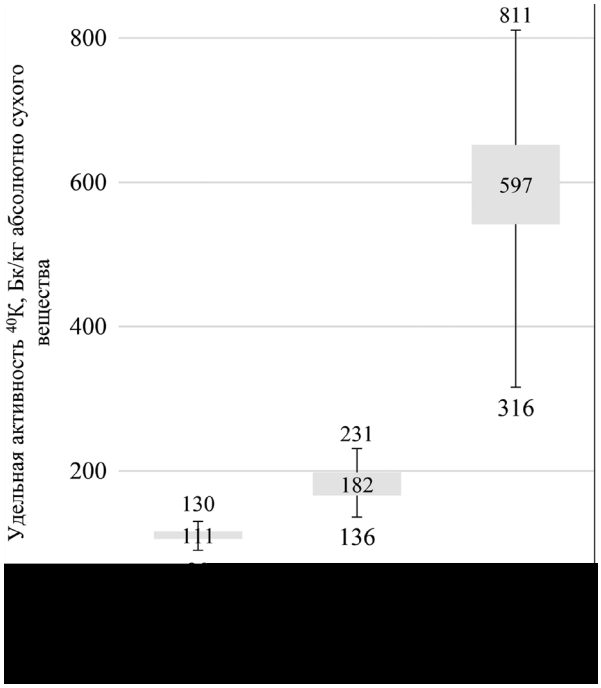

Рис. 2. Удельная активность калия-40 в растениеводческой продукции, Бк/кг

Fig. 2. Specific activity of potassium-40 in plant products, Bq/kg

[1] URL: https://docs.cntd.ru/document/902320395.

Максимально допустимые уровни содержания цинка, свинца, мышьяка, кадмия и ртути для фуражного зерна, грубых и сочных кормов составляют 50,0; 5,0; 0,5; 0,3 и 0,05 мг/кг[1]. Превышения значений МДУ не наблюдалось.

Заключение. Таким образом, в ходе исследований установлено, что варьирование в изучаемых почвах удельной активности калия-40 составляет 460–714; тория-232 – 30,4–59,7; радия-226 – 11,3–28,5 Бк/кг. В 2023–2024 гг. максимальный предел варьирования удельной активности цезия-137 и стронция-90 в почвах не превышал 43,8 и 5,0 Бк/кг соответственно. Концентрация в почвах кислоторастворимых форм цинка, свинца, мышьяка, кадмия и ртути изменялась в интервалах 23,2–52,5; 7,7–14,2; 3,15–7,13; 0,15–0,41; 0,015–0,035 мг/кг соответственно. В черноземах обыкновенных средняя удельная активность тория-232, а также концентрации кислоторастворимых форм цинка, мышьяка и кадмия были существенно выше, чем в черноземах выщелоченных, что обусловлено более легким гранулометрическим составом последних. Содержание подвижных форм ТМ по подтипам черноземов существенно не отличалось и варьировало в пределах: цинк – 0,23–0,70, свинец – 0,28–0,73, кадмий – 0,02–0,08 мг/кг. Превышений ОДК и ПДК элементов в почвах выявлено не было. В изучаемых сельскохозяйственных растениях удельная активность цезия-137, стронция-90, а также концентрации цинка, свинца, мышьяка, кадмия и ртути были ниже предельно допустимых значений, регламентированных для пищевой и кормовой продукции.

Список использованных источников

1. Лукин, С. В. Экологическая оценка содержания тяжелых металлов и мышьяка в почвах и сельскохозяйственных растениях Центрального Черноземья / С. В. Лукин // Почвоведение. – 2024. – № 10. – С. 1414–1423. https://doi.org/10.31857/S0032180X24100101

2. Лукин, С. В. Радионуклиды (^{40}K, ^{232}Th, ^{226}Ra, ^{137}Cs, ^{90}Sr) в агроэкосистемах Центрального Черноземья / С. В. Лукин // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2024. – Т. 519, № 2. – С. 156–162. https://doi.org/10.31857/S2686739724120202

3. Алексеев, Ю. В. Тяжелые металлы в агроландшафте / Ю. В. Алексеев. – СПб.: [Изд-во ПИЯФ РАН], 2008. – 216 с.

4. Шеуджен, А. Х. Агробиогеохимия чернозема / А. Х. Шеуджен. – Майкоп: Полиграф-ЮГ, 2018. – 308 с.

5. Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants / A. Kabata-Pendias. – 4th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2010. – 548 p. https://doi.org/10.1201/b10158

6. Израэль, Ю. А. Радиоактивное загрязнение земной поверхности / Ю. А. Израэль // Вестник Российской академии наук. – 1998. – Т. 68, № 10. – С. 898–915.

7. Зависимость содержания техногенных и естественных радионуклидов в почвах Центрального федерального округа от интенсивности применения минеральных удобрений и химических мелиорантов / П. М. Орлов, О. В. Гладышева, М. И. Лунев, Н. И. Аканова // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2018. – № 1 (361). – С. 37–42. https://doi.org/10.24411/2587-6740-2018-11009

8. Соловиченко, В. Д. Плодородие и рациональное использование почв Белгородской области / В. Д. Соловиченко. – Белгород: Отчий край, 2005. – 291 с.

9. Malysheva, E. S. Complex analysis of data from agrochemical and soil-erosion monitoring using geoinformation systems / E. S. Malysheva, A. V. Malyshev, I. G. Kostin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 937. – Art. 032070. https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032070

10. Rachkova, N. G. The state of natural radionuclides of uranium, radium, and thorium in soils / N. G. Rachkova, I. I. Shuktomova, A. I. Taskaev // Eurasian Soil Science. – 2010. – Vol. 43, № 6. – P. 651–658. https://doi.org/10.1134/S1064229310060050

11. Орлов, П. М. Естественные радионуклиды в почвах России и фосфатных рудах планеты / П. М. Орлов, В. Г. Сычев, Н. И. Аканова // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2020. – Т. 63, № 4 (376). – С. 62–67. https://doi.org/10.24411/2587-6740-2020-14074

12. Орлов, П. М. Оценка доз внешнего облучения для сельскохозяйственных рабочих при проведении работ на загрязненной территории Брянской области / П. М. Орлов, Н. И. Аканова, С. Б. Говоркова // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2025. – Т. 68, № 3 (405). – С. 354–359. https://doi.org/10.55186/25876740_2025_68_3_354

13. Бурлаенко, В. З. Анализ активности природных радионуклидов в почвенно-растительном покрове на территории юга Тюменской области / В. З. Бурлаенко, С. П. Игашева // Самарский научный вестник. – 2020. – Т. 9, № 3. – С. 32–36. https://doi.org/10.17816/snv202093105

14. Егорова, И. А. Особенности накопления радионуклидов в растениях Северо-западного Алтая / И. А. Егорова, Ю. В. Кислицина, А. В. Пузанов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 11 (61). – С. 32–38.

[1] URL: https://meganorm.ru/Index2/1/4293725/4293725464.htm.

15. Медведев, И. Ф. Тяжелые металлы в экосистемах / И. Ф. Медведев, С. С. Деревягин. – Саратов: Ракурс, 2017. – 178 с.

16. Побилат, А. Е. Экологическая оценка содержания ртути в агроценозах Средней Сибири / А. Е. Побилат, Е. И. Волошин // Микроэлементы в медицине. – 2019. – Т. 20, № 4. – С. 57–62. https://doi.org/10.19112/2413-6174-2019-20-4-57-62

17. Побилат, А. Е. Микроэлементы в сельскохозяйственных растениях (обзор) / А. Е. Побилат, Е. И. Волошин // Микроэлементы в медицине – 2021. – Т. 22, № 3. – С. 3–14. https://doi.org/10.19112/2413-6174-2021-22-3-3-14

18. Почвы Липецкой области / Ю. И. Сискевич, В. А. Никоноренков, О. В. Долгих [и др.]. – Липецк: Позитив Л, 2018. – 209 с.

19. Экологическая оценка содержания свинца, кадмия, ртути и мышьяка в агроэкосистемах юго-западной части Центрально-Черноземного района России: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08 / Селюкова Светлана Викторовна; Белгор. гос. нац. исслед. ун-т. – Белгород, 2018. – 133 л.

References

1. Lukin S. V. Ecological assessment of concentrations of heavy metals and arsenic in soils and crops of the Central Chernozemic Region. *Eurasian Soil Science,* 2024, vol. 57, no. 10, pp. 1709–1717. https://doi.org/10.1134/S106422932460146X

2. Lukin S. V. Radionuclides (^{40}K, ^{232}Th, ^{226}Ra, ^{137}Cs, and ^{90}Sr) in agroecosystems of the Central Chernozem Region. *Doklady Earth Sciences*, 2024, vol. 519, no. 2, pp. 2356–2361. https://doi.org/10.1134/s1028334x24603134

3. Alekseev Yu. V. *Heavy metals in the agrolandscape.* St. Petersburg, Petersburg Nuclear Physics Institute, 2008. 216 p. (in Russian).

4. Sheudzhen A. Kh. *Agrobiogeochemistry of chernozem*. Maikop, Poligraf-YuG Publ., 2018. 308 p. (in Russian).

5. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants.* 4th ed. Boca Raton, CRC Press, 2010. 548 p. https://doi.org/10.1201/b10158

6. Izrael' Yu. A. Radioactive contamination of the earth's surface. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Science*, 1998, vol. 68, no. 10, pp. 898–915 (in Russian).

7. Orlov P. M., Gladysheva O. V., Lunev M. I., Akanova N. I. The dependence of the content of technogenic and natural radionuclides in the soils of the Central Federal District on the intensity of application of mineral fertilizers and chemical ameliorants. *Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal = International Agricultural Journal*, 2018, no. 1 (361), pp. 37–42 (in Russian). https://doi.org/10.24411/2587-6740-2018-11009

8. Solovichenko V. D. *Fertility and rational use of soils in Belgorod oblast*. Belgorod, Otchii krai Publ., 2005. 291 p. (in Russian).

9. Malysheva E. S., Malyshev A. V., Kostin I. G. Complex analysis of data from agrochemical and soil-erosion monitoring using geoinformation systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 937, art. 032070. https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032070

10. Rachkova N. G., Shuktomova I. I., Taskaev A. I. The state of natural radionuclides of uranium, radium, and thorium in soils. *Eurasian Soil Science*, 2010, vol. 43, no. 6, pp. 651–658. https://doi.org/10.1134/S1064229310060050

11. Orlov P. M., Sychev V. G., Akanova N. I. Natural radionuclides in the soils of Russia and phosphate ores of the planet. *Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal = International Agricultural Journal*, 2020, vol. 63, no. 4 (376), pp. 62–67 (in Russian). https://doi.org/10.24411/2587-6740-2020-14074

12. Orlov P. M., Akanova N. I., Govorkova S. B. Assessment of external radiation dose for agricultural workers during work in the contaminated territory of the Bryansk region. *Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal = International Agricultural Journal*, 2025, vol. 68, no. 3 (405), pp. 354–359 (in Russian). https://doi.org/10.55186/25876740_2025_68_3_354

13. Burlaenko V. Z., Igasheva S. P. The analysis of natural radionuclides activity in the soil and vegetation cover in the south of the Tyumen region. *Samarskii nauchnyi vestnik = Samara Journal of Science*, 2020, vol. 9, no. 3, pp. 32–36 (in Russian). https://doi.org/10.17816/snv202093105

14. Egorova I. A., Kislitsina Yu. V., Puzanov A. V. Features of radionuclide accumulation in plants of the Northwestern Altai. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Altai State Agricultural University*, 2009, no. 11 (61), pp. 32–38 (in Russian).

15. Medvedev I. F., Derevyagin S. S. *Heavy metals in ecosystems*. Saratov, Rakurs Publ., 2017. 178 p. (in Russian).

16. Pobilat A. E., Voloshin E. I. Ecological assessment of mercury content in the agrocenosis of Central Siberia. *Mikroelementy v meditsine = Trace Elements in Medicine*, 2019, vol. 20, no. 4, pp. 57–62 (in Russian). https://doi.org/10.19112/2413-6174-2019-20-4-57-62

17. Pobilat A. E., Voloshin E. I. Microcells in agricultural plants (review). *Mikroelementy v meditsine = Trace Elements in Medicine*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 3–14 (in Russian). https://doi.org/10.19112/2413-6174-2021-22-3-3-14

18. Siskevich Yu. I., Nikonorenkov V. A., Dolgikh O. V., Akhtyrtsev A. B., Sushkov V. D. *Soils of the Lipetsk Region*. Lipetsk, Pozitiv L Publ., 2018. 209 p. (in Russian).

19. Selyukova S. V. *Ecological assessment of lead, cadmium, mercury, and arsenic content in agroecosystems of the southwestern part of the Central Black Earth Region of Russia*. Belgorod, 2018. 133 p. (in Russian).

Информация об авторах

Сергей Викторович Лукин – член-корреспондент Российской академии наук, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, директор Белгородского филиала ФГБУ «Агрохимическая служба России» (ул. Щорса, 8, 308027, Белгород, Российская Федерация); заведующий кафедрой агроэкологии, Белгородский государственный национальный исследовательский университет (ул. Победы, 85, 308015, Белгород, Российская Федерация). Researcher ID: IZD-7722-2023, https://orcid.org/0000-0003-0986-9995. E-mail: serg.lukin2010@yandex.ru

Говоркова Светлана Борисовна – кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора по научно-методической работе, заведующий аспирантурой и докторантурой Всероссийского научно-исследовательского института агрохимии имени Д. Н. Прянишникова (ул. Прянишникова, 31а, 127434, Москва, Российская Федерация). Researcher ID: OCL-1159-2025, https://orcid.org/0009-0005-9664-0049. E-mail: s.govorkova@mail.ru

Information about the authors

Sergei V. Lukin – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Agriculture), Professor, Head of the Belgorod Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution “Agrochemical Service of Russia” (8, Shchorsa St., 308027, Belgorod, Russian Federation); Head of the Department of Agroecology, Belgorod State National Research University (85, Pobedy St., 308015, Belgorod, Russian Federation). ResearcherID: IZD-7722-2023, https://orcid.org/0000-0003-0986-9995. E-mail: serg.lukin2010@yandex.ru

Svetlana B. Govorkova – Ph. D. (Agriculture), Deputy Director for Scientific and Methodological Work at the Federal State Budgetary Scientific Institution “Pryanishnikov Institute of Agrochemistry” (31a, Pryanishnikova St., 127434, Moscow, Russian Federation). Researcher ID: OCL-1159-2025, https://orcid.org/0009-0005-9664-0049. E-mail: s.govorkova@mail.ru