

УДК 502.5.8

DOI: 10.18413/2075-4671-2018-42-1-89-98

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ^{137}Cs В ПОВЕРХНОСТНЫХ ГОРИЗОНТАХ ПОЧВ Г. СЕРПУХОВ (МОСКОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)**THE ^{137}Cs DISTRIBUTION IN SERPUKHOV SOILS SURFACE HORIZON (MOSCOW REGION)****И.С. Капустина, Н.В. Кузьменкова
I.S. Kapustina, N.V. Kuzmenkova**Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва,
Ленинские горы, д. 1

Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie g., Moscow, 119991, Russia

E-mail: irinaskapustina@gmail.com; kouzmenkova@mail.ru

Аннотация

Почвенно-геохимические исследования проведены в июле 2016 г. на территории г. Серпухова. Отобрано 27 образцов поверхностных горизонтов городских почв по сетке 2000 метров. Установлены удельные активности и пространственное распределение ^{137}Cs . Среднее его содержание в почвах составляет 5.4 Бк/кг, что практически в три раза ниже мирового почвенного фона. Однако выявлено неравномерное распределение искусственного радионуклида по территории города: максимальные средние и максимальные разовые значения в селитебной зоне сельского типа (5.4 и 17.9 Бк/кг, соответственно) и рекреационной (15.9 и 17.4 Бк/кг, соответственно) выше мирового почвенного фона. Анализ природных и антропогенных факторов, влияющих на миграцию и закрепление радионуклида в поверхностном горизонте почв показал, что содержание ^{137}Cs в основном контролируется принадлежностью к той или иной функциональной зоне. В целом радиационное состояние почв Серпухова характеризуется как безопасное: средняя плотность загрязнения составляет 4.1 кБк/м².

Abstract

Soil-geochemical studies in the Serpukhov territory were carried out in July 2016. 27 samples of urban soils surface horizons were selected on a 2000 meters grid. Specific activities and spatial distribution of ^{137}Cs have been investigated. Its soils content average is 5.4 Bq/kg, which is three times lower than the world soil background. However, the uneven distribution of the artificial radionuclide throughout the city was found: the maximum average and maximum single values in the residential zone of the rural type (5.4 and 17.9 Bq/kg, respectively) and recreational (15.9 and 17.4 Bq/kg, respectively) above the world soil background. Analysis of natural and anthropogenic factors affecting migration and fixation of the radionuclide in the surface horizon of soils showed that the content of ^{137}Cs is mainly controlled by belonging to a particular functional zone. The radiation status of Serpukhov's soils is characterized as safe: the average density of pollution is 4.1 kBq/m².

Ключевые слова: городские почвы, ^{137}Cs , функциональные зоны, радиоэкологическая оценка.
Keywords: urban soils, ^{137}Cs , functional zones, radioecological assessment.

Введение

Радиоактивные вещества и радиоактивное излучение оказывают значительное влияние на биосферу Земли, формируя радиационный фон. Широкое и интенсивное изучение поведения радиоактивных веществ в окружающей среде и их воздействие на организмы началось в начале 1950-х гг. Это связано с появлением и испытанием атомного



и термоядерного оружия в атмосфере. В результате, началось активное изучение поведения радиоактивных веществ и их воздействия на живые организмы и здоровье человека. Основной задачей было прогнозирование последствий возможных катастроф, определение зоны распространения и уровней накопления радионуклидов в компонентах ландшафтов в различные временные периоды [Алексахин, 1963; Алексахин, Нарышкин, 1977; Израэль и др., 1990; Radioecology and the restoration ..., 1996; Пути миграции ..., 1999; Квасникова, 2002; и др.].

Особую актуальность эти исследования имеют для городских территорий с высокой концентрацией населения. Во многих городах, находящихся неподалеку от предприятий, использующих или производящих радиоактивные вещества, и подвергшихся радионуклидному загрязнению, ведется мониторинг радиационного состояния почв. Техногенные радионуклиды поступают на городские комплексы из атмосферы с сухими и мокрыми выпадениями. Исследования, проведенные другими авторами на территории России и других стран, показали, что максимальное воздействие радиоактивных элементов на население проявляется в лесопарках и на открытых территориях – стадионах, дворах, площадях и т. п. [Roed, Andersson, 1996].

В северном полушарии большой вклад в загрязнение искусственными радионуклидами (ИРН) внесли аварии: на ПО «Маяк», Россия, 1957 [Романов и др, 1993; Толстиков, 1999; «Маяк» – трагедия длиной в 50 лет, 2007]; Уиндскейл, Великобритания, 1957 [Atomic Energy Office ..., 1957]; Три-Майл-Айленд, США, 1975 год [Report ..., 1979; Subcommittee on Nuclear Regulation, 1980; Rosen, 1982; Ballard, 1988]; Чернобыль, Украина, 1986 [Аплби и др., 1999; Smith, 2005]; Томск-7, Россия, 1993 [Вакуловский, 1993; Глушко, 1993; The Radiological Accident ..., 1998]; Фукусима-1, Фукусима-2, Япония, 2011 [Булгаков и др., 2011; The national diet of Japan, 2012]. Эти события привели к тому, что ^{137}Cs встречается повсеместно в почвах, донных отложениях рек, озер и морей, атмосферных выпадениях [Сапожников и др., 2015]. К потенциально опасным источникам ^{137}Cs в Серпухове также стоит отнести работу Ускорительно-накопительного комплекса в окрестностях г. Протвино, расположенного в 15 км к юго-западу от Серпухова, и являющегося самым крупным ускорителем в России. Данный источник при авариях может оказывать непосредственное влияние на качество среды г. Серпухова, однако, при нормальной работе он неопасен.

Целью работы была радиоэкологическая оценка состояния почвенного покрова города Серпухов. Для выполнения цели решались следующие задачи: 1) оценить уровни содержания и пространственное распределение ^{137}Cs ; 2) проанализировать природные и антропогенные факторы, влияющие на миграцию и закрепление радионуклида (РН) в поверхностном горизонте почв; 3) дать оценку радиационного состояния почвенного покрова Серпухова.

Объект исследования

Физико-географические условия

Серпухов, площадью 32.1 км² является административным центром Серпуховского района, находящегося на юге Московской области. Исследуемый район представляет собой пологоволнистую эрозионную равнину, перекрытую флювиогляциальными отложениями. По данным метеостанции «Серпухов», город находится в области умеренно-континентального климата, среднегодовая температура воздуха +4.8°C, средняя температура июля +18.3°C, января – –8.1°C. Средняя многолетняя сумма атмосферных осадков за год составляет 643 мм. Направление ветра в городе разнонаправленно, что способствует воздушному переносу ^{137}Cs из близлежащих к городу источников, в частности от потенциально опасного источника в г. Протвино, рассмотренного выше. Однако в течение года преобладающим и наиболее сильным (3.3 м/с) является юго-западное направление (рис. 1).

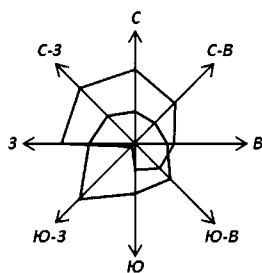


Рис. 1. Роза ветров Серпухова в январе и июне [Построение розы ветров ..., 2017]
 Fig. 1. Serpukhov January and July Wind Rose [Construction of a wind rose ..., 2017]

Территория города относится к южной подзоне хвойно-широколиственных лесов. Растительный покров на территории Серпухова находится в различном состоянии, однако, значительное количество растений в угнетенном из-за большой антропогенной нагрузки. В юго-западной части города преобладают естественные растительные ассоциации «Городской Бор».

Зональные почвы исследуемой территории представлены дерново-подзолистыми [Почвы Московской области ..., 2002]. Однако на территории города практически все почвы имеют нарушенный морфологический профиль по сравнению с зональными фоновыми почвами. По степени нарушенности выделяются ненарушенные, частично нарушенные и полностью разрушенные при градостроении почвы. Ненарушенные почвы сохранились под естественными лесами. В селитебной зоне городского типа и промышленной верхний горизонт перемешанный и содержит значительное количество органического углерода, с примесью строительного-бытового мусора и промышленных отходов. В отдельную группу выделяют почвы садово-огородных участков длительного пользования, для которых характерны мощный хорошо окультуренный гумусовый горизонт и зернистая структура [Экологическая ситуация ..., 2000].

Функциональное зонирование территории

Для Серпухова было проведено функциональное зонирование, поскольку характер использования городских территорий важен для формирования геохимических аномалий [Перельман, Касимов, 1999].

Выделено 5 зон – селитебные с застройкой сельского и городского типов, промышленная, транспортная и рекреационная (рис. 2), среди которых наибольшие площади занимают селитебные зоны. Так селитебная зона с застройкой городского типа занимает 9.3 км², а селитебная с застройкой сельского типа – 8.2 км². Площадь промышленных зон также велика, и составляет 5.6 км², а распространение других зон значительно меньше.

На территории Серпухова в июле 2016 г. проведена почвенно-геохимическая съемка. Отобрано 27 почвенных образцов для определения содержания в них ¹³⁷Cs. Опробовался поверхностный (0–10 см) горизонт, поскольку эта часть почвенного профиля является наиболее уязвимой из-за накопления большей части радионуклидов в пределах органической части профиля [Линник, 1996].

Отбор почвенных проб осуществлялся методом «конверта» с расстоянием между точками отбора в 3–5 м. Образцы представляли собой смешанную пробу, состоящую из 3–5 индивидуальных почвенных проб [Методические рекомендации ..., 1999].

Удельная активность ¹³⁷Cs определена на гамма-спектрометре Canberra GR 3818 на химическом факультете МГУ (аналитик А.К. Рожкова).

Методы и материалы исследования

В отобранных пробах также определены основные физико-химические свойства: *pH* почвенной суспензии с помощью потенциометрического метода *pH*-метром «Seven S-

20-K»; TDS суспензии с помощью кондуктометра «SevenEasyS30»; содержание органического углерода методом Тюрина; гранулометрический состав почв на лазерном гранулометре «Analysette 22. Laserklasse 1».

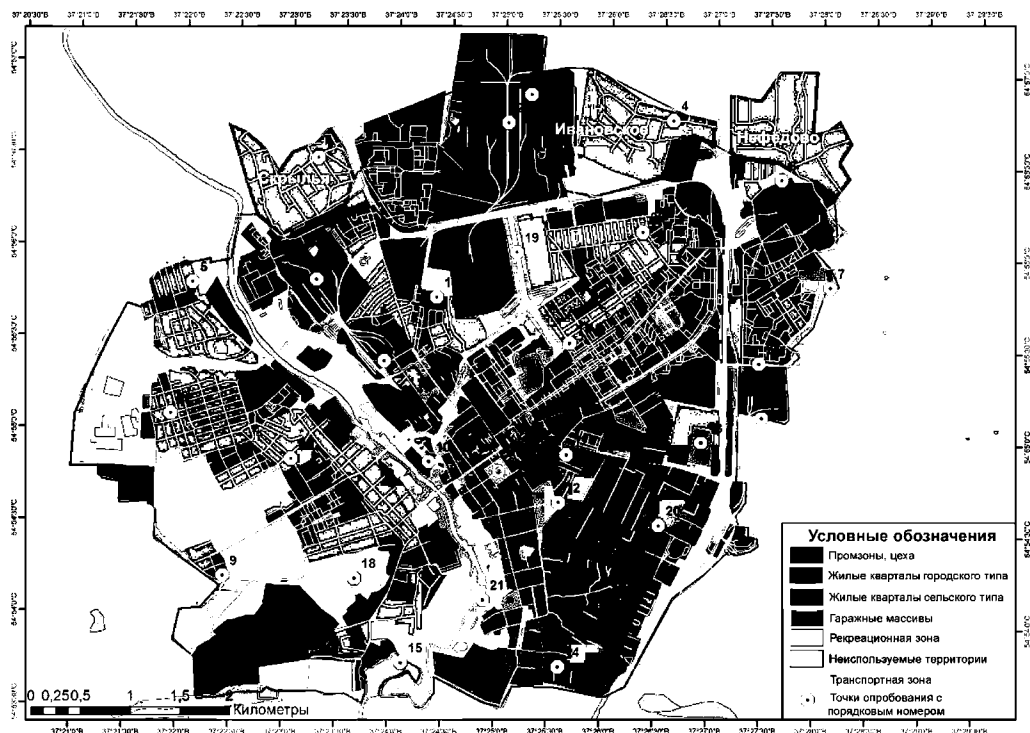


Рис. 2. Карта функционального зонирования территории Серпухова с точками отбора проб
Fig. 2. Serpukhov functional zoning with sampling points map

Полученные данные обрабатывались в программном пакете STATISTICA 7, в частности вычислялись выборочные средние, максимальные и минимальные значения, коэффициенты корреляции и др.

В пакете S-PLUS методом регрессионных деревьев выявлена зависимость в пространственном распределении РН от природных (физико-химические свойства почв) и антропогенного (функциональная зона) факторов. Программа позволяет прогнозировать содержание РН в почвах в зависимости от разного сочетания имеющихся факторов, оценивая их значимость.

Тематические карты составлялись путем интерполяции полученных данных в программном пакете ArcGIS (модуль ArcMap) методом Spline (TENSION). В качестве основы использовались данные OpenStreetMap.

Для характеристики геохимической трансформации почв использовался коэффициент накопления и рассеяния относительно фона:

$$Kc = C_i / C_{\phi} \quad Kp = -C_{\phi} / C_i$$

где C_i – содержание элемента в почве, мг/кг, C_{ϕ} – содержание элемента в фоновых почвах, мг/кг.

Для определения эколого-геохимического состояния поверхностных горизонтов почв по содержанию ^{137}Cs действует закон Российской Федерации «О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» (1991), согласно которому участок относится к радиоактивно загрязненным, если плотность загрязнения территории ^{137}Cs превышает 37000 Бк/м^2 (37 кБк/м^2) или 1 Ки/км^2 [Seleznev et al., 2010; Тимофеев, Кузьменкова, 2013].



Для определения плотности использовалась следующая формула:

$$A = 108 A_{уд} (P/V)h,$$

где $A_{уд}$ – запас (Ки/км²) и удельная активность (Бк/кг) ¹³⁷Cs в поверхностном слое почвы соответственно; P/V – удельный вес поверхностного слоя, г/см³; h – его мощность, дм.

Результаты и их обсуждение

Содержание ¹³⁷Cs в фоновых и городских почвах

Содержание ¹³⁷Cs сравнивалось с мировым почвенным фоном, который составляет 15 Бк/кг [Ковда, Розанов, 1988]. Для более точной радиационной оценки определено среднее содержание ¹³⁷Cs в фоновых почвах Приокско-Террасного заповедника, имеющего зонально схожие условия развития почв с городскими. Содержание ¹³⁷Cs (15.9 Бк/кг) в данных почвах сравнимо с мировым почвенным фоном.

В фоновых почвах, как и в городских, определены основные физико-химические свойства. Сравнивая полученные данные о свойствах почв города и фоновых, стоит отметить, что они значительно изменены. Наблюдается сдвиг реакции среды в щелочную сторону, основная часть почв характеризуется нейтральной и слабощелочной реакцией среды, тогда как фоновые почвы – средне- и слабокислой. Повышается содержание легкорастворимых солей, однако, среднее их содержание в почвах города примерно одинаково, наибольшие значения обнаружены в почвах селитебной зоны городского типа и промышленной зоны. Увеличивается содержание органического углерода (Сорг), его среднее содержание в городе составляет 2.5%, что в 1.3 раза выше фоновых значений. Наибольшее количество Сорг. имеют почвы вблизи промзон и вдоль транзитных и магистральных проездов. Происходит утяжеление гранулометрического состава. Так наибольшие площади города заняты почвами супесчаного и легкосуглинистого состава в то время как фоновые почвы – связный песок.

Любое накопление ¹³⁷Cs является неестественным из-за техногенного происхождения данного РН и свидетельствует о загрязнении территории. Его накопление (табл. 1) характерно в большей степени для рекреационной зоны (15.9 Бк/кг). Такое распределение можно связать с отсутствием механической обработки почв в ее пределах и открытостью территории, что способствует осаждению радионуклида и последующей сорбции на поверхностях коллоидов глинистых минералов. Затем, за счет диффузии они проникают в межслоевое пространство и встраиваются в решетку минералов, изоморфно замещая К. Формы цезия становятся необменными и слабо доступными для растений [Титаева, 2000; Щеглов, Цветкова, 2001; Романцова, 2012].

Таблица 1
Table 1

Среднее, минимальное и максимальное (min–max) содержание и коэффициенты накопления (K_c) ¹³⁷Cs в поверхностных горизонтах (0–10 см) почв Серпухова
The average, minimum and maximum (min–max) content and accumulation coefficients (K_c) of ¹³⁷Cs in the Serpukhov soils surface horizons (0–10 cm)

Статистические и геохимические показатели	Функциональные зоны					Город в целом
	Промышленная	Селитебная городско-го типа	Селитебная сельского типа	Транспортная	Рекреационная	
Среднее, Бк/кг	3	4.4	5.4	3.4	15.9	5.4
min–max, Бк/кг	0.5–4.4	0.5–8.1	0.01–17.9	0.8–6.9	14.3–17.4	0.05–17.9
K_c/K_p	–/5.3	–/3.6	–/2.9	–/4.68	1/–	–



Распределение ^{137}Cs по территории города

Распределение ^{137}Cs в поверхностном горизонте почв Серпухова характеризуется неоднородностью, однако, выделяемые ареалы не превышают норматива и имеют незначительную разность в значениях, поэтому корректней их назвать районами, а не аномалиями. На изучаемой территории выявлено три района с повышенными значениями, два из которых расположены в основном в рекреационной зоне (Городской Бор и Борисовское кладбище) и частично – в селитебной зоне с жилой застройкой сельского типа.

Первый район в юго-западной части занимает наибольшую площадь, максимальные значения удельной активности ^{137}Cs составляют 17.4 Бк/кг в рекреационной зоне и 10.7 Бк/кг в селитебной зоне с жилой застройкой сельского типа.

Второй район располагается в восточной части города и максимальное содержание ^{137}Cs составляет 14.3 Бк/кг. Вероятней всего, наибольшее воздействие на формирование данных районов оказал воздушный перенос радионуклида и открытость территории, что способствовало его осаждению.

Третий район расположен в южной части города, где накопление рассматриваемого РН максимально. Расположен данный район в селитебной зоне с жилой застройкой сельского типа, где значение удельной активности составляет 17.9 Бк/кг. Такое распределение величин объясняется местом отбора образцов почв. Так, пробы в данной зоне отбирались не с обрабатываемых участков, а с прилегающей к ним территории. Почвы в местах отбора образцов, как и в рекреационной зоне, характеризуются отсутствием механической обработки.

С целью установления степени влияния физико-химических свойств почв (табл. 2) рекреационной зоны на накопление ^{137}Cs , проведен регрессионный анализ.

Таблица 2

Table 2

Физико-химические свойства почв рекреационной зоны г. Серпухов
Physico-chemical properties of soils in the recreational zone of Serpukhov

Свойства почв	$C_{\text{орг}}$	pH	TDS	Физическая глина	Fe_2O_3	MnO
Среднее	2.34	6.9	108.4	23.9	2.65	0.074
min-max	0.61–3.95	5.1–7.8	34.4–214	8–43.7	1.14–4.35	0.041–0.12

Из рассматриваемых свойств, регрессионный анализ выявил большую значимость физической глины и pH почвы для содержания цезия (рис. 3). Обнаружена обратная зависимость: чем меньше содержание физической глины и ниже значения pH , тем большее количество ^{137}Cs обнаружено. Этот факт указывает на то, что влияние механической обработки почв на содержание цезия в почвах гораздо выше, чем влияние их физико-химических свойств.

Радиационная оценка состояния поверхностных горизонтов почв Серпухова

Для оценки эколого-геохимического состояния поверхностных горизонтов почв города по содержанию ^{137}Cs была рассчитана плотность загрязнения, которая коррелируется с описанными выше значениями удельных активностей ^{137}Cs . Таким образом, максимальные значения плотности загрязнения приурочены к выявленным ранее районам: к селитебной зоне с жилой застройкой сельского типа в южной части города (13.5 кБк/м²), а также к рекреационной зоне в юго-западной и восточной частях Серпухова (13.2 и 10.8 кБк/м², соответственно.)

Рассматривая распределение плотности загрязнения ^{137}Cs по функциональным зонам, выявлено, что наибольшие значения данного показателя наблюдаются в рекреационной зоне и составляет 12 кБк/м² (рис. 4). Значения плотности загрязнения в других зонах в несколько раз ниже, на втором месте по загрязнению находится селитебная зона с жилой застройкой сельского типа (4.1 кБк/м²), которая загрязнена ^{137}Cs

практически в 3 раза меньше. Минимальные значения характерны для промышленной зоны – 2.3 кБк/м².

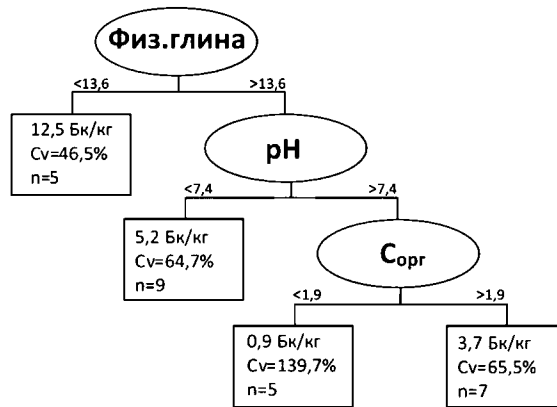


Рис. 3. Дифференциация ¹³⁷Cs в поверхностных горизонтах почв Серпухова в зависимости от природных факторов (в овалах). Для конечных узлов (в прямоугольниках) приводится средняя концентрация ¹³⁷Cs, коэффициент вариации Cv и число точек опробования n
 Fig. 3. Differentiation of ¹³⁷Cs in the surface horizons of Serpukhov soils, depending on natural factors (in ovals). For finite nodes (in rectangles), the average concentration of the ¹³⁷Cs, the coefficient of variation Cv, and the number of sampling points n

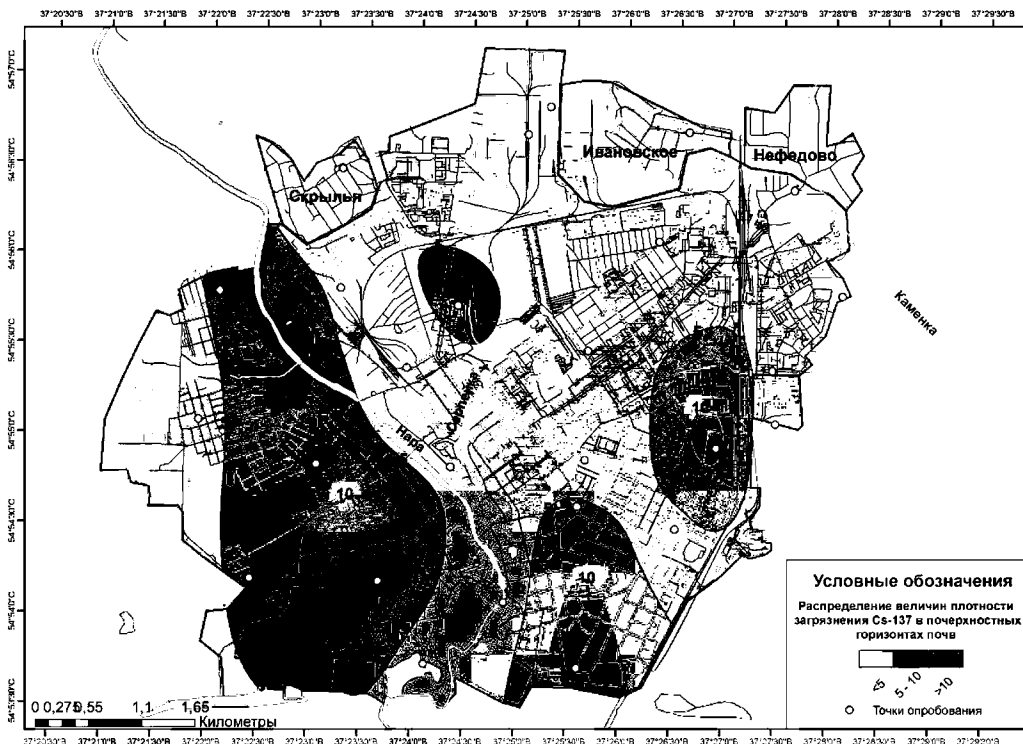


Рис. 4. Распределение величин плотности загрязнения ¹³⁷Cs (кБк/м²) в поверхностном (0–10 см) горизонте почв г. Серпухова
 Fig. 4. The ¹³⁷Cs (kBq/m²) distribution of contamination density values in the Serpukhov soils surface (0–10 cm) horizon

В остальных зонах средняя плотность загрязнения почв ¹³⁷Cs находится в диапазоне 2.3–3.4 кБк/м². Таким образом, по санитарно-гигиеническим критериям плотность загрязнения на исследуемой территории не превышает 37 кБк/м², что свидетельствует о безопасном состоянии почв города.



Выводы

Содержание ^{137}Cs в почвах города значительно ниже мирового почвенного фона, сравнимые с ним значения наблюдаются в 11% проб. Его накопление сравнительно однородно по территории города, однако максимальная удельная активность наблюдается в рекреационной зоне (15.9 Бк/кг).

Многомерный регрессионный анализ показал, что удельная активность ^{137}Cs в поверхностном горизонте городских почв определяется физико-химическими свойствами почв, прежде всего содержанием физической глины. Однако этот фактор менее значим для аккумуляции радиоактивного цезия, чем влияние механической обработки.

По санитарно-гигиеническим критериям средняя и максимальная плотность загрязнения ^{137}Cs (4.1 и 13.5 кБк/м², соответственно) в городе Серпухов не превышает установленной нормы 37 кБк/м², что свидетельствует о безопасном состоянии почв на исследуемой территории.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Русского географического общества (договор № 03/2017РГО-РФФИ).

Список литературы

References

1. Алексахин Р.М. 1963. Радиоактивное загрязнение почв и растений М., 132.
Aleksakhin R.M. 1963. Radioaktivnoye zagryazneniye pochv i rasteniy [Radioactive contamination of soils and plants]. Moscow, 132. (in Russian)
2. Алексахин Р.М., Нарышкин М.А. 1977. Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах. М., 124.
Aleksakhin R.M., Naryshkin M.A. 1977. Migratsiya radionuklidov v lesnykh biogeotsenozakh [Migration of radionuclides in forest biogeocenoses]. Moscow, 124. (in Russian)
3. Аплби Л.Д., Двелл Л., Мишра Ю.К. и др. 1999. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде: Радиация после Чернобыля. М., 512.
Appleby L.D., Dvill L., Mishra Yu.K. et al. 1999. Puti migratsii iskusstvennykh radionuklidov v okruzhayushchey srede: Radiatsiya posle Chernobylya [Ways of migration of artificial radionuclides in the environment: Radiation after Chernobyl]. Moscow, 512. (in Russian)
4. Булгаков В.Г., Вакуловский С.М., Ким В.М., Полянская О.Н., Уваров А.Д., Яхрюшин В.Н. 2011. Техногенные радионуклиды в приземном слое атмосферы вследствие аварии на АЭС «Фукусима». *Радиационная гигиена*, 4 (4): 26–31.
Bulgakov V.G., Vakulovskiy S.M., Kim V.M., Polyanskaya O.N., Uvarov A.D., Yakhryushin V.N. 2011. Technogenic radionuclides in the surface layer of the atmosphere due to the accident at the AEC "Fukushima". *Radiatsionnaya gigiyena*, 4 (4): 26–31. (in Russian)
5. Вакуловский С.М., Шершаков В.М., Бородин Р.В., Возженников О.И., Газиев Я.И., Косых В.С., Махонько К.П., Чумичев В.Б. 1993. Анализ и прогноз радиационной обстановки в районе аварии на Сибирском химическом комбинате. *Радиация и риск*, 3 (2): 3–48.
Vakulovskiy S.M., Shershakov V.M., Borodin R.V., Vozzhennikov OI, Gaziev Ya.I., Kosykh VS, Mahon'ko KP, Chumichov V.B. 1993. Analysis and forecast of the radiation situation in the area of the accident at the Siberian Chemical Combine. *Radiatsiya i risk*, 3 (2): 3–48. (in Russian)
6. Глушко Б.А., Горбунов С.В., Горяченкова Т.А. и др. 1993. Особенности радиоактивного загрязнения местности при аварии на Сибирском химическом комбинате (г. Томск, апрель 1993 г.). *В кн.: Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях: Обзор информации ВИНТИ. Вып. 2. М.: 64–70.*
Glushko B.A., Gorbunov S.V., Goryachenkova T.A. et al. 1993. Features of radioactive contamination of the terrain in the accident at the Siberian Chemical Combine (Tomsk, April 1993). *In: Problemy bezopasnosti pri chrezvychaynykh situatsiyakh: Obzor informatsii VINITI [Problems of safety in emergency situations: Overview of VINITI]. Vol. 2. Moscow: 64–70. (in Russian)*

7. Гринпис России: Официальный сайт. 2007. «Маяк» – трагедия длиною в 50 лет. URL: <http://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/2008/1/50-2.pdf>. (дата обращения: 18 февраля 2017).

Greenpeace Russia: Official site. 2007. "Mayak" – a tragedy 50 years long. Available at: <http://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/2008/1/50-2.pdf>. (accessed 18 February 2017). (in Russian)

8. Израэль Ю.В., Вакуловский С.М., Ветров В.А., Петров В.Н., Ровинский Ф.Я., Стукин Е.Д. 1990. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред. Ленинград, 221.

Izrael' Yu.V., Vakulovskiy S.M., Vetrov V.A., Petrov V.N., Rovinskiy F.YA., Stukin Ye.D. 1990. Chernobyl': radioaktivnoye zagryazneniye prirodnykh sred [Chernobyl: radioactive contamination of natural environments]. Leningrad, 221. (in Russian)

9. Квасникова Е.В. 2002. Антропогенные радионуклиды и их картографирование в ландшафтах суши. Дисс. ... докт. геол. наук. М., 270.

Kvasnikova Ye.V. 2002. Antropogennyue radionuklidy i ikh kartografirovaniye v landshaftakh sushi [Anthropogenic radionuclides and their mapping in landscapes]. Diss. ... doct. geol. sciences. Moscow, 270. (in Russian)

10. Ковда В.А., Розанов Б.Г. 1988. Почвоведение. Ч. 1. М., 400.

Kovda V.A., Rozanov B.G. 1988. Pochvovedeniye [Soil Science]. Part 1. Moscow, 400. (in Russian)

11. Линник В. Г. 1996. Ландшафтно-радиоэкологические исследования в связи с аварией на Чернобыльской АЭС. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*, (1): 38–44.

Linnik V.G. 1996. Landscape-radioecological research in connection with the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*, (1): 38–44. (in Russian)

12. Методические рекомендации по оценке загрязнения городских почв и снежного покрова тяжелыми металлами. 1999. М., 32.

Methodical recommendations on the assessment of pollution of urban soils and snow cover with heavy metals. 1999. Moscow, 32. (in Russian)

13. Перельман А.И., Касимов Н.С. 1999. Геохимия ландшафта. М., 768.

Perel'man A.I., Kasimov N.S. 1999. Geokhimiya landshafta [Geochemistry of the landscape]. Moscow, 768.

14. Построение розы ветров для городов России. URL: http://stroydocs.com/info/e_veter. (дата обращения: 18 февраля 2017).

Construction of a wind rose for Russian cities. Available at: http://stroydocs.com/info/e_veter. (accessed 18 February 2017). (in Russian)

15. Почвы Московской области и их использование. 2002. Т. 1. М., 500.

Pochvy Moskovskoy oblasti i ikh ispol'zovaniye. 2002. [Soil of the Moscow region and their use]. Vol. 1. Moscow, 500. (in Russian)

16. Романов Г.Н., Мартюшова В.З., Смирнов Е.Г., Филатова Е.В. 1993. Ландшафтно-геохимические аспекты почвенного покрова Восточно-Уральского радиоактивного следа. *Геохимия*, 7: 955–962.

Romanov G.N., Martyushova V.Z., Smirnov Ye.G., Filatova Ye.V. 1993. Landscape-geochemical aspects of the soil cover of the East Urals radioactive trace. *Geokhimiya*, 7: 955–962. (in Russian)

17. Романцова Н.А. 2012. Естественные и техногенные радионуклиды в почвах Плавского радиоактивного пятна тульской области. *Агрохимический вестник*, 6: 34–37.

Romantsova N.A. 2012. Natural and technogenic radionuclides in the soils of the Plavskii radioactive spot of the Tula region. *Agrochemical Herald*. 6: 34–37. (in Russian)

18. Сапожников Р.А., Алиев С.Н., Калмыков Ю.А. 2015. Радиоактивность окружающей среды: теория и практика. М., 289.

Sapozhnikov R.A., Aliyev S.N., Kalmykov Yu.A. 2015. Radioaktivnost' okruzhayushchey sredy: teoriya i praktika [Environmental Radioactivity: Theory and Practice]. Moscow, 289. (in Russian)

19. Тимофеев И.В., Кузьменкова Н.В. 2013. Пространственное распределение ¹³⁷Cs в почвах г. Озерск (Челябинская область). *Вестник Московского университета. Серия 5. География*, (6): 23–29.

Timofeyev I.V., Kuz'menkova N.V. 2013. Spatial distribution of ¹³⁷Cs in the soils of Ozersk (Chelyabinsk region). *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*. (6): 23–29. (in Russian)



20. Титаева Н.А. 2000. Ядерная геохимия. М., 336.
Titayeva N.A. 2000. Yadernaya geokhimiya [Nuclear Geochemistry]. Moscow, 336. (in Russian)
21. Толстиков В.Г. 1999. Ядерная катастрофа 1957 года на Урале. *Вестник Челябинского Университетата. Серия 1. История*, 1: 86–95.
Tolstikov V. G. 1999. Nuclear Accident of 1957 in the Urals. *Bulletin of the Chelyabinsk University. Series 1. Istoriya*, 1:86-95 (in Russian)
22. Щеглов А.И., Цветкva О.Б. 2001. Роль лесных экосистем при радиоактивном загрязнении. *Природа*, 4: 23–32.
Shcheglov A.I., Tsvetkva O.B. 2001. The role of forest ecosystems in radioactive contamination. *Priroda*, 4: 23–32. (in Russian)
23. Экологическая ситуация в городе Серпухове и перспективы ее улучшения. 2000. М., 228.
Ekologicheskaya situatsiya v gorode Serpukhove i perspektivy yeye uluchsheniya. 2000. [The ecological situation in Serpukhov and prospects for its improvement]. Moscow, 228. (in Russian)
24. Atomic Energy Office. 1957. Accident at Windscale No. 1 Pile, 10 oct. 1957, London, HMSO.
25. Ballard G.M. 1988. Nuclear safety after Three Mile Island and Chernobyl. London, New York, 490.
26. Radioecology and the restoration of radioactive contaminated sites. 1996. NATO Asi Series, 2. Environment, 13. Dordrecht, Boston, London, 291.
27. Report of The President's Commissions on the Accident at Three Mile Islands: The Need for Change: The Legacy of TMI. 1979. Washington, 201.
28. Roed J., Andersson K. 1996. Clean-up of urban areas in the CIS countries contaminated by chernobyl fallout. *Journal of Environmental Radioactivity*, 33 (2): 107–116.
29. Rosen. 1982. Ira The warning Accident at Three Mile Island. New York, 287.
30. Seleznev A.A., Yaroshenko I.V., Ekidin A.A. 2010. Accumulation of ^{137}Cs in puddle sediments within urban ecosystem. *Enviroment Radioactivity*, 101: 643–646.
31. Smith J., Beresford N.A. 2005. Chernobyl. Chichester, 310.
332. Subcommittee on Nuclear Regulation. 1980. Nuclear accident and recovery at Three Mile Islands. Report for the Committee on Environment and Public Works U.S. Senate. Serial No. 96-14.
33. The National Diet of Japan. 2012. The official report of the Fukushima nuclear accident independent investigation commission.
34. The Radiological Accident in the Reprocessing Plant at Tomsk. 1998. Vienna, 85.