

## ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.416.9:539.163

### ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ВАРЬИРОВАНИЕ УДЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ $^{137}\text{Cs}$ , СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И НЕФТЕПРОДУКТОВ В ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВАХ г. ЭЛЕКТРОСТАЛЬ

© 2022 г. Д. Н. Липатов<sup>а, \*</sup>, В. А. Вараченков<sup>а</sup>, Д. В. Манахов<sup>а</sup>,  
М. М. Карпунин<sup>а</sup>, С. В. Мамахин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: dlip@soil.msu.ru

Поступила в редакцию 21.10.2021 г.

После доработки 22.12.2021 г.

Принята к публикации 30.12.2021 г.

Исследованы уровни удельной активности  $^{137}\text{Cs}$ , содержания подвижных форм (1 М ацетатно-аммонийная вытяжка) тяжелых металлов (Zn, Cu, Ni, Co, Cr, Pb) и нефтепродуктов в верхнем горизонте почв различных урболандшафтов г. Электросталь в условиях локального радиоактивного и химического загрязнения. В почвах ближнего радиуса (0–100 м) промышленной зоны завода тяжелого машиностроения зафиксировано увеличение уровней удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и содержания подвижных форм Pb, Cu и Zn. Выявлен логнормальный закон распределения  $^{137}\text{Cs}$ , через 5 лет после радиационного инцидента размах пространственного варьирования в верхнем 0–10 см слое почв составил от 6 до 4238 Бк/кг. Коэффициенты вариации возрастают вместе с уровнем загрязнения в следующем ряду химических веществ: Co < Ni < нефтепродукты < Cr <  $^{137}\text{Cs}$  < Zn < Pb < Cu, составляя 50–435%. Обнаружены статистически значимые прямые корреляционные связи между удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  и содержанием подвижных форм Pb, Cu, Zn в верхнем горизонте городских почв, этот факт указывает на пространственную сопряженность локальных пятен радиоактивного и полиметаллического загрязнения в функциональных зонах исследованного района города. Показано, что в слое 0–10 см почв, нарушенных после проведенных дезактивационных, земляных и рекультивационных работ, снижены уровни удельной активности  $^{137}\text{Cs}$ , а также содержания тяжелых металлов и нефтепродуктов.

*Ключевые слова:* городские почвы, урбоэкосистемы, радиационный мониторинг, дезактивация, Urban Technosols

DOI: 10.31857/S0032180X22060077

#### ВВЕДЕНИЕ

В городских экосистемах миграция и аккумуляция загрязняющих веществ происходит под действием не только природных, но и техногенных факторов. Процессы техногенной миграции  $^{137}\text{Cs}$  наиболее выражены на радиоактивно загрязненных территориях. В урбоэкологических исследованиях установлено, что интенсивность осаждения аэрозольных частиц, содержащих радионуклиды и тяжелые металлы, определяется типами поверхностей крыш, стен, дорог, газонов, парков и их положением в пределах ветрового поля города [12, 26]. Вследствие транспортного движения в городах происходит значительный перенос пыли и связанных с ней загрязняющих веществ и радионуклидов [15, 24]. При проведении дезактивационных мероприятий на территориях чернобыльских выпадений отмечено не только снижение уровня загрязнения, но и возможность вторичного ра-

диоактивного загрязнения вследствие ветрового переноса, горизонтальной миграции почвенных частиц и после антропогенного перемещения грунтов [5, 6]. В городских экосистемах в результате дождевого стока и гидрологического переноса растворенных и коллоидных форм  $^{137}\text{Cs}$  могут формироваться конечные депо аккумуляции этого радионуклида, приуроченные к мезо- и микропонижениям [10, 16]. При исследовании в г. Озерск вблизи предприятия ядерного топливного цикла зафиксирован разный характер пространственного распределения  $^{137}\text{Cs}$  в почвах, принадлежащих к отдельным урболандшафтам [17]. В г. Москве в почвах лесопарков отмечен природный характер миграции  $^{137}\text{Cs}$  и выявлено снижение удельной активности этого радионуклида на промышленных территориях [10]. Определение средних уровней и показателей пространственного варьирования  $^{137}\text{Cs}$  в почвах является одной из основных задач радио-

экологического мониторинга городов как на фоновых, так и на загрязненных территориях.

Вследствие выбросов и сбросов от многочисленных источников загрязнения в городских почвах может накапливаться широкий спектр токсикантов: тяжелых металлов (ТМ), нефтепродуктов (НП), полициклических ароматических углеводородов и других химических веществ. В урболодшафтах отмечается пространственная сопряженность загрязнения почв несколькими группами токсикантов [20, 23], обусловленная общим источником загрязнения или сходными путями миграции этих соединений. В ряде исследований проводился комплексный анализ загрязнения городских почв радионуклидами и тяжелыми металлами [21, 25]. Выявление возможных пространственных взаимосвязей радиоактивного и химического загрязнения в городских почвах является важным вопросом в области урбоэкологии.

На территории Электростальского завода тяжелого машиностроения (ЭЗТМ) в апреле 2013 г. произошел радиационный инцидент: попадание мощного источника  $^{137}\text{Cs}$  в плавильную печь с выбросом радиоактивных аэрозолей из вентиляционной трубы в городскую среду. Активность расплавленного источника оценена на уровне около 1000–7000 Ки [14]. Площадь загрязнения на территории завода составила 7500 м<sup>2</sup>. Однако распространение радиоактивных аэрозолей происходило также в прилегающий район г. Электросталь, включавший ул. Красная, Первомайская, достигнув проспекта Ленина.

Геохимическая оценка загрязнения верхнего горизонта почв в городе Электросталь, проводившаяся в 1989–1991 гг., выявила аномалии концентрации вольфрама, никеля, молибдена, хрома и других тяжелых металлов, связанные с накоплением легирующих компонентов и примесей цветных металлов, входящих в состав выбросов сталеплавильных производств [19].

Цель работы – исследовать уровни удельной активности  $^{137}\text{Cs}$ , содержания подвижных форм тяжелых металлов (Zn, Cu, Ni, Co, Cr, Pb) и нефтепродуктов в верхнем горизонте почв различных урболодшафтов г. Электросталь в условиях локального радиоактивного и химического загрязнения.

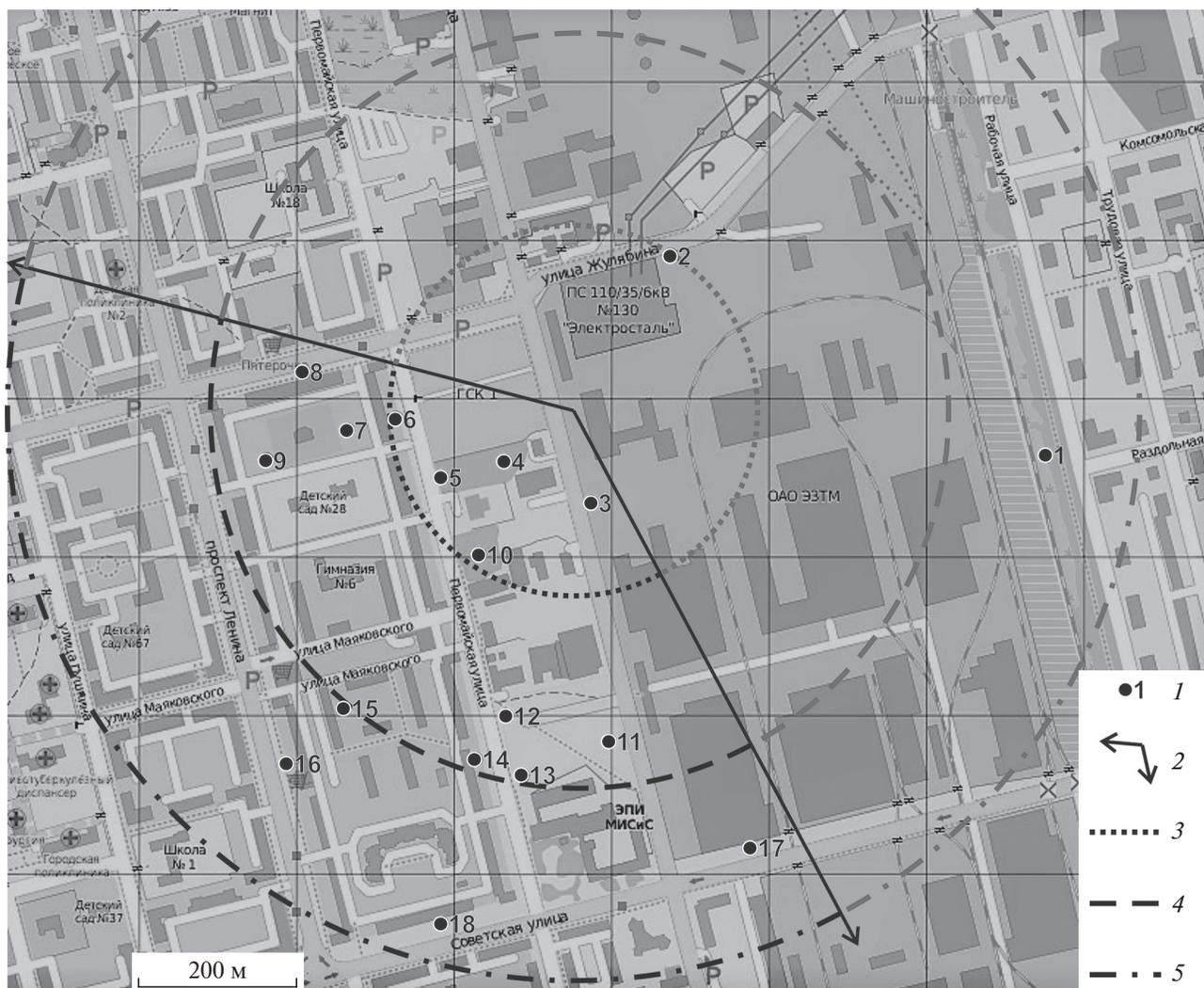
## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Полевые исследования проводили в г. Электросталь Московской области в июле 2018 г., то есть через 5 лет 3 месяца после локальных выпадений  $^{137}\text{Cs}$  вследствие радиационного инцидента. В апреле 2013 г. в день радиационного инцидента выброс  $^{137}\text{Cs}$  из трубы плавильного цеха распространился к западу от завода тяжелого

машиностроения [14]. Поэтому обследованный район города вблизи завода включал ул. Красную, Первомайскую, Жулябина, Советскую и проспект Ленина, охватывая территорию в пределах географических координат: 55°47'35.5"–55°47'55.4" N и 38°26'23.1"–38°27'21.7" E (рис. 1). В 18 контрольных площадках (5 × 5 м), заложенных на различном расстоянии от завода в основных функциональных зонах города, проведен почвенный пробоотбор цилиндрическим пробоотборником из слоя 0–10 см в двух повторностях. Схема заложения площадок объединяла три радиуса по удаленности от источника выброса на ЭЗТМ: ближний (0–100 м), средний (100–250 м) и периферийный (250–750 м), и три функциональные зоны города: промышленную, транспортную и селитебную. В промышленную зону вблизи завода тяжелого машиностроения включен также участок заболоченного пустыря, замусоренный промышленными и бытовыми отходами; транспортная зона выделена в пределах расстояний 10 м от железной и автомобильных дорог; селитебная зона охватывала дворы девяти- и пятиэтажных домов в этом районе города. Кроме того, в ходе почвенного опробования на исследованной городской территории отмечалось наличие/отсутствие нарушений верхнего горизонта вследствие земляных и рекультивационных работ в различных урболодшафтах.

В лабораторных условиях после высушивания и гомогенизации во всех почвенных пробах выполняли определение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  на сцинтилляционном гамма-спектрометре с детектором NaI(Tl) 63 × 63 “Мультирад” (ООО “НТЦ Амплитуда”, Россия). Содержание подвижных форм тяжелых металлов (Zn, Cu, Ni, Co, Cr, Pb) определяли в 1 М ацетатно-аммонийной вытяжке (рН 4.8) с последующим измерением на оптическом-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой и двойным вертикальным обзором Agilent ICP-OES 5110 VDV (Agilent Technologies, Германия). Для приготовления градуировочных растворов использовали стандарт контроля качества 190065000 (Agilent Technologies, США). Содержание суммы нефтепродуктов во всех почвенных пробах измеряли в соответствии с методикой ПНД Ф 16.1:2.2.22-98 на концентратометре КН-2м.

При статистической обработке данных проводили проверку нормального закона распределения на основе критерия Уилка–Шапиро для исходных значений и логнормального – после их преобразования с помощью вычисления десятичного логарифма. Для оценки влияния радиуса удаленности от источника выброса (фактор 1), функциональной зоны города (фактор 2) и нарушения верхнего горизонта почв (фактор 3) на варьирование исследованных показателей проводили трехфакторный дисперсионный анализ с учетом



**Рис. 1.** Карта района исследования и расположение контрольных площадок в г. Электросталь: 1 – местоположение и номера контрольных площадок; 2 – сектор распространения выброса  $^{137}\text{Cs}$ ; радиус удаленности от источника выброса: 3 – ближний, 4 – средний, 5 – периферийный.

влияния взаимодействия факторов, а также множественное сравнение средних значений по грациям факторов на основе наименьшей существенной разности, вычисленной с помощью критерия Дункана. Дисперсионный анализ и множественное сравнение средних выполняли для переменных, преобразованных с помощью вычисления десятичного логарифма. Объем дисперсионного комплекса составил 36 значений, фактор 1 имеет 3 градации (ближний, средний, периферийный радиус), фактор 2 имеет 3 градации (промышленная, транспортная, селитебная зоны города), фактор 3 имеет 2 градации (ненарушенные и нарушенные почвы). Для выявления взаимосвязей между удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$ , содержанием подвижных форм ТМ и суммой НП рассчитывали коэффициенты корреляции Спирмена.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Почвенный покров на исследованной территории г. Электросталь представлен преимущественно стратоземами урбостратифицированными [1, 3], Urbic Technosol по международной классификации WRB [22]. На загрязненных участках вблизи ЭЗТМ в 2013–2014 гг. выполнялись дезактивационные мероприятия, на некоторых придорожных и дворовых территориях проводились земляные и рекультивационные работы, поэтому их верхний почвенный горизонт R<sub>Yug</sub> является сильнотурбированным или насыщенным. В ряде исследованных урбоэкосистем верхняя часть профиля почвы представлена серогумусовым горизонтом А<sub>У</sub>, под ним залегает урбостратифицированная толща, сформированная в 1940–1970 гг. при строительстве завода тяжелого машиностроения, прилега-

**Таблица 1.** Статистические характеристики варьирования удельной активности  $^{137}\text{Cs}$ , содержания подвижных форм ТМ и НП в слое 0–10 см почв на исследованной территории города ( $n = 36$ )

Токсикант	Среднее	Минимум	Максимум	Коэффициент вариации, %	Коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса
$^{137}\text{Cs}$ , Бк/кг	462.7	6.2	4238.0	174.2	3.6	14.8
Zn, мг/кг	21.2	1.7	249.1	208.5	4.4	21.1
Cu, мг/кг	10.1	0.3	258.9	434.6	5.6	32.2
Ni, мг/кг	1.7	0.2	7.4	96.0	2.6	7.0
Co, мг/кг	0.2	0.1	0.8	50.4	2.8	10.7
Cr, мг/кг	0.7	0.2	7.5	169.9	5.5	31.6
Pb, мг/кг	16.7	0.4	284.5	291.7	5.1	27.9
НП, мг/кг	406	10	1891	103.0	2.4	6.6

ющих улиц, железных и автомобильных дорог, зданий и жилых домов города.

В почвах и грунтах Москвы и Московской области средняя удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  составляет 6 Бк/кг [11]. В качестве верхней границы референтного фонового уровня удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  для почвогрунтов Московского региона рекомендована величина 40 Бк/кг [10]. На исследованной территории г. Электросталь среднее значение составило 462.7 Бк/кг (табл. 1), превышая в 11.5 раз референтный уровень и указывая на загрязнение почв  $^{137}\text{Cs}$ , которое было сформировано вследствие радиационного инцидента в 2013 г.

Высокие уровни загрязнения почв выявлены к западу от завода тяжелого машиностроения на локальных участках, подвергшихся выпадениям  $^{137}\text{Cs}$ . Максимальное значение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в верхнем слое 0–10 см почвы зафиксировано в 80 м от источника выброса на пустыре, заросшем деревьями американского клена (*Acer negundo*) и замусоренном бытовыми и промышленными отходами, где не проводились дезактивационные и рекультивационные мероприятия. Вся площадь ореола радиоактивного загрязнения с удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  более 40 Бк/кг составляет около 0.5 км<sup>2</sup>, охватывая не только прилегающую к заводу ул. Красную, но и несколько дворов жилых домов по ул. Первомайской, Жулябина и рядом с детским садом № 28 (рис. 1). По периферии исследованной городской территории на ул. Рабочей и Советской, а также в сквере рядом с Электростальским политехническим институтом в верхнем горизонте почв зафиксированы фоновые уровни удельной активности  $^{137}\text{Cs}$ : от 6 до 40 Бк/кг.

Пространственное распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в исследованных загрязненных и фоновых городских почвах не подчиняется нормальному закону, но удовлетворительно аппроксимируется логнормальным законом. Наряду с очень высоким коэффициентом вариации 174.2%, для

распределения удельной активности радионуклида зафиксированы большие положительные коэффициенты асимметрии и эксцесса.

Результаты проведенного дисперсионного анализа свидетельствуют о статистически достоверном влиянии каждого из трех рассмотренных факторов (фактор 1 – радиус удаленности от источника выброса, фактор 2 – функциональная зона города, фактор 3 – нарушение почвенной поверхности) и их взаимодействия на пространственное распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в верхнем слое почв (табл. 2). Множественное сравнение средних по отдельным грациям факторов, проведенное с помощью критерия Дункана, показывает, что в промышленной зоне ближнего радиуса удаленности от источника выброса наблюдается статистически достоверное увеличение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  (табл. 3). В периферийном радиусе для всех функциональных зон города зафиксировано статистически значимое уменьшение этого показателя. В верхнем горизонте почв, нарушенных в результате проведенных дезактивационных, земляных и рекультивационных работ, отмечается уменьшение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$ , и эта тенденция наиболее выражена в ближнем радиусе и промышленной зоне города. Так, на участках промышленной зоны с ненарушенной почвой средний уровень удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  составляет 1397 Бк/кг, тогда как на нарушенных в результате дезактивационных, рекультивационных работ он снижен до 339 Бк/кг, то есть в 4 раза (рис. 2а).

В качестве предельно допустимых концентраций (ПДК) подвижных форм тяжелых металлов в почвах используют следующие значения: Zn – 23 мг/кг, Cu – 3 мг/кг, Ni – 4 мг/кг, Co – 5 мг/кг, Cr – 6 мг/кг, Pb – 6 мг/кг [2]. В верхних горизонтах исследованных почв г. Электросталь среднее содержание подвижных форм Zn не превышает ПДК, однако максимальное значение выше этого уровня в 10.8 раз. Среднее содержание подвиж-

**Таблица 2.** Значения F-критерия Фишера по результатам трехфакторного дисперсионного анализа для оценки влияния на удельную активность <sup>137</sup>Cs, содержание ТМ и НП в слое 0–10 см почв

Токсикант	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 1 × × Фактор 2	Фактор 1 × × Фактор 3	Фактор 2 × × Фактор 3
<sup>137</sup> Cs	6.7***	5.2**	5.7**	2.2	5.9**	3.1*
Zn	0.6	1.9	15.7***	1.4	2.4	1.7
Cu	2.7*	4.8**	6.7***	1.0	3.4*	2.0
Ni	0.1	3.8**	0.4	0.9	0.6	4.2**
Co	0.4	4.3**	0.1	1.8	0.1	0.5
Cr	1.7	6.2***	0.2	3.7**	0.7	0.9
Pb	9.2***	0.1	9.9***	1.4	2.5	2.2
НП	0.5	3.5**	9.6***	2.0	1.3	0.1

Примечание. Уровень значимости F-критерия Фишера: \*  $p < 0.10$ ; \*\*  $p < 0.05$ ; \*\*\*  $p < 0.01$ . Фактор 1 – радиус удаленности от источника загрязнения, фактор 2 – функциональная зона города, фактор 3 – нарушение верхнего горизонта почвы.

**Таблица 3.** Результаты сравнения средних значений удельной активности <sup>137</sup>Cs, содержания подвижных форм ТМ и НП в слое 0–10 см почв в различных радиусах от ЭЗТМ и функциональных зонах города

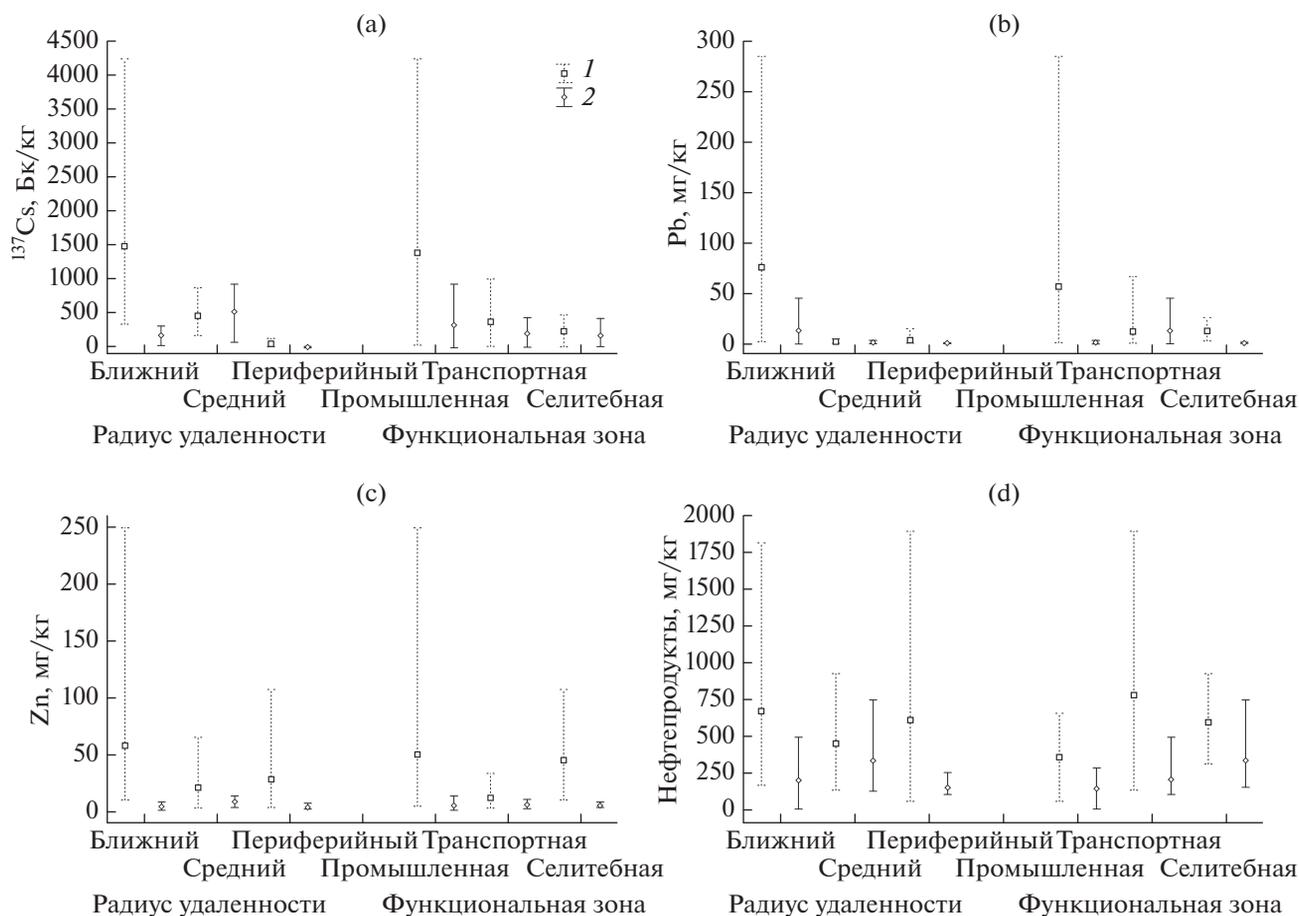
Токсикант	Результаты сравнения средних на различных участках								
	ближний радиус от ЭЗТМ			средний радиус от ЭЗТМ			периферийный радиус		
	П	Т	С	П	Т	С	П	Т	С
<sup>137</sup> Cs, Бк/кг	1754 ± 1022 с	452 ± 191 b	321 ± 38 b	799 ± 118 bc	414 ± 40 b	300 ± 96 b	52 ± 33 a	42 ± 20 a	31 ± 6 a
Zn, мг/кг	70.6 ± 42.9 b	14.9 ± 6.7 ab	9.3 ± 1.5 a	9.7 ± 2.0 a	7.6 ± 1.7 a	29.0 ± 14.9 ab	4.3 ± 0.7 a	6.4 ± 2.6 a	39.2 ± 23.8 ab
Cu, мг/кг	79.9 ± 61.2 b	1.7 ± 0.4 a	1.0 ± 0.3 a	3.4 ± 1.5 a	0.6 ± 0.1 a	1.3 ± 0.6 a	1.0 ± 0.1 a	0.7 ± 0.2 a	1.1 ± 0.4 a
Ni, мг/кг	2.3 ± 0.9 ab	1.4 ± 0.5 a	1.1 ± 0.2 a	1.6 ± 0.1 a	4.0 ± 1.9 b	0.8 ± 0.3 a	1.8 ± 0.3 a	1.2 ± 0.3 a	1.1 ± 0.4 a
Co, мг/кг	0.2 ± 0.1 a	0.3 ± 0.1 a	0.2 ± 0.1 a	0.2 ± 0.1 a	0.5 ± 0.1 b	0.2 ± 0.1 a	0.2 ± 0.1 a	0.3 ± 0.1 a	0.2 ± 0.1 a
Cr, мг/кг	0.6 ± 0.1 ab	2.4 ± 1.5 b	0.3 ± 0.1 a	0.9 ± 0.2 ab	0.4 ± 0.1 a	0.2 ± 0.1 a	0.6 ± 0.1 ab	0.4 ± 0.1 a	0.5 ± 0.1 a
Pb, мг/кг	84.2 ± 67.8 b	37.0 ± 13.5 ab	13.6 ± 5.9 ab	2.8 ± 0.7 a	1.3 ± 0.4 a	3.1 ± 1.1 a	1.6 ± 0.1 a	1.2 ± 0.2 a	5.4 ± 2.5 a
НП, мг/кг	339 ± 163 ab	677 ± 315 b	303 ± 75 ab	311 ± 44 ab	167 ± 22 a	709 ± 92 b	115 ± 19 a	644 ± 223 b	393 ± 109 ab

Примечание. Функциональные зоны города: П – промышленная, Т – транспортная, С – селитебная.  $M \pm m$  – среднее арифметическое ± стандартная ошибка среднего. Буквами a, b, c обозначена принадлежность к гомогенным группам, в каждой из которых отсутствуют статистически значимые ( $p = 0.05$ ) различия по критерию Дункана, в порядке возрастания средних значений.

ных форм Cu превышает ПДК в 3.4 раза, указывая на загрязнение исследованных почв этим тяжелым металлом. Среднее содержание подвижных форм Ni в верхних горизонтах почв не превышает ПДК, однако максимальное значение выше этого уровня в 1.8 раза. Среднее и максимальное значение содержания подвижных форм Co значительно ниже ПДК, что указывает на отсутствие загрязнения почв этим тяжелым металлом. Среднее

содержание подвижных форм Cr в верхних горизонтах почв не превышает ПДК, однако максимальное значение выше этого уровня в 1.3 раза. Среднее содержание подвижных форм Pb превышает ПДК в 2.8 раз, указывая на загрязнение исследованных почв этим тяжелым металлом.

Пространственное распределение содержания подвижных форм всех тяжелых металлов (Zn, Cu, Ni, Co, Cr, Pb) в слое 0–10 см исследованных почв



**Рис. 2.** Средние уровни, минимальные и максимальные значения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  (a), содержания подвижных форм Pb (b), Zn (c), суммы нефтепродуктов (d) в верхнем слое 0–10 см ненарушенных (1) и нарушенных (2) почв на различных радиусах удаленности от источника и в различных функциональных зонах города.

подчиняется логнормальному закону. Наряду с очень высокими коэффициентами вариации, составившими от 50 до 435%, для распределений исследованных тяжелых металлов зафиксированы положительные коэффициенты асимметрии и эксцесса.

Результаты проведенного дисперсионного анализа свидетельствуют о статистически достоверном влиянии радиуса удаленности на пространственное распределение подвижных форм Pb и Cu в верхнем горизонте почв. Множественное сравнение средних показывает, что в промышленной зоне ближнего радиуса удаленности от источника выброса наблюдается статистически достоверное увеличение содержания подвижных форм Pb, Cu и Zn. На отдельных участках транспортной функциональной зоны города отмечено статистически значимое увеличение содержания подвижных форм Ni, Co, Cr в верхнем слое 0–10 см почв. В верхнем горизонте почв, нарушенных в результате проведенных дезактивационных, земляных и рекультивационных работ, отмечается уменьшение содержания подвижных форм Pb,

Cu, Zn. Такая очистка почв наиболее выражена в ближнем радиусе и на промышленной территории, но для загрязнения Zn проявляется и в других функциональных зонах города (рис. 2b, 2c).

В качестве ориентировочно допустимой концентрации нефтепродуктов в почве используют нижний предел второго (низкого) уровня загрязнения, равный 1000 мг/кг [8]. Среднее содержание нефтепродуктов в верхних горизонтах почв, исследованных в г. Электросталь, ниже этого уровня ориентировочно допустимой концентрации, однако максимальное значение выше него в 1.9 раз. Коэффициент вариации содержания нефтепродуктов составил 103%, распределение подчиняется логнормальному закону. Результаты проведенного дисперсионного анализа свидетельствуют о статистически достоверном влиянии функциональной зоны города и нарушений верхнего горизонта почв на пространственное варьирование нефтепродуктов. Множественное сравнение средних показывает, что в верхнем слое 0–10 см почвы в ближнем и периферийном радиусе воздействия наблюдается статистически достоверное увеличе-

**Таблица 4.** Коэффициенты корреляции Спирмена между удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$ , содержанием подвижных форм ТМ и НП в слое 0–10 см исследованных почв ( $n = 36$ )

Показатель	$^{137}\text{Cs}$	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
$^{137}\text{Cs}$							
Co	-0.08						
Cr	+0.14	+0.03					
Cu	+0.34*	-0.08	+0.60*				
Ni	+0.21	+0.27	+0.68*	+0.52*			
Pb	+0.39*	-0.21	+0.34*	+0.74*	+0.19		
Zn	+0.51*	+0.15	+0.27	+0.71*	+0.38*	+0.71*	
НП	+0.44*	-0.19	+0.10	+0.41*	+0.10	+0.63*	+0.68*

\* Уровень значимости  $<0.05$ .

ние содержания нефтепродуктов для транспортной зоны города, а в среднем радиусе — для селитебной зоны. В верхнем горизонте почв, нарушенных в результате проведенных земляных и рекультивационных работ, отмечается снижение содержания нефтепродуктов на различных радиусах удаленности и во всех трех функциональных зонах города (рис. 2d).

Результаты корреляционного анализа указывают на пространственную сопряженность распределения  $^{137}\text{Cs}$ , тяжелых металлов и нефтепродуктов в верхнем горизонте исследованных городских почв (табл. 4). Статистически значимые положительные коэффициенты корреляции отмечены между удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  и содержанием подвижных форм Zn, Pb, Cu и нефтепродуктов. Прямые корреляционные связи зафиксированы также в следующих парах тяжелых металлов: Cr с Ni, Pb, Zn; Cu с Pb, Zn, Cr, Ni; Ni с Cr, Zn; Pb с Cu, Zn, Cr; Zn с Cu, Pb, Ni. Для содержания подвижных форм Co не выявлено значимых коэффициентов корреляции. Содержание нефтепродуктов в верхнем 0–10 см слое городских почв статистически значимо коррелирует с удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  и подвижными формами Zn, Pb, Cu.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В исследованном районе г. Электросталь зафиксировано локальное загрязнение  $^{137}\text{Cs}$ , так как средний уровень удельной активности этого радионуклида в верхнем горизонте почв превышал референтный фоновый уровень в 11.5 раз. Это загрязнение обусловлено аварийным выбросом, произошедшим в результате радиационного инцидента на ЭЗТМ. На импактной территории вблизи этого завода выявлено также загрязнение Pb и Cu, среднее содержание подвижных форм этих тяжелых металлов в верхнем горизонте почв превышает ПДК в 2.8–3.4 раз. Такое содержание

Pb и Cu соответствует низкому уровню загрязнения [8], которое, по-видимому, сформировано в результате штатных выбросов плавильных и металлообрабатывающих цехов ЭЗТМ.

Средние величины содержания подвижных форм Zn, Cr, Ni и суммы нефтепродуктов в верхнем горизонте исследованных почв не превышали ПДК, но максимальные значения были больше, соответствуя допустимому уровню загрязнения этими токсикантами [7]. Содержание подвижных форм Co ни в одной из контрольных точек не превышало ПДК, следовательно, не выявлено загрязнение верхнего слоя почв этим тяжелым металлом.

Высокие коэффициенты вариации (более 50%) и логнормальный закон распределения, зафиксированные для удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и содержания исследованных токсикантов, характерны для почв загрязненных территорий. В радиационных исследованиях обнаружено, что логнормальное распределение  $^{137}\text{Cs}$  в почвах на территориях чернобыльских выпадений объясняется присутствием высокоактивных топливных микрочастиц в составе отобранных проб [18]. В производственном экологическом мониторинге установлено, что на импактных территориях степень варьирования содержания тяжелых металлов в почвах возрастает в зонах интенсивной техногенной нагрузки вблизи источников загрязнения [4, 9]. Результаты исследования показывают, что в городских почвах с ростом превышения ПДК и других контрольных уровней увеличиваются коэффициенты вариации в следующем ряду загрязнителей:  $\text{Co} < \text{Ni} < \text{НП} < \text{Cr} < ^{137}\text{Cs} < \text{Zn} < \text{Pb} < \text{Cu}$ .

Выявленное увеличение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и содержания подвижных форм Pb, Cu и Zn в почвах западной части промышленной зоны ближнего радиуса удаленности от ЭЗТМ свидетельствует о том, что именно это предприятие является источником указанного загрязнения. Локальное загрязнение  $^{137}\text{Cs}$ , произошедшее в результате радиационного инцидента на ЭЗТМ в

апреле 2013 г., прослеживается в верхнем горизонте почв через 5 лет после выпадений. Загрязнение тяжелыми металлами в той же промышленной зоне сформировано в результате выбросов этого предприятия в течение 30–50 лет, а также вследствие выщелачивания промышленных, строительных и бытовых отходов, накопленных в прилежащих к заводу урбоэкосистемах.

Увеличение содержания суммы нефтепродуктов и подвижных форм Cr, Ni в верхнем горизонте почв приурочено к отдельным участкам транспортной зоны города. Локальное загрязнение почв на придорожных и селитебных участках связано с проливами горюче-смазочных материалов и других технических жидкостей. Еще одним фактором загрязнения в этих урбоэкосистемах является накопление продуктов истирания протекторов шин и самих дорожных покрытий.

Уменьшение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в верхнем горизонте 0–10 см нарушенных почв, на которых проводились дезактивационные и рекультивационные работы, обусловлено частичным снятием и удалением поверхностного загрязненного слоя. За счет этого в промышленной зоне ЭЗТМ отмечено снижение среднего уровня удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в 4 раза (рис. 2а). Сходные методы механической дезактивации, применявшиеся в населенных пунктах на территории чернобыльских выпадений, способствовали уменьшению плотности загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  в 1.5–8 раз [13].

В ряде урбоэкосистем г. Электросталь вследствие земляных работ, проводившихся строительными и коммунальными службами, происходило перемешивание верхнего загрязненного горизонта с насыпными и нижележащими слоями, и это привело к снижению удельной активности  $^{137}\text{Cs}$ , содержания ТМ и НП в техногенно-нарушенных трансформированных почвах. Такие природно-антропогенные процессы очистки почв отмечены на промышленной территории вблизи ЭЗТМ, но они распространены также на отдельных участках транспортной и селитебной зон. Напротив, на участках с ненарушенными почвами характерна длительная аккумуляция  $^{137}\text{Cs}$  и тяжелых металлов в поверхностном слое.

Выявленные статистически значимые прямые корреляционные связи между удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  и содержанием подвижных форм Zn, Pb, Cu указывают на пространственную сопряженность пятен радиоактивного и полиметаллического загрязнения. Несмотря на то, что конфигурация ореола выпадения  $^{137}\text{Cs}$  была сформирована за короткий период в результате аварийного выброса, а загрязнение Cu и Pb является хроническим, наблюдалась их пространственная сопряженность в промышленной зоне ЭЗТМ. Выявленная корреляционная связь может отражать сходные пути техногенной миграции радиоцезия

и тяжелых металлов в верхнем горизонте городских почв. Подобная корреляция  $^{137}\text{Cs}$  с Pb и Zn отмечалась в почвах г. Крагуевац (Сербия) [25]. По-видимому, в городских почвах могут действовать геохимические барьеры, в которых происходит аккумуляция радионуклидов и тяжелых металлов. При этом радиоцезий способен выступать трассером путей миграции и зон аккумуляции широкого спектра элементов-загрязнителей в почвенном покрове городских территорий. Проводившиеся в 2013–2014 гг. дезактивационные мероприятия в промышленной зоне ЭЗТМ включали снятие и вывоз верхнего загрязненного слоя почвы, и это привело не только к уменьшению удельной активности  $^{137}\text{Cs}$ , но одновременно и к локальной очистке от различных, накопленных на поверхности, токсикантов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На городской территории к западу от ЭЗТМ через 5 лет после радиационного инцидента сохранился ореол загрязнения площадью около 0.5 км<sup>2</sup>, в котором среднее значение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в верхнем 0–10 см слое почв составляет 462.7 Бк/кг, превышая референтный уровень в 11.5 раз.

2. Почвы исследованной территории г. Электросталь загрязнены подвижными формами тяжелых металлов. Основными элементами-загрязнителями являются Cu, Pb и Zn.

3. Пространственное варьирование удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и содержания исследованных токсикантов в верхнем слое загрязненных городских почв подчиняется логнормальному закону распределения. Их коэффициенты вариации составляют 50–435% и возрастают с повышением уровня загрязнения в следующем ряду химических веществ: Co < Ni < нефтепродукты < Cr <  $^{137}\text{Cs}$  < Zn < Pb < Cu.

4. В почвах ближнего радиуса (0–100 м) промышленной зоны Электростальского завода тяжелого машиностроения повышены уровни удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и содержания подвижных форм Pb, Cu, Zn по сравнению с другими территориями города. Увеличение содержания суммы нефтепродуктов и подвижных форм Cr, Ni приурочено к почвам транспортной зоны города.

5. В промышленной зоне к западу от завода на рекультивированных участках с нарушенными почвами средняя удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в слое 0–10 см снижена в 4 раза по сравнению с ненарушенными, на которых не проводились дезактивационные мероприятия. В различных функциональных зонах города в верхнем горизонте почв, нарушенных в результате земляных и рекультивационных работ, снижено содержание тяжелых металлов и нефтепродуктов.

6. Статистически значимые прямые корреляционные связи между удельной активностью <sup>137</sup>Cs и содержанием подвижных форм Zn, Pb, Cu в верхнем горизонте почв указывают на пространственную сопряженность локальных пятен радиоактивного и полиметаллического загрязнения в исследованном районе г. Электросталь.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А21-121012290189-8) и при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимова М.И., Ананко Т.В., Савицкая Н.В. Разработка подходов к введению антропогенно-измененных почв в содержание Почвенной карты Российской Федерации (на примере Московской области) // Почвоведение. 2020. № 1. С. 19–30.
2. ГН 2.1.7.2041-06 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006.
3. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
4. Кошелева Н.Е., Кузьминская Н.Ю., Терская Е.В. Распределение тяжелых металлов и металлоидов в почвенных катенах г. Серпухова // Почвоведение. 2021. № 8. С. 999–1016.
5. Линник В.Г., Борисов А.П., Иваницкий О.М., Мироненко И.В., Соколов А.В. Вертикальное распределение <sup>137</sup>Cs в почвах агрокатен Брянской области // Геохимия. 2020. № 12. С. 1198–1211.
6. Лоцилов Н.А., Кашпаров В.А., Процак В.П. Влияние вторичного пылепереноса радиоактивных веществ на загрязнение населенных пунктов в зоне Чернобыльской аварии // Гигиена и санитария. 1993. № 5. С. 39–41.
7. Макаров О.А., Макаров А.А. Подходы к оценке риска химического загрязнения городских почв // Почвоведение. 2016. № 9. С. 1147–1156.
8. Методические рекомендации по выявлению деградированных и загрязненных земель (утв. Минприроды РФ 15 февраля 1995 г.)
9. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / Под ред. Н.Г. Зырина, С.Г. Малахова. М.: Гидрометеиздат, 1981. 109 с.
10. Петрова Т.Б. Особенности формирования радиационного фона г. Москвы, обусловленного гамма-излучающими радионуклидами природного и техногенного происхождения. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 32 с.
11. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2017 г. Ежегодник. Обнинск. ФГБУ “НПО “Тайфун”. Росгидромет, 2018. 360 с.
12. Радиоэкология после Чернобыля: Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде / Пер. с англ. под ред. Ф. Уорнера, Р. Харрисона. М.: Мир, 1999. 512 с.
13. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Мишин А.С., Воробьев Б.Ф., Андерссон К.Г. Радиационно-гигиеническая оценка возможностей применения механической дезактивации в населенных пунктах Брянской области // Радиационная гигиена. 2008. № 6. Т. 1. С. 23–27.
14. Романович И.К., Брук Г.Я., Громов А.В., Рамзаев В.П. Радиационная обстановка на Электростальском заводе тяжелого машиностроения и прилегающей территории г. Электросталь, связанная с расплавлением радионуклидного источника // Актуальные вопросы радиационной гигиены. СПб., 2014. С. 165–167.
15. Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н. Радиоактивность окружающей среды. Теория и практика. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 286 с.
16. Селезнев А.А. Поверхностная локальная миграция <sup>137</sup>Cs в условиях экосистемы города // Вопросы радиационной безопасности. 2009. № 3. С. 70–76.
17. Тимофеев И.В., Кузьменкова Н.В. Пространственное распределение <sup>137</sup>Cs в почвах г. Озерск (Челябинская область) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2013. № 6. С. 23–29.
18. Хомутинин Ю.В., Кашпаров В.А., Жебровская Е.И. Оптимизация отбора и измерений проб при радиоэкологическом мониторинге. Киев: Украинский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии, 2001. 168 с.
19. Экогеохимия городских ландшафтов / Под ред. Н.С. Касимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 336 с.
20. Adeniyi A.A., Owoade O.J. Total petroleum hydrocarbons and trace heavy metals in roadside soils along the Lagos-Badagry expressway, Nigeria // Environ. Monit. Assess. 2010. V. 167. P. 625–630. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1078-3>
21. Dragovic S., Gajic B., Dragovic R., Jankovic-Mandic Lj., Slavkovic-Beskoski L., Mihailovic N., Momcilovic M., Cujic M. Edaphic factors affecting the vertical distribution of radionuclides in the different soil types of Belgrade, Serbia // J. Environ. Monit. 2012. V.14, P. 127137. <https://doi.org/10.1039/c1em10457h>
22. IUSS Working Group WRB. 2015. World reference base for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Report 106. FAO. Rome.

23. Khan A.B., Kathi S. Evaluation of heavy metal and total petroleum hydrocarbon contamination of roadside surface soil // *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2014. V. 11(8). P. 2259–2270.  
<https://doi.org/10.1007/s13762-014-0626-8>
24. Krcmova K., Robertson D., Cveckova V., Rapant S. Road-deposited sediment, soil and precipitation (RDS) in Bratislava, Slovakia: compositional and spatial assessment of contamination // *J. Soils Sediments.* 2009. V. 9. P. 304–316.  
<https://doi.org/10.1007/s11368-009-0097-6>
25. Milenkovic B., Stajic J.M., Gulan Lj., Zeremski T., Niketic D. Radioactivity levels and heavy metals in the urban soil of Central Serbia // *Environ. Sci. Poll. Res.* 2015. V. 22. P. 16732–16741.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-015-4869-9>
26. Peachey C.J., Sinnott D., Wilkinson M., Morgan G.W., Freer-Smith P.H., Hutchings T.R. Deposition and solubility of airborne metals to four plant species grown at varying distances from two heavily trafficked roads in London // *Environ. Poll.* 2009. V. 157. P. 2291–2299.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.03.032>

## Spatial Variation of the Activity of $^{137}\text{Cs}$ , the Content of Heavy Metals and Petroleum Products in Polluted Soils of the City of Elektrostal

D. N. Lipatov<sup>1, \*</sup>, V. A. Varachenkov<sup>1</sup>, D. V. Manakhov<sup>1</sup>, M. M. Karpukhin<sup>1</sup>, and S. V. Mamikhin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

\*e-mail: [dlip@soil.msu.ru](mailto:dlip@soil.msu.ru)

The levels of specific activity of  $^{137}\text{Cs}$ , the content of mobile forms (1M ammonium acetate extraction) of heavy metals (Zn, Cu, Ni, Co, Cr, Pb) and petroleum products in the upper horizon of soils of various urban landscapes of the city of Elektrostal under conditions of local radioactive and chemical contamination were studied. In the soils of the near radius (0–100 m) of the industrial zone of the heavy machinery plant, an increase in the levels of specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  and the content of mobile forms of Pb, Cu and Zn was recorded. The lognormal distribution law of  $^{137}\text{Cs}$  was revealed, 5 years after the radiation incident, the range of spatial variation in the upper 0–10 cm soil layer was from 6 to 4238 Bq/kg. The coefficients of variation increase along with the level of pollution in the following range of chemicals: Co < Ni < petroleum products < Cr <  $^{137}\text{Cs}$  < Zn < Pb < Cu, amounting to 50–435%. Statistically significant direct correlations were found between the specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  and the content of mobile forms of Pb, Cu, Zn in the upper horizon of urban soils, and this fact indicates the spatial conjugacy of local spots of radioactive and polymetallic contamination in the studied area of the city. It is shown that in the 0–10 cm layer of soils disturbed after decontamination, excavation and reclamation work, the levels of specific activity of  $^{137}\text{Cs}$ , as well as the content of heavy metals and petroleum products, are reduced.

*Keywords:* urban soils, urban ecosystems, radiation monitoring, decontamination, Urban Technosols