



Серия «Науки о Земле»
2026. Т. 56. С. 16–32
Онлайн-доступ к журналу:
<http://izvestiaye.isu.ru/ru>

ИЗВЕСТИЯ
Иркутского
государственного
университета

Научная статья

УДК 504.054(470.26)

<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.56.16>

Сравнительный анализ загрязнения почв урбанизированных территорий с промышленной и рекреационной специализацией в Калининградской области

Е. А. Архипов, С. И. Зотов, Ю. В. Королева*

Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, г. Калининград, Россия

Аннотация. Проведен сравнительный анализ загрязнения почв тяжелыми металлами и нефтепродуктами в городах Калининградской области с контрастной экономической специализацией – промышленном городе Светлом и рекреационном городе Светлогорске. В ходе сезонного мониторинга 2025 г. установлено, что почвы г. Светлого характеризуются очаговым загрязнением с формированием устойчивых геохимических аномалий, где средний уровень загрязнения ($NPI = 2,58$) определяется значительным накоплением свинца, цинка и нефтепродуктов. Для почв Светлогорска выявлен фоновый уровень содержания тяжелых металлов ($NPI = 1,36$) с пространственно однородным распределением. Доказана критическая зависимость результатов оценки от выбора фоновых значений – применение локального фона, установленного для региона, позволило выявить истинную техногенную нагрузку. Комплексное применение индексов загрязнения (I_{geo} , PI , EF , NPI , PLI) показало свою эффективность для дифференцированной оценки урбанизированных территорий. Результаты работы имеют практическое значение для разработки систем экологического мониторинга и целевых природоохранных мероприятий с учетом функционального зонирования городских территорий.

Ключевые слова: урбанизированная территория, почвы, тяжелые металлы, фоновые концентрации, загрязнение, индексы загрязнения.

Для цитирования: Архипов Е. А., Зотов С. И., Королева Ю. В. Сравнительный анализ загрязнения почв урбанизированных территорий с промышленной и рекреационной специализацией в Калининградской области // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2026. Т. 56. С. 16–32. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.56.16>

Original article

Comparative Analysis of Soil Pollution in Urbanized Areas with Industrial and Recreational Specialization in the Kaliningrad Region

E. A. Arkhipov, S. I. Zotov, Yu. V. Koroleva*

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

Abstract. A comparative analysis of soil pollution with heavy metals and petroleum products in the cities of the Kaliningrad region with a contrasting economic specialization – the industrial city of Svetly and the recreational city of Svetlogorsk was carried out. In the course of seasonal monitoring

© Архипов Е. А., Зотов С. И., Королева Ю. В., 2026

* Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.
For complete information about the authors, see the last page of the article.

in 2025, it was established that the soils of Svetly are characterized by focal pollution with the formation of stable geochemical anomalies, where the average level of pollution (NPI = 2.58) is determined by a significant accumulation of lead, zinc and oil products. For the soils of Svetlogorsk, a background level of heavy metals (NPI = 1.36) was detected with a spatially homogeneous distribution. The critical dependence of the assessment results on the choice of background values has been proven – the use of a local background established for the region made it possible to identify the true technogenic load. The integrated application of pollution indices (Igeo, PI, EF, NPI, PLI) has been shown to be effective for graded assessment of urbanized areas. The results of the work are of practical importance for the development of environmental monitoring systems and targeted environmental measures, taking into account the functional zoning of urban areas.

Keywords: urbanized area, soils, heavy metals, background concentrations, pollution, pollution indexes.

For citation: Arkhipov E.A., Zotov S.I., Koroleva Yu.V. Comparative Analysis of Soil Pollution in Urbanized Areas with Industrial and Recreational Specialization in the Kaliningrad Region. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2026, vol. 56, pp. 16-32. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.56.16> (in Russian)

Введение

Подверженный интенсивной антропогенной нагрузке почвенный покров урбанизированных территорий является критически важным компонентом городских экосистем. Актуальность исследования загрязнения почв тяжелыми металлами обусловлена их способностью к накоплению и негативным воздействием на экологическое состояние городов и здоровье населения [Heavy ... , 2023].

Проведенные в различных регионах России исследования демонстрируют четкую зависимость между функциональным зонированием городских территорий и степенью загрязнения почвенного покрова. Исследования почв промышленных зон выявили значительное загрязнение тяжелыми металлами, связанное с выбросами промышленных предприятий и транспорта [Жарикова 2021; Sources ... , 2023; Variation ... , 2023]. Установлено, что почвы выступают аккумулятором токсикантов, которые образуют устойчивые комплексные соединения, слабо выводятся из почвенного профиля и мигрируют по пищевым цепям, создавая повышенные экологические риски [Pollution ... , 2022].

В городах с выраженной промышленной специализацией выявлено формирование устойчивых техногенных геохимических аномалий с превышением допустимых концентраций цинка (Zn), свинца (Pb), меди (Cu), кадмия (Cd) и мышьяка (As) [Архипов, Кошельков, Гладун 2024; Эколого-гигиенические ... , 2015]. Загрязнение имеет многокомпонентный характер и распространяется на селитебные территории [Эколого-гигиеническая ... , 2023; Хакимова, Асфандиярова, 2021], что подтверждает необходимость применения комплексных систем оценки и мониторинга для управления экологическими рисками в промышленных городах.

В то же время, как демонстрируют исследования, в городах рекреационные зоны также подвержены техногенному воздействию, повышенное содержание тяжелых металлов в почвах парков и скверов особенно выявляется на территориях, прилегающих к зонам интенсивной хозяйственной деятельности [Казанцев, 2016; Zemełka, Szalińska, 2017; Zgłobicki, Telecka, Skupiński, 2021; Heavy ... , 2018].

Однако комплексные исследования, напрямую сопоставляющие уровень и структуру загрязнения почв в городах с контрастной хозяйственной специализацией в пределах одного региона, остаются недостаточно изученными. Целью настоящей работы является сравнительный анализ загрязнения почв тяжелыми металлами и нефтепродуктами на урбанизированных территориях с промышленной (г. Светлый) и рекреационной (г. Светлогорск) специализацией в ходе сезонного мониторинга 2025 г.

Объекты и методы исследований

В качестве объектов исследования были выбраны урбаноземы двух городов Калининградской области с контрастным функциональным профилем – промышленного города Светлого и рекреационного города Светлогорска (рис. 1).

Светлый – типичный индустриальный город приморского типа, социально-экономический профиль в основном определяется его ролью портового города, где доминируют предприятия судостроительной отрасли и осуществляется перевалка нефти [Белова, 2018]. Округ граничит с севера и востока с Зеленоградским городским округом, а с юга – с Калининградским заливом. Численность населения на 2025 г. составляет 21 630 чел.

Светлогорск, напротив, характеризуется выраженной рекреационной специализацией, входя в число основных курортных центров Калининградской области [Федоров, 2018]. Территория муниципального образования является курортом федерального значения Светлогорск – Отрадное. Большая часть территории отнесена к 1 и 2 зонам округов санитарной и горно-санитарной охраны лечебно-оздоровительных местностей и курортов федерального значения. На 2025 г. численность населения г. Светлогорска – 15 208 чел.

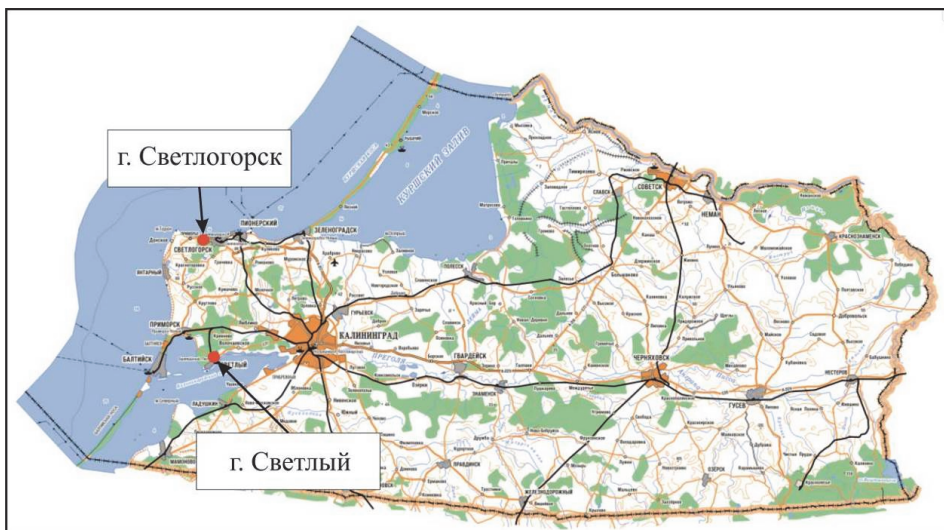


Рис. 1. Исследуемые города на карте Калининградской области

В каждом городе были определены по три пункта мониторинга почв, которые выбраны с учетом функционального зонирования территорий и включали промышленные, селитебные и рекреационные ландшафты.

В г. Светлом п. 11П расположен в зоне влияния объектов металлообработки и сварочных работ, что служит источником поступления тяжелых металлов. Пункт 12П находится в непосредственной близости от объектов комплексного нефтяного терминала, а также в зоне влияния портовой инфраструктуры в устьевой части р. Граевки и примыкает к автомобильной трассе. Пункт 13П приурочен к территории комплексного нефтяного терминала, однако, учитывая преобладание западного румба в розе ветров, потенциальный перенос загрязняющих веществ от терминала на данную точку оценивается как менее значимый по сравнению с п. 12П, тогда как основным источником здесь выступает автомобильная трасса с высокой интенсивностью движения.

В г. Светлогорске промышленные предприятия отсутствуют. Пункт 14П расположен в зоне жилой многоэтажной застройки. Пункт 15П находится в залесенной рекреационной зоне, но в непосредственной близости от автомобильной трассы, связывающей районы города, что позволяет оценить вклад транспортной эмиссии в фоновое загрязнение рекреационных территорий. Пункт 16П расположен в районе индивидуальной жилой застройки и объектов рекреационной инфраструктуры.

Для проведения исследований в каждом городе был выполнен отбор проб почв в пунктах мониторинга в весенний (апрель 2025 г.) и осенний (октябрь 2025 г.) периоды в соответствии с требованиями ГОСТ 17.4.3.01-2017¹. Для отбора использовали метод конверта на площадках размером 5×5 м, с каждой на глубину 20 см отбиралась объединенная проба, составленная из пяти точечных проб.

Аналитические исследования выполнены на базе Высшей школы живых систем БФУ им. И. Канта. Пробоподготовка почвенных образцов включала высушивание до воздушно-сухого состояния, удаление растительных остатков, измельчение и просеивание через сито (1 мм). Валовое содержание металлов (Zn, Cu, Pb, Ni, Cr, Mn, Co, Ti, V, Sr, As) определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре «Спектроскан МАКС G» по методике ФР.1.31.2016.25423. Содержание нефтепродуктов устанавливали флуориметрически на спектрометре RF-5301PC (Shimadzu) в соответствии с ПНД Ф 16.1:2.21-98. Величину рН солевой вытяжки измеряли потенциометрически (рН-метр HANNA HI 2210) по ГОСТ 26483-85². Все измерения проведены в трехкратной повторности.

Оценка загрязнения почв проведена на основании индивидуальных и комплексных индексов. Индекс геоаккумуляции Igeo (Geoaccumulation Index) служит геохимическим критерием [Muller, 1969] для выявления загрязнения:

$$I_{geo} = \log_2(C_i/1,5 GB),$$

¹ ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы почвы. Общие требования к отбору проб.

² ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее рН по методу ЦИНАО.

где C_i – содержание металла в верхнем горизонте, мг/кг; GB – фоновое содержание (или кларк), мг/кг.

Основой для расчета комплексных показателей загрязнения выступает индекс загрязнения (Single Pollution Index) по формуле [Assessment ... , 1990]:

$$PI = C_i/GB.$$

Используется для выявления наличия загрязнения отдельными поллютантами.

Далее рассмотрим комплексные индексы. Коэффициент загрязнения PLI (Pollution Load Index) рассчитывается как геометрическое среднее [Assessment ... , 1990] от PI:

$$PLI = (PI_1 * PI_2 * \dots * PI_n)^{(1/n)},$$

где n – количество металлов, принятых к расчету.

Коэффициент концентрации EF (Enrichment Factor) рассчитывается с учетом концентрации стабильного элемента [Problems ... , 1980], например, титана:

$$EF = (C_i/CT_i)/(GB_i/GBT_i),$$

где C_i – содержание i -го металла, мг/кг; CT_i – содержание Ti , мг/кг; GB_i – фоновое содержание i -го металла, мг/кг; GBT_i – фоновое содержание Ti , мг/кг.

Индекс загрязнения NPI (Nemerow Pollution Index) широко используется для оценки качества [Pollution ... , 2018], поскольку учитывает вклад не только каждого загрязнителя, но и потенциальную опасность металла-загрязнителя с наибольшим содержанием:

$$NPI = \sqrt{0,5 * (PI_{max}^2 + PI_{ave}^2)},$$

где PI_{max} – максимальное значение PI среди n металлов, а PI_{ave} – среднее значение PI.

Ввиду отсутствия установленного геохимического фона в почвах исследуемого региона, в качестве эталона сравнения были использованы кларки для городов с населением менее 100 тыс. чел. и для рекреационно-туристических центров [Алексеевко, Алексеевко, 2013]. Также применялись ПДК/ОДК по СанПиН 1.2.3685-21³, за исключением стронция (Sr), кобальта (Co) и хрома (Cr) ввиду отсутствия установленных нормативов для валовых форм этих элементов.

Допустимое содержание нефтепродуктов для почв и грунтов в Российской Федерации не нормируется. Согласно данным Ю. И. Пиковского [1993], содержание нефтепродуктов в почве до 100 мг/кг соответствует фоновой концентрации, 100–500 мг/кг – повышенно фоновый, 500–1000 мг/кг – умеренный уровень загрязнения, 1000–2000 мг/кг – умеренно опасное загрязнение, 2000–5000 мг/кг – сильное загрязнение, более 5000 мг/кг – опасное загрязнение. На данный момент при проведении инженерно-экологических изысканий

³ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

и смежных экологических работ применяют норматив в 1000 мг/кг, в соответствии с письмом Минприроды РФ от 9 марта 1995 г. № 25/8-34 «О Методических рекомендациях по выявлению деградированных и загрязненных земель».

Статистическая обработка данных (расчет средних, медиан, стандартного отклонения, коэффициентов вариации, асимметрии, а также индексов загрязнения) выполнена с использованием Microsoft Excel 2019 (настройка «Пакет анализа»).

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования выявили существенные различия в уровне и структуре загрязнения почвенного покрова урбанизированных территорий с промышленным и рекреационным профилем. Во всех пунктах отбора почвы характеризуются как супесчаные и представлены антропогенно-преобразованными урбаноземами, сформированными на насыпных грунтах. Данные почвенные образования были искусственно созданы в ходе хозяйственной деятельности человека при освоении городских территорий. Выявленные особенности почвенного покрова определяют специфику миграции и аккумуляции загрязняющих веществ в урбанизированной среде.

Анализ данных (табл. 1) выявляет значительную пространственную дифференциацию загрязнения почв г. Светлого. Высокие коэффициенты вариации для Cu (130,1 %), нефтепродуктов (84,8 %) и Pb (73,7 %) свидетельствуют о мозаичном распределении загрязняющих веществ, характерном для точечных антропогенных источников. Статистически подтвержденным индикатором наличия локальных очагов загрязнения служит положительная асимметрия распределения концентраций, особенно выраженная для Cu (2,4) и нефтепродуктов (1,7).

Установлено устойчивое превышение кларковых концентраций для Zn, Pb при сохранении содержания Cr, ванадия (V) и As в пределах ниже кларков. Кислотно-щелочной режим почв варьирует в диапазоне от слабокислого до слабощелочного (pHсол 5,3–7,8).

Данные по г. Светлогорску (табл. 2) демонстрируют принципиально иную картину загрязнения почвенного покрова по сравнению с г. Светлым. Концентрации большинства исследуемых металлов, включая Pb, Zn и Cu, устойчиво находятся ниже уровня региональных кларков, что указывает на отсутствие масштабного техногенного накопления. Характерно, что коэффициенты вариации для всех элементов не превышают 54,7 %, а значения асимметрии лежат в диапазоне от –0,6 до 0,4, не достигая единицы. Такие статистические показатели свидетельствуют об относительной однородности состава почв и отсутствии выраженных очагов загрязнения.

Содержание марганца демонстрируют стабильные значения во всех пунктах отбора, достигая 778 мг/кг в г. Светлогорске, при этом не превышая значения кларков и ПДК/ОДК.

Таблица 1

Концентрации загрязняющих веществ в почвах г. Светлого (мг/кг)

| Пункт | Sr | Pb | As | Zn | Cu | Ni | Co | Mn | Cr | V | pH _{сол} (KCl) | Нефтепро- дукты (суммарно) |
|-------------------------|----------|--------|-------|----------|--------|--------|------|----------|--------|--------|----------------------------|----------------------------------|
| <i>Весна 2025</i> | | | | | | | | | | | | |
| 11П | 78±7,8 | 25±2,5 | 5±0,5 | 124±12,4 | <5 | 10±1,0 | <1 | 221±22,1 | 53±5,3 | 18±1,8 | 6,7±0,1 | 416,6±50,0 |
| 12П | 69±6,9 | 7±0,7 | 5±0,5 | 44±4,4 | 39±3,9 | 5±0,5 | <1 | 133±13,3 | 51±5,1 | 21±2,1 | 5,3±0,1 | 108,5±13,0 |
| 13П | 100±10,0 | 18±1,8 | 3±0,3 | 33±3,3 | <5 | 7±0,7 | <1 | 261±26,1 | 49±4,9 | 20±2,0 | 7,8±0,1 | 340,8±40,9 |
| <i>Осень 2025</i> | | | | | | | | | | | | |
| 11П | 118±11,8 | 7±0,7 | 5±0,5 | 43±4,3 | <5 | 10±1,0 | <1 | 242±24,2 | 48±4,8 | 18±1,8 | 6,7±0,1 | 183,5±22,0 |
| 12П | 86±8,6 | 47±4,7 | 8±0,8 | 59±5,9 | <5 | 9±0,9 | <1 | 213±21,3 | 49±4,9 | 12±1,2 | 6,6±0,1 | 170,0±20,4 |
| 13П | 179±17,9 | 17±1,7 | 4±0,4 | 171±17,1 | <5 | 21±2,1 | <1 | 368±36,8 | 47±4,7 | 23±2,3 | 7,2±0,1 | 933,8±112,1 |
| Кларк | 324,5 | 39,5 | 15 | 92,4 | 28,2 | 18,4 | 14,6 | 457,5 | 81,5 | 104,1 | – | – |
| ПДК/ОДК | – | 32 | 2 | 55 | 33 | 20 | – | 1500 | – | 150 | – | 1000 |
| Среднее арифметическое | 105,0 | 20,2 | 5,0 | 79,0 | 10,7 | 10,3 | 1,0 | 239,7 | 49,5 | 18,7 | 6,7 | 358,9 |
| Медиана | 93,0 | 17,5 | 5,0 | 51,5 | 5,0 | 9,5 | 1,0 | 231,5 | 49,0 | 19,0 | 6,7 | 262,2 |
| Стандартное отклонение | 40,1 | 14,9 | 1,7 | 55,7 | 13,9 | 5,6 | 0,0 | 76,6 | 2,2 | 3,8 | 0,8 | 304,4 |
| Коэффициент вариации, % | 38,2 | 73,7 | 33,5 | 70,5 | 130,1 | 53,9 | 0,0 | 32,0 | 4,4 | 20,2 | 12,3 | 84,8 |
| Минимум | 69 | 7 | 3 | 33 | 5 | 5 | 1 | 133 | 47 | 12 | 5,3 | 108,5 |
| Максимум | 179 | 47 | 8 | 171 | 39 | 21 | 1 | 368 | 53 | 23 | 7,8 | 933,8 |
| Асимметрия | 1,5 | 1,4 | 1,2 | 1,2 | 2,4 | 1,8 | – | 0,6 | 0,8 | –1,1 | –0,7 | 1,7 |

Таблица 2

Концентрации загрязняющих веществ в почвах г. Светлогорска (мг/кг)

| Пункт | Sr | Pb | As | Zn | Cu | Ni | Co | Mn | Cr | V | pH _{сол} (KCl) | Нефтепродукты (суммарно) |
|-------------------------|----------|--------|-------|--------|------|--------|------|----------|--------|--------|----------------------------|-----------------------------|
| <i>Весна 2025</i> | | | | | | | | | | | | |
| 14П | 120±12,0 | 19±1,9 | 5±0,5 | 91±9,1 | <5 | 14±1,4 | <1 | 703±70,3 | 59±5,9 | 35±3,5 | 7,3±0,1 | 43,7±5,2 |
| 15П | 54±5,4 | 12±1,2 | 6±0,6 | 40±4,0 | <5 | 10±1,0 | <1 | 644±64,4 | 60±6,0 | 35±3,5 | 5,8±0,1 | 88,9±10,7 |
| 16П | 67±6,7 | 9±0,9 | 4±0,4 | 25±2,5 | <5 | 10±1,0 | <1 | 135±13,5 | 47±4,7 | 20±2,0 | 6,5±0,1 | 82,8±9,9 |
| <i>Осень 2025</i> | | | | | | | | | | | | |
| 14П | 117±11,7 | 8±0,8 | 5±0,5 | 93±9,3 | <5 | 15±1,5 | <1 | 512±51,2 | 66±6,6 | 42±4,2 | 6,6±0,1 | 542,4±65,1 |
| 15П | 133±13,3 | 17±1,7 | 5±0,5 | 76±7,6 | <5 | 8±0,8 | <1 | 778±77,8 | 59±5,9 | 25±2,5 | 6,3±0,1 | 352,2±42,3 |
| 16П | 44±4,4 | 5±0,5 | 4±0,4 | 28±2,8 | <5 | 11±1,1 | <1 | 195±19,5 | 54±5,4 | 25±2,5 | 6,7±0,1 | 166,6±20,0 |
| Кларк | 550,7 | 55,2 | 21,5 | 199,9 | 56,9 | 39,8 | 18,1 | 1124,6 | 88,1 | 115,4 | – | – |
| ПДК/ОДК | – | 32 | 2 | 55 | 33 | 20 | – | 1500 | – | 150 | – | 1000 |
| Среднее арифметическое | 89,2 | 11,7 | 4,8 | 58,8 | 5,0 | 11,3 | 1,0 | 494,5 | 57,5 | 30,3 | 6,5 | 212,8 |
| Медиана | 92,0 | 10,5 | 5,0 | 58,0 | 5,0 | 10,5 | 1,0 | 578,0 | 59,0 | 30,0 | 6,5 | 127,8 |
| Стандартное отклонение | 38,5 | 5,4 | 0,8 | 31,5 | 0,0 | 2,7 | 0,0 | 270,3 | 6,4 | 8,3 | 0,5 | 195,5 |
| Коэффициент Вариации, % | 43,2 | 46,5 | 15,6 | 53,5 | 0,0 | 23,5 | 0,0 | 54,7 | 11,1 | 27,3 | 7,9 | 91,9 |
| Минимум | 44 | 5 | 4 | 25 | 5 | 8 | 1 | 135 | 47 | 20 | 5,8 | 43,7 |
| Максимум | 133 | 19 | 6 | 93 | 5 | 15 | 1 | 778 | 66 | 42 | 7,3 | 542,4 |
| Асимметрия | -0,1 | 0,3 | 0,3 | 0 | – | 0,4 | – | -0,6 | -0,6 | 0,2 | 0 | 1,2 |

На этом фоне особенно контрастирует динамика нефтепродуктов, где в пункте 14П зафиксирован резкий рост концентрации с 43,7 мг/кг весной до 542,4 мг/кг осенью, что указывает на источник углеводородного загрязнения, связанный с интенсивным движением автотранспорта.

В целом загрязнение нефтепродуктами оценивалось путем прямого сопоставления с нормативным значением 1000 мг/кг, ни в одной из проб не зафиксировано превышение данного норматива (максимальное значение 933,8 мг/кг в г. Светлом).

Светлогорск характеризуется относительно низкой антропогенной нагрузкой, результаты исследований демонстрируют пространственную однородность содержания загрязняющих веществ в почвах. На основании этих данных рассчитаны условные фоновые концентрации для городских почв. Полученные медианные значения, представленные в табл. 3, могут рассматриваться в качестве регионального фона для городских почв Калининградской области, характеризующихся сходными литологическими и геохимическими условиями, и служить основой для сравнительной оценки загрязнения в других урбанизированных территориях региона с более высокой антропогенной нагрузкой.

Таблица 3

Рассчитанные фоновые концентрации элементов в городских почвах (мг/кг)

| Sr | Pb | As | Zn | Cu | Ni | Co | Mn | Cr | V | pH _{сол} (KCl) | Нефтепродукты (суммарно) |
|------|------|-----|------|-----|------|-----|-------|------|------|----------------------------|-----------------------------|
| 92,0 | 10,5 | 5,0 | 58,0 | 5,0 | 10,5 | 1,0 | 578,0 | 59,0 | 30,0 | 6,5 | 127,8 |

Поскольку содержание нефтепродуктов во всех исследованных пробах не превышало установленный норматив, их включение в комплексные индексы загрязнения могло бы снизить репрезентативность оценки. В связи с этим дальнейший расчет интегральных показателей проводился только по тяжелым металлам, что позволяет более точно оценить техногенную нагрузку, обусловленную именно металлами.

Сопоставление значений индекса геоаккумуляции (I_{geo}) для Светлогорска и Светлого (табл. 4) выявляет принципиально важную зависимость результатов оценки от выбора фоновых значений. При использовании глобальных кларков оба города демонстрируют отрицательные значения индекса I_{geo} как по кларкам, так и по локальному фону для всех элементов в обоих городах, и относятся к категории «чистые» ($I_{geo} < 0$), указывают на отсутствие значительного антропогенного накопления тяжелых металлов. Единственное положительное значение $I_{geo} = 0,01$ по Pb в г. Светлом находится между категориями «чистые» и «загрязнение от слабого до среднего» ($0 < I_{geo} < 1$), что может говорить о начальной стадии накопления элемента в почвенном покрове.

При этом анализ единичного индекса загрязнения (PI) выявляет интересную особенность. При использовании глобальных кларков все значения PI остаются ниже 1, что формально свидетельствует об отсутствии загрязнения. Однако расчеты относительно локального фона показывают, что в г. Светлом для Pb (1,9) и Zn (1,4) индекс PI превышает единицу, что указывает на слабый

уровень загрязнения этими элементами. Среднее значение PI по меди (2,1) носит лишь локальный характер из-за повышенных концентраций только в одном пункте (12П), следовательно, говорить о тенденции загрязнения почв этим элементом преждевременно и требует дальнейших исследований. В Светлогорске все значения PI по локальному фону близки к 1, что соответствует пограничному состоянию между фоном и слабым загрязнением.

Несмотря на формальное отсутствие загрязнения по шкале Igeo, в почвах г. Светлого присутствуют начальные признаки техногенного накопления отдельных элементов.

Таблица 4

Значения Igeo и PI в исследуемых городах за 2025 г. по разным нормативам

| Город | Значение индекса | Sr | Pb | As | Zn | Cu | Ni | Co | Mn | Cr | V |
|-------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Светлый | Igeo | | | | | | | | | | |
| | Среднее (по кларкам) | -0,59 | -0,49 | -0,34 | -0,36 | -0,55 | -0,53 | -0,95 | -0,55 | -0,20 | -0,62 |
| | Среднее (по фону) | -0,14 | 0,01 | -0,20 | -0,12 | -0,03 | -0,23 | -0,18 | -0,58 | -0,25 | -0,39 |
| | PI | | | | | | | | | | |
| | Среднее (по кларкам) | 0,3 | 0,5 | 0,3 | 0,9 | 0,4 | 0,6 | 0,1 | 0,5 | 0,6 | 0,2 |
| | Среднее (по фону) | 1,1 | 1,9 | 1,0 | 1,4 | 2,1 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | 0,8 | 0,6 |
| Светлогорск | Igeo | | | | | | | | | | |
| | Среднее (по кларкам) | -0,49 | -0,52 | -0,37 | -0,30 | -0,71 | -0,45 | -0,95 | -0,39 | -0,12 | -0,43 |
| | Среднее (по фону) | -0,23 | -0,17 | -0,20 | -0,23 | -0,18 | -0,15 | -0,10 | -0,33 | -0,19 | -0,19 |
| | PI | | | | | | | | | | |
| | Среднее (по кларкам) | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,4 | 0,7 | 0,3 |
| | Среднее (по фону) | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 1,3 | 0,9 | 1,0 | 1,0 |

Средние значения коэффициента накопления (EF) на рис. 2 позволяют наглядно сравнить интенсивность накопления тяжелых металлов в почвах двух городов. Данные демонстрируют существенное превышение значений EF для г. Светлого по большинству элементов по сравнению с г. Светлогорском, что указывает на более высокий уровень техногенной нагрузки.

Наиболее выраженная разница наблюдается для Pb, где значение EF в г. Светлом (4,8) более чем в три раза превышает показатель г. Светлогорска (1,4), особенно для Cu – 5,1 против 1,4. Это позволяет классифицировать накопление данных элементов в г. Светлом как значительное (уровень 2-5), в то время как в г. Светлогорске оно соответствует минимальному уровню (EF < 2). Аналогичная, хотя и менее контрастная, картина наблюдается для Zn, As, никеля (Ni) и Sr. Высокие значения EF для специфических загрязнителей, таких как Pb и Zn, являются индикатором наличия в г. Светлом локальных промышленных или транспортных источников загрязнения почв.

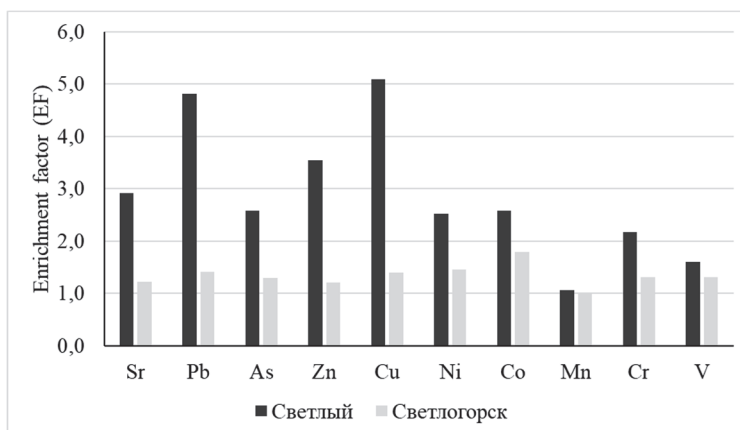


Рис. 2. Диаграмма сравнения средних значений EF по каждому элементу

Анализ комплексных индексов загрязнения в табл. 5 выявляет принципиальные различия в экологическом состоянии почв двух городов. Для г. Светлого расчеты по локальному фону показывают средний уровень загрязнения ($NPI = 2,58$), тогда как оценка по глобальным кларкам существенно занижает реальную антропогенную нагрузку ($NPI = 0,88$). Такой контраст подтверждает наличие значительного техногенного воздействия, связанного с местными источниками загрязнения. При этом индекс PLI ($0,98$) приближается к пороговому значению, указывая на начавшийся процесс накопления поллютантов, хотя формально еще не свидетельствует о деградации почв.

Таблица 5

Значения NPI , PLI и Zc^* в исследуемых городах за 2025 г.

| Значение индекса | NPI | | PLI | | Zc | |
|--------------------|---------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|-----------------------|
| | Уровень | Категория загрязнения | Уровень | Категория загрязнения | Уровень | Категория загрязнения |
| <i>Светлый</i> | | | | | | |
| Среднее (кларк) | 0,88 | Пограничный уровень | 0,33 | Отсутствие деградации | 3,19 | Допустимая |
| Среднее (по фону) | 2,58 | Среднее загрязнение | 0,98 | Отсутствие деградации | 8,26 | Допустимая |
| <i>Светлогорск</i> | | | | | | |
| Среднее (кларк) | 0,50 | Чистая | 0,21 | Отсутствие деградации | 2,7 | Допустимая |
| Среднее (по фону) | 1,36 | Слабое загрязнение | 0,93 | Отсутствие деградации | 5,99 | Допустимая |

Примечание. * Zc – суммарный показатель загрязнения почвы.

Для г. Светлогорска оба метода оценки демонстрируют относительно благоприятную ситуацию. Значение $NPI = 1,36$ характеризует слабое загрязнение, а $PLI = 0,93$ подтверждает отсутствие значительной аккумуляции тяже-

лых металлов. Индекс Zc в обоих городах указывает на допустимую категорию загрязнения, однако его более высокое значение в г. Светлом (8,26 против 5,99) свидетельствует о большей напряженности экологической обстановки.

Полученные результаты коррелируют с функциональным зонированием территорий: повышенные показатели г. Светлого соответствуют промышленному профилю города, тогда как параметры г. Светлогорска характерны для рекреационных территорий с минимальным техногенным воздействием.

На основании проведенного комплексного анализа концентраций тяжелых металлов в почвах г. Светлого (рис. 3) и г. Светлогорска (рис. 4) были построены карты пространственного распределения загрязняющих веществ.



Рис. 3. Картограмма загрязнения почв в г. Светлом

Для г. Светлого характерно мозаичное распределение загрязняющих веществ с формированием локальных очагов повышенных концентраций, особенно выраженных для нефтепродуктов, Pb и Zn. Выявленные аномалии демонстрируют приуроченность к участкам интенсивной антропогенной нагрузки, вблизи промышленных зон.

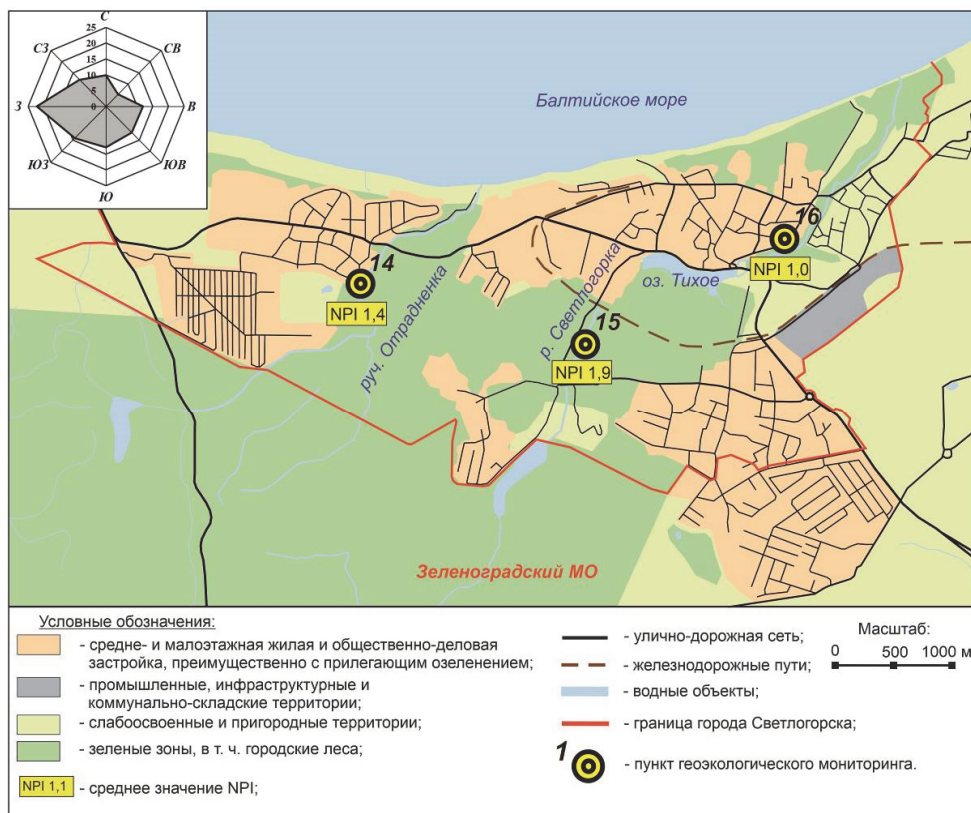


Рис. 4. Картограмма загрязнения почв в г. Светлогорске

В частности, п. 12П расположен в непосредственной близости от терминала нефтеперевалки и портовой инфраструктуры, наиболее вероятно поступление Zn и Pb при металлообработке и сварочных работах на производственной площадке, характеризуется максимальными значениями уровня загрязнения. Пункты 11П и 13П испытывают меньшее влияние благодаря преобладающему западному переносу воздушных масс, однако здесь сказывается воздействие автомобильного транспорта.

Пространственное распределение загрязняющих веществ в г. Светлогорске отличается большей однородностью, с отсутствием резко выраженных геохимических аномалий. Незначительные колебания концентраций носят фоновый характер и не образуют устойчивых полей загрязнения, что в целом отражает рекреационный профиль территории с отсутствием промышленного производства.

Выводы

1. Установлено принципиальное различие в уровне и структуре загрязнения почв урбанизированных территорий с контрастным функциональным профилем. Почвы промышленного г. Светлого характеризуются очаговым загрязнением, с формированием устойчивых геохимических аномалий, где

средний уровень загрязнения ($NPI = 2,58$) определяется значительным накоплением Pb и Zn. В рекреационном г. Светлогорске выявлен фоновый уровень содержания тяжелых металлов ($NPI = 1,36$) с пространственно однородным распределением, что подтверждает минимальное техногенное воздействие.

2. Использование глобальных кларков приводит к существенной недооценке реальной антропогенной нагрузки, в то время как применение локального фона городских почв (на примере Светлогорска) позволяет выявить истинную техногенную составляющую. Это подтверждается значительным ростом индексов PI и NPI при переходе от кларков к локальному фону для г. Светлого.

3. Отдельные индексы (EF и PI) указывают на техногенное накопление Pb ($EF = 4,8$) и Zn ($EF = 3,5$), что коррелирует с промышленным и портовым профилем г. Светлого. На рекреационной территории, в г. Светлогорске, определяются минимальные коэффициенты обогащения ($EF < 2$) для большинства элементов.

4. Обоснована практическая значимость работы для системы экологического мониторинга и градостроительного планирования. Для г. Светлого необходимы приоритетные меры по идентификации и ликвидации локальных источников загрязнения, в то время как для г. Светлогорска достаточно режима фонового мониторинга.

Список литературы

- Алексеенко В. А., Алексеенко А. В.* Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных ландшафтов. Ростов н/Д : Изд-во ЮФУ, 2013. 380 с.
- Архипов Е. А., Кошельков А. М., Гладун И. В.* Оценка загрязнения тяжелыми металлами и мышьяком почв города Комсомольск-на-Амуре // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28, № 6. С. 42–49. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-6-42-49>
- Белова А. В.* Полусредние города Калининградской области и их потенциал поля расселения // Псковский регионалогический журнал. 2018. № 3(35). С. 26–34.
- Жарикова Е. А.* Тяжелые металлы в городских почвах: оценка содержания и экологического риска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 1. С. 164–173. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3009>
- Казанцев И. В.* Загрязнение почв рекреационных зон города Самары тяжелыми металлами // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. 2016. № 4-3(75). С. 15–17.
- Пиковский Ю. И.* Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М. : Изд-во МГУ, 1993. 206 с.
- Федоров Г. М.* Калининградская область: приграничное приморское положение как географический фактор развития экономики // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2018. № 4. С. 5–17.
- Хакимова Г. В., Асфандиярова Л. Р.* Оценка влияния антропогенных и техногенных факторов на загрязненность почвенного покрова города // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 4 (46). С. 118–123. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2021-4-118-123>
- Эколого-гигиеническая оценка почв промышленного города со стекольным производством по содержанию тяжелых металлов и мышьяка / Т. А. Трифонова, А. А. Марцев, О. Г. Селиванов [и др.] // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102, № 6. С. 549–555. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-6-549-555>
- Эколого-гигиенические особенности антропогенного загрязнения почвы территории промышленного города / О. В. Сазонова, Г. М. Трухина, И. Ф. Сухачева [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 7-1. С. 150–156.
- Assessment of metal mobility in sludges and solid wastes / U. Forstner, W. Ahlf, W. Calmano [et al.] // Metal Speciation in the Environment. Ecological Sci. Series G. 23. Springer, 1990. P. 1–41.

Heavy metals contamination, receptor model-based sources identification, sources-specific ecological and health risks in road dust of a highly developed city / M. Das, R. Proshad, K. Chandra [et al.] // *Environmental Geochemistry and Health*. 2023. Vol. 45, N 11. P. 8633–8662. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01736-z>

Heavy metal content and mobility in urban soils of public playgrounds and sport facility areas, Poland / S. Ł. Róžański, W. Kwasowski, J. M. P. Castejón [et al.] // *Chemosphere*. 2018. Vol. 212. P. 456–466. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.109>

Muller G. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River // *Geojournal*. 1969. Vol. 2. P. 108–118.

Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination – A review / J. B. Kowalska, R. Mazurek, M. Gasiorek [et al.] // *Environmental Geochemistry and Health*. 2018. Vol. 40. P. 2395–2420.

Pollution, sources, and human health risk assessment of heavy metals in urban areas around industrialization and urbanization-Northwest China / F. J. Li, H. W. Yang., R. Ayyamperumal [et al.] // *Chemosphere*. 2022. Vol. 308. P. 136396. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136396>.

Problems in the assessment of heavy metals in estuaries and the formation pollution index / D. C. Tomlinson, J. G. Wilson, C. R. Harris [et al.] // *Helgoland Marine Research*. 1980. Vol. 33. P. 566–575.

Sources and probabilistic ecological-health risks of heavy metals in road dust from urban areas in a typical industrial city / Q. Hao, X. Lu, B. Yu [et al.] // *Urban Climate*. 2023. Vol. 52. P. 101730. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101730>

Variation in pollution status, sources, and risks of soil heavy metals in regions with different levels of urbanization / F. Zheng, X. Guo, M. Tang [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 866. P. 161355. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161355>

Zemelka G., Szalińska E. Heavy metal contamination of sediments from recreational reservoirs of urban areas and its environmental risk assessment // *Inżynieria i Ochrona Środowiska*. 2017. Vol. 20, N 1. P. 131–145.

Zglobicki W., Telecka M., Skupiński S. Heavy metals in playgrounds in Lublin (E Poland): sources, pollution levels and health risk // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28, N 15. P. 18328–18341.

References

Alekseenko V.A., Alekseenko A.V. *Himicheskie elementy v geohimicheskikh sistemah. Klarki pochv selitel'nyh landshaftov* [Chemical elements in geochemical systems. Clarks of soils of residential landscapes]. Rostov-on-Don, YuFU Publ., 2013, 380 p. (in Russian)

Arhipov E.A., Koshelkov A.M., Gladun I.V. Ocenka zagryazneniya tyazhelymi metallami i mysh'yakom pochv goroda Komsomolsk-na-Amure [Assessment of pollution by heavy metals and arsenic of soils of the city of Komsomolsk-on-Amur]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2024, vol. 28, no. 6, pp. 42-49. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-6-42-49> (in Russian)

Belova A.V. Polusrednie goroda Kaliningradskoj oblasti i ih potencial polya rasseleniya [Medium-sized cities of the Kaliningrad region and their potential for settlement field]. *Pskovskij regionologicheskij zhurnal* [Pskov Regionological Journal], 2018, no. 3(35), pp. 26-34. (in Russian)

Zharikova E.A. Tyazhelye metally v gorodskih pochvah: ocenka sodержaniya i ekologicheskogo riska [Heavy metals in urban soils: assessment of content and ecological risk]. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources], 2021, vol. 332, no. 1, pp. 164-173. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3009> (in Russian)

Kazancev I.V. Zagryaznenie pochv rekreatsionnyh zon goroda Samary tyazhelymi metallami [Pollution of soils in recreational zones of the city of Samara by heavy metals]. *Novaya nauka: Teoreticheskij i prakticheskij vzglyad* [New Science: Theoretical and Practical View], 2016, no. 4-3(75), pp. 15-17. (in Russian)

Pikovskij Yu.I. *Prirodnye i tehnogennye potoki uglevodorodov v okruzhayushchej srede* [Natural and technogenic flows of hydrocarbons in the environment]. Moscow, Publ. MSU, 1993, 206 p. (in Russian)

Fedorov G.M. Kaliningradskaya oblast: prigranichnoe primorskoe polozhenie kak geograficheskij faktor razvitiya ekonomik. [Kaliningrad region: border coastal position as a geographical factor of economic development]. *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Ser.: Estestvennye i medicinskie nauki* [Bulletin of the Baltic Federal University named after I. Kant. Ser.: Natural and Medical Sciences], 2018, no. 4, pp. 5-17. (in Russian)

Hakimova G.V., Asfandiyarova L.R. Ocenka vliyaniya antropogennyh i tehnogennyh faktorov na zagryaznennost pochvennogo pokrova goroda [Assessment of the influence of anthropogenic and technogenic factors on the pollution of the city's soil cover]. *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy* [Environmental Monitoring Systems], 2021, no. 4(46), pp. 118-123. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2021-4-118-123>. (in Russian)

Trifonova T.A., Martcev A.A., Selivanov O.G. et al. Ekologo-gigienicheskaya ocenka pochv promyshlennogo goroda so stekol'nym proizvodstvom po sodержaniyu tyazhelyh metallov i mysh'yaka [Ecological and hygienic assessment of soils of an industrial city with glass production by the content of heavy metals and arsenic]. *Gigiya i sanitaria* [Hygiene and Sanitation], 2023, vol. 102, no. 6, pp. 549-555. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-6-549-555> (in Russian)

Sazonova O.V., Truhina G.M., Suhacheva I.F. et al. Ekologo-gigienicheskie osobennosti antropogennogo zagryazneniya pochvy territorii promyshlennogo goroda [Ecological and hygienic features of anthropogenic pollution of the soil of the industrial city territory]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamentalnyh issledovanij* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2015, no. 7-1, pp. 150-156. (in Russian)

Forstner U., Ahlf W., Calmano W. et al. Assessment of metal mobility in sludges and solid wastes. *Metal Speciation in the Environment. Ecological Sci. Series G. 23*. Springer, 1990, pp. 1-41.

Das M., Proshad R., Chandra K. et al. Heavy metals contamination, receptor model-based sources identification, sources-specific ecological and health risks in road dust of a highly developed city. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, vol. 45, no. 11, pp. 8633-8662. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01736-z>

Rózański S.Ł., Kwasowski W., Castejón J.M.P. et al. Heavy metal content and mobility in urban soils of public playgrounds and sport facility areas, Poland. *Chemosphere*, 2018, vol. 212, pp. 456-466. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.109>

Muller G. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 1969, vol. 2, pp. 108-118.

Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M. et al. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, vol. 40, pp. 2395-2420.

Li F.J., Yang H.W., Ayyamperumal R. et al. Pollution, sources, and human health risk assessment of heavy metals in urban areas around industrialization and urbanization-Northwest China. *Chemosphere*, 2022, vol. 308, p. 136396. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136396>

Tomlinson D.C., Wilson J.G., Harris C.R. et al. Problems in the assessment of heavy metals in estuaries and the formation pollution index. *Helgoland Marine Research*, 1980, vol. 33, pp. 566-575.

Hao Q., Lu X., Yu B. [et al.] Sources and probabilistic ecological-health risks of heavy metals in road dust from urban areas in a typical industrial city. *Urban Climate*, 2023, vol. 52, p. 101730. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101730>

Zheng F., Guo X., Tang M. et al. Variation in pollution status, sources, and risks of soil heavy metals in regions with different levels of urbanization. *Science of the Total Environment*, 2023, vol. 866, p. 161355. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161355>

Zemelka G., Szalińska E. Heavy metal contamination of sediments from recreational reservoirs of urban areas and its environmental risk assessment. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 131-145.

Zgłobicki W., Telecka M., Skupiński S. Heavy metals in playgrounds in Lublin (E Poland): sources, pollution levels and health risk. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, no. 15, pp. 18328-18341.

Сведения об авторах

Архипов Егор Александрович
аспирант, Высшая школа живых систем
Балтийский федеральный университет
им. И. Канта
Российская Федерация, 236040,
г. Калининград, ул. Университетская, 2
e-mail: egor.arhipov2000@gmail.com

Зотов Сергей Игоревич
доктор географических наук, профессор
Высшей школы живых систем
Балтийский федеральный университет
им. И. Канта
Российская Федерация, 236040,
г. Калининград, ул. Университетская, 2
e-mail: zotov.prof@gmail.com

Королева Юлия Владимировна
кандидат географических наук, доцент
Высшей школы живых систем
Балтийский федеральный университет
им. И. Канта
Российская Федерация, 236040,
г. Калининград, ул. Университетская, 2
e-mail: yu.koroleff@yandex.ru

Information about the authors

Arkhipov Egor Aleksandrovich
Postgraduate, Higher School of Living Systems
Immanuel Kant Baltic Federal University
2, Universitetskaya st., Kaliningrad, 236040,
Russian Federation
e-mail: egor.arhipov2000@gmail.com

Zotov Sergey Igorevich
Doctor of Sciences (Geography), Professor
of the Higher School of Living Systems
Immanuel Kant Baltic Federal University
2, Universitetskaya st., Kaliningrad, 236040,
Russian Federation
e-mail: zotov.prof@gmail.com

Koroleva Yulia Vladimirovna
Candidate of Sciences (Geography),
Associate Professor of the Higher School of
Living Systems
Immanuel Kant Baltic Federal University
2, Universitetskaya st., Kaliningrad, 236040,
Russian Federation
e-mail: yu.koroleff@yandex.ru

Код научной специальности: 1.6.21

Статья поступила в редакцию 12.01.2026; одобрена после рецензирования 22.03.2026; принята к публикации 08.06.2026

The article was submitted January, 12, 2026; approved after reviewing March, 22, 2026; accepted for publication June, 08, 2026