https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-116-122

Оригинальная статья

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2021

Читать онлайн

Масленникова И.Л., Шишкин М.А., Шерстобитова Н.П., Кузнецова М.В.

Эколого-гигиеническая оценка почв селитебной зоны г. Перми

Институт экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», 614081, Пермь, Россия

Введение. *Представления о влиянии процессов антропогенеза на экологическое состояние почвы являются основой для усовершенствования системы контроля загрязнения окружающей среды и принятия архитектурно-планировочных решений.*
Материалы и методы. *В период 2016–2018 гг. выполнена экологическая оценка загрязнения 214 образцов городских почв. Почвенная съёмка проведена по случайно-упорядоченной сети из расчёта одна пробная площадка на 1 км². Концентрацию тяжёлых металлов определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Анализ органических соединений проводили методом газовой хромато-масс-спектрометрии. Общее количество гетеротрофных и грамотрицательных бактерий, в том числе представителей семейства Enterobacteriaceae, определяли методом прямого высева на селективные агаризованные среды. Статистическая обработка данных выполнена в программе Statistica.*
Результаты. *Проведена оценка уровня химического загрязнения почв г. Перми водорастворимыми формами тяжёлых металлов. Концентрация тяжёлых металлов **Cu**, Pb, Zn, Fe, Cd, Ni, Mn в контрольных образцах песчаных/суглинистых почв составляла 0,09/0,15; 0,08/0,22; 0,22/0,39; 5,57/16,14; 0,02/0,01; 0,06/0,13; 0,74/3,14 мг/л соответственно. Значения показателя суммарного загрязнения (Zc) выше 16 зафиксированы на 4,7% пробных площадок, что соответствует умеренной степени загрязнения. Показано, что тип почв влиял на Zc (KW-H (3; 214) = 30,73; p = 0,00001) и составлял для суглинистых почв 6,24 ± 3,72; для торфов – 22,42 ± 12,32; для песчаных – 9,23 ± 5,70; для старых урбанозёмов – 8,37 ± 4,07. Выявлено, что медианные значения содержания гетеротрофов в почвах I (Zc: 0–4) и IV (Zc ⩽ 16) групп соответствовали категории «бедные», II (Zc: 4–8) и III (Zc: 8–16) групп – «очень бедные» почвы. Корреляция между содержанием гетеротрофов и числом бактерий E. coli не выявлена. Для каждой группы почв по Zc не отмечено статистических различий по содержания фталатов.*
Заключение. *Экологическая оценка почв должна иметь комплексный характер, так как выявленные авторами виды антропогенного химического загрязнения, имеющие разную степень сопряжения между собой, влияют на количественные показатели почвенной микробиоты, что в будущем может определять способность поддержания гомеостаза данной экосистемы.*

Ключевые слова: *городские почвы; тяжёлые металлы; фталаты; гетеротрофы; E. coli*

Для цитирования: Масленникова И.Л., Шишкин М.А., Шерстобитова Н.П., Кузнецова М.В. Эколого-гигиеническая оценка почв селитебной зоны г. Перми. *Гигиена и санитария.* 2021; 100 (1): 116-122. https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-116-122

Для корреспонденции: *Масленникова Ирина Леонидовна*, кандидат биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. иммунорегуляции ИЭГМ УрО РАН, 614081, Пермь, Россия. E-mail: I.Maslennikova1974@gmail.com

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.
Благодарность. Работа поддержана грантом РФФИ-Урал 16-45-590497. Работа выполнена в рамках государственного задания АААА-А19-119112290008-4. Авторы выражают благодарность сотрудникам группы физико-химических исследований ИЭГМ УрО РАН – кандидату геогр. наук А.К. Лаптевой, ведущему инженеру В.А. Гусеву.
Участие авторов: *Масленникова И.Л.* – сбор и обработка материала, статистическая обработка, написание текста, редактирование; *Шишкин М.А., Кузнецова М.В.* – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, редактирование; *Шерстобитова Н.П.* – сбор и обработка материала. *Все соавторы* – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Поступила 06.02.2020 / Принята к печати 18.09.2020 / Опубликована 30.03.2021

Irina L. Maslennikova, Mihail A. Shishkin, Natal'ya P. Sherstobitova, Marina V. Kuznetsova

Ecological evaluation of the urban soil in Perm

Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, 614081, Russian Federation

Introduction. *Representations of the impact of anthropogenesis processes on the soil's ecological state are the basis for improvement of the environmental pollution monitoring system to make correct architectural and planning decisions.*
Material and methods*. During 2016-2018 an environmental assessment of pollution of 214 samples of urban soils was performed. The soil analysis was carried out according to a random sample as one test site per 1 km². The concentration of heavy metals was determined by atomic absorption spectrometry. The analysis of organic compounds was carried out by gas chromatography-mass spectrometry. The total number of heterotrophic and gram-negative bacteria of the Enterobacteriaceae family was determined by direct seeding on selective media. Statistical data processing was carried out using software Statistica.*
Results. *The level of chemical contamination with water-soluble forms of heavy metals of Perm soils was assessed. The concentration of heavy metals **Cu**, Pb, Zn, Fe, Cd, Ni, Mn in the control samples of sandy/loamy soils was 0.09/0.15; 0.08/0.22; 0.22/0.39; 5.57/16.14; 0.02/0.01; 0.06/0.13; 0.74/3.14 mg/l, respectively. The values of the total pollution index (Zc) above 16 were recorded at 4.7% of the soil samples, which corresponds to a moderate degree of pollution. It was shown that the soil type influenced Zc (KW-H (3; 214) = 30.73; p = 0.00001) and amounted to 6.24 ± 3.72 for loamy soils; for peat – 22.42 ± 12.32; for sand – 9.23 ± 5.70; for old urban soils – 8.37 ± 4.07. The median of the heterotroph bacteria content in the soils for I (Zc: 0-4) and IV (Zc ⩽ 16) groups was revealed to correspond to the categories of «poor,» II (Zc: 4-8) and III (Zc: 8-16) groups – «inferior» soil. A correlation between the content of heterotrophs and the number of bacteria E. coli was not detected. According to Zc, for each soil group, no statistical differences in phthalate content were noted.*
Conclusion*. Environmental assessment of soils should be comprehensive, as the types of anthropogenic chemical pollution, that have varying degrees of correlations between each other, affect quantitative changes in soil microbiota, which in the future may determine the ability to maintain homeostasis in this ecosystem.*

Keywords: *urban soils; heavy metals; phthalates; heterotrophs; E. coli*

For citation: Maslennikova I.L., Shishkin M.A., Sherstobitova N.P., Kuznetsova M.V. Ecological evaluation of the urban soil in Perm. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2021; 100 (2): 116-122. https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-116-122 (In Russ.)

For correspondence: *Irina L. Maslennikova*, MD, Ph.D., senior researcher of the laboratory of immunoregulation of the Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, 614081, Russian Federation. E-mail: I.Maslennikova1974@gmail.com

Original article

Information about the authors:
Maslennikova I.L., https://orcid.org/0000-0002-2776-8023; Shishkin M.A., https://orcid.org/0000-0002-4177-178X
Sherstobitova N.P., https://orcid.org/0000-0002-0487-5918; Kuznetsova M.V., https://orcid.org/0000-0003-2448-4823

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Acknowledgements. This work was supported by the RFBR-Ural grant 16-45-590497. The work was carried out within the framework of state assignment AAAA-A19-119112290008-4. The authors express their gratitude to the staff of the group of physical and chemical research "Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, 614081, Russian Federation, Laptevoy A.K. Ph.D., leading engineer Gusev V.A.
Contribution of the authors: *Maslennikova I.L.* – collection and processing of material, statistical processing, text writing, editing; *Shishkin M.A., Kuznetsova M.V.* – concept and design of the study, collection and processing of material, editing; *Sherstobitova N.P.* – collection and processing of material. *All co-authors* – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Received: February 06, 2020/ Accepted: September 18, 2020/ Published: March 30, 2021

Введение

Развитие урбанизированных территорий неизменно приводит к концентрации всё большего количества людей в городах. Комплекс мероприятий по улучшению качества жизни человека включает оценку экологического состояния объектов окружающей среды, в том числе почв. Урбанизация сопровождается различными воздействиями на физические и химические свойства почвы, связанными с точечными эффектами теплосетей, загрязнением, градостроительной деятельностью [1–4]. Городские территории являются одним из основных депонирующих компонентов ландшафта, отражающих экологическую обстановку, обусловленную влиянием геологических факторов и многолетнего техногенного воздействия [5]. Изменения городских почв максимальны в поверхностных гумусовых горизонтах, в которые поступает большое количество пыли и аэрозолей из атмосферы с сорбированными на них загрязнениями [6–8]. Часто урбанизированные территории характеризуют на основании показателей физико-химических свойств почв, загрязнения их тяжёлыми металлами, реже – на мониторинге поступления органических веществ [9–11]. Однако комплексный подход должен включать оценку прямого или опосредованного влияния данных факторов на живые организмы и системы.

В настоящее время в федеральном законодательстве[1] при оценке земель городских территорий предусмотрено соблюдение санитарно-гигиенических нормативов (анализ бактерий группы кишечной палочки). Однако в более широком смысле численность и биоразнообразие почвенного микробного сообщества рассматриваются как показатели плодородия почв и продуктивности экосистем [12]. При этом химическое загрязнение урбанизированных территорий может влиять на микробиоценоз, изменяя активность, жизнеспособность и резистентность отдельных видов бактерий. Кроме того, микробиота может иметь значение в обеспечении контроля переноса поллютантов, способствуя их биодеградации, биоконверсии [13, 14], что оказывает влияние и на здоровье людей. Ключевые экологические (естественные и антропогенные) факторы, которые стабилизируют биомассу почвенных бактерий, играют важную роль в динамике питательных веществ и продуктивности данной экосистемы [12]. Известно, что физико-химические свойства почвы определяют доступность токсикантов/металлов: в разных типах почв их эффекты на биологическую активность, а соответственно и ответную реакцию микробных сообществ могут существенно различаться [15]. С этих позиций выявление соответствия между уровнем химического загрязнения различных городских почв и количеством гетеротрофных бактерий, в том числе представителей видов, имеющих санитарно-гигиеническое значение, является актуальным.

Цель работы заключалась в комплексной экологической оценке почв селитебной зоны г. Перми, установлении взаимосвязи химического загрязнения тяжёлыми металлами, фталатами с количественными показателями микробиоценоза.

[1] Федеральный закон от 30.03.1999 г. № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения».

Материалы и методы

Образцы для геохимических и микробиологических исследований были отобраны на территории г. Перми в 2016 г., где жилая застройка (40% площади) чередуется с территориями предприятий, парками и городскими лесами, включает автомагистрали и железные дороги [16]. Почвенная съёмка проведена по случайно-упорядоченной сети из расчёта одна пробная площадка на 1 км^2. Пробы отбирали с глубины до 5 см на участках, где почвы в значительной мере сохранили свой генетический профиль согласно МУ 2.1.7.730-99[2]. В случае отсутствия на 1 км^2 образцов с природным профилем в верхних слоях (урбодерново-подзолистые, урбосеро-гумусовые и т. д.) [17] для анализа использовали верхний техногенный слой, и данные почвы относили к группе «старый урбанозём». Всего было получено и проанализировано 212 образцов городских почв и 2 контрольных образца (для суглинистых и песчаных почв).

Концентрации водорастворимых форм тяжёлых металлов Cd, Pb, Zn (1-й класс опасности), Cu и Ni (2-й класс опасности), а также Fe и Mn (3-й класс опасности) определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии на спектрометре Shimadzu AA-6300 (Shimadzu, Япония) в пламени ацетилен-воздух, согласно РД 52.18.286-91[3]. Оценка уровня химического загрязнения почв проведена по расчётным коэффициентам накопления (K_c) микроэлемента и суммарному показателю загрязнения (Z_c). Значения K_c определяли как отношение фактических концентрации микроэлементов в почвенных образцах к контролю. Z_c рассчитывали как сумму $K_c \geqslant 1{,}5$ [18], при этом значения $K_c > 3$ считали показателем загрязнения почвы данным микроэлементом.

Анализ органических соединений проводили методом газохроматографической масс-спектрометрии (ГХ-МС) с использованием хромато-масс-спектрометрической системы Agilent 6890/5973N (Agilent, США). Для извлечения из почв органических соединений использовали жидкостную экстракцию хлороформом на аппарате Сокслета (Behr, Германия). Разделение органических примесей, присутствующих в экстрактах, проводили на капиллярной колонке HP-5MS (30 м • 0,25 мм • 0,25 мкм) при программировании температуры. Регистрацию компонентов осуществляли в режиме TIC и SIM. Условия ГХ-МС анализа были следующими: температура испарителя хроматографа 250 °С, начальная температура колонки 40 °С (в течение 1 мин); температурная программа – 30 °С/мин до 170 °С, 4 °С/мин до 240 °С, 12 °С/мин до 300 °С (в течение 4 мин); ионизация электронным ударом при энергии 70 эВ; диапазон сканирования 5–450 а.е.м.; газ-носитель – гелий; объём пробы 1 мкл. Обработку полученных хроматограмм проводили с помощью автоматизированной системы обработки масс-спектральных данных AMDIS с поиском целевых

[2] МУ 2.1.7.730-99 «Гигиенические требования к качеству почвы населённых мест».

[3] РД 52.18.286-91 «Методика выполнения измерений массовой доли водорастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом».

https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-116-122

компонентов по библиотеке Американского Агентства окружающей среды NIST05/NISTEPA. MSL с фактором сходства не менее 80%. Определение органического углерода в почве проводили по методу И.В. Тюрина в модификации В.Н. Симакова[4].

Общее количество гетеротрофных и грамотрицательных бактерий представителей семейства *Enterobacteriaceae* определяли методом прямого высева из последовательных децимальных разведений бактериальных суспензий на селективные агаризованные питательные среды[5]. Навеску почвы 1 г помещали в коническую колбу, приливали 50 мл фосфатно-буферной среды (pH 7,0–7,2), взбалтывали в течение 1 ч и 3-кратно обрабатывали ультразвуком в течение 1 мин при 37 кГц, поместив колбы в ультразвуковую ванну Elma Ultrasonic 30S (Elma, Германия). Для подсчёта гетеротрофов использовали агаризованную среду Луриа–Бертани (LBA), энтеробактерий – среду Мак-Конки (Becton, США). Для исключения грибковой микробиоты в среды добавляли актидион (100 мкг/мл). Численность микроорганизмов определяли как количество колониеобразующих единиц (КОЕ) в пересчёте на 1 г сухой почвы. Сравнение проводили по степени обогащённости почв микроорганизмами по критерию, предложенному Д.Г. Звягинцевым [19], и по степени эпидемиологической опасности почвы, согласно индексу санитарно-показательных микроорганизмов БГКБ (бактерии группы кишечной палочки)[5].

Статистическая обработка данных проведена в программах Excel и Statistica 6.0. Результаты представлены в виде среднего арифметического, стандартного отклонения, медианы и квартилей. Корреляционные коэффициенты рассчитаны по Спирмену при $p \leqslant 0,05$. Различия между группами определяли согласно критерию Краскела–Уоллиса (KW-H) при множественном сравнении, Манна–Уитни (*U*-test) для парного сравнения независимых групп при $p \leqslant 0,05$.

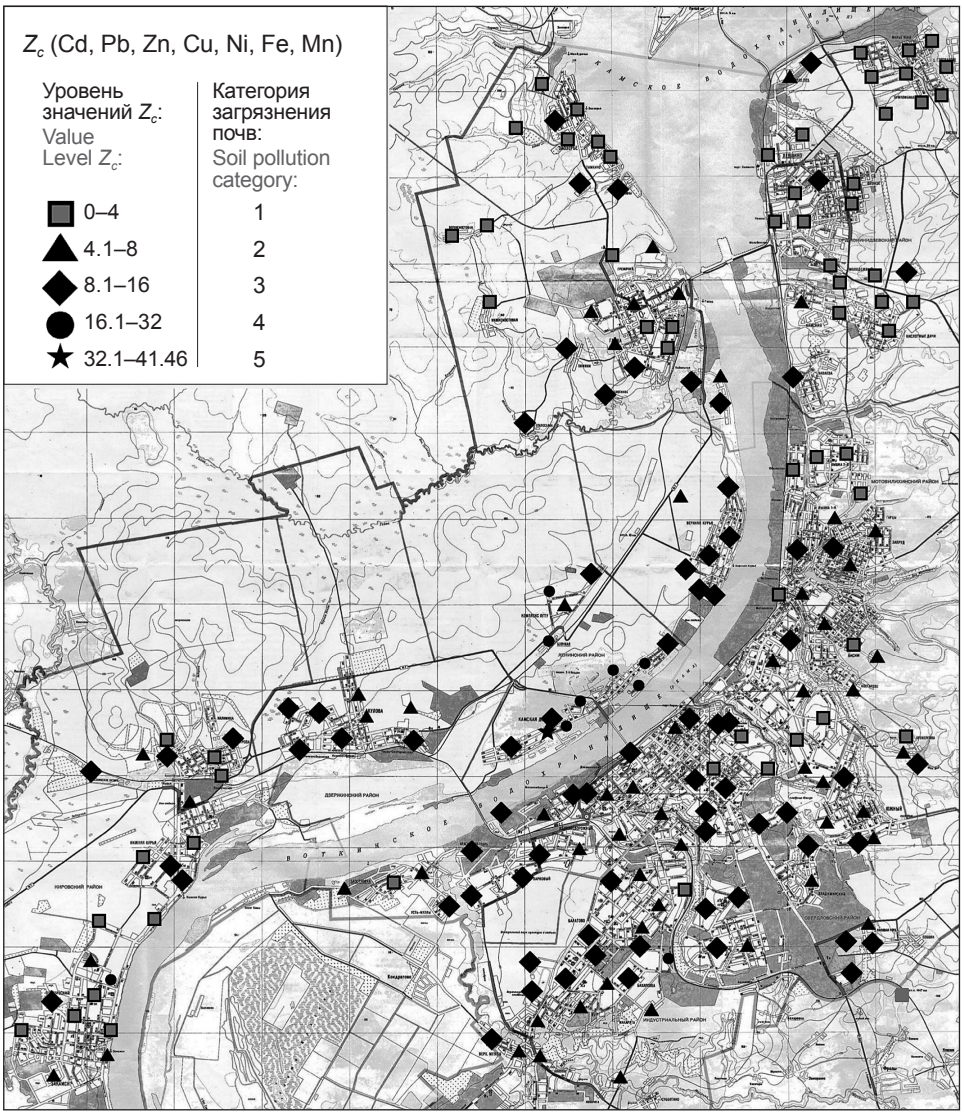


Рис. 1. Распределение очагов загрязнения почв жилой зоны г. Перми водорастворимыми формами тяжёлых металлов с использованием интегрального показателя *Zc*. Категория загрязнения почв: 1, 2, 3 – слабозагрязнённые; 4 – умеренно опасные; 5 – опасные.

Figure 1. Distribution of foci of soil pollution in the residential zone of Perm by water-soluble forms of heavy metals using the integral index *Zc*. Soil pollution category: 1, 2, 3 – slightly contaminated; 4 – moderately dangerous; 5 – dangerous.

Результаты

Проведена оценка уровня химического загрязнения почв г. Перми водорастворимыми формами тяжёлых металлов. Во всех исследованных образцах обнаружены цинк, медь, никель, железо и марганец. Кадмий выявлен в 63–89% образцов, свинец – в 54–95% случаев. Накапливающиеся микроэлементы по средним значениям K_c г. Перми представлены в ряду Ni (3,8) > Cu (3,3) > Pb (3,1) > Cd (2,6). Дефицитными элементами (K_c < 1) являются Fe, Mn и Zn. Концентрация тяжёлых металлов Cu, Pb, Zn, Fe, Cd, Ni, Mn в контрольных образцах песчаных/суглинистых почв составляла 0,09/0,15; 0,08/0,22; 0,22/0,39; 5,57/16,14; 0,02/0,01; 0,06/0,13; 0,74/3,14 мг/л соответственно.

По результатам исследований построена сводная карта распределения Z_c в почвах (рис. 1). Значения Z_c выше 16 зафиксированы на 4,7% пробных площадок, что соответствует умеренной степени загрязнения. Поскольку большая часть проб почв по градации Z_c была отнесена к группе допустимо загрязнённых, среди них были выделены группы по Z_c в сторону кратного уменьшения его значения. Из рис. 1 видно, что количество образцов почв, разделённых по величине Z_c, было приблизительно одинаково и составило для Z_c в пределах 0–4 – 29,7%; в пределах 4–8 – 29%; в пределах 8–16 – 36,3%.

На территории г. Перми преобладают суглинистые (64,9%) и песчаные (26,8%) почвы (табл. 1). Показано, что тип почвы влияет на уровень её химического загрязнения (KW-H (3; 214) = 30,73; $p = 0,00001$). Самый высокий показатель Z_c отмечен для торфов, наименьший – для суглинистых почв.

[4] ГОСТ 26213-91 «Почвы. Методы определения органического вещества».

[5] МР ФЦ/4022 «Методы микробиологического контроля почвы».

Таблица 1 / Table 1

Суммарный показатель загрязнения почвы тяжёлыми металлами, общая численность гетеротрофов и *Escherichia coli* в разных типах почв

The total index of soil contamination with heavy metals, the total number of heterotrophs, and *Escherichia coli* in different types of soils

Тип почв Types of soils	№	*Zc*	Показатель загрязнения почвы, *Me* (Q_1–Q_3) Indicator of soil pollution, *Me* (Q_1–Q_3)	
			гетеротрофы, кл/г сухой почвы Heterotrophs, cell/g dry soil	*Escherichia coli*, кл/г сухой почвы cell/g dry soil
Суглинок, $n = 142$ Loam, $n = 142$	1	6.24 ± 3.72 $p_{1-2} < 0.05$* $p_{1-3} < 0.05$ $p_{1-4} < 0.05$	9.72E + 05 (2.64E+04 – 5.95E+07) $p_{1-4} < 0.05$	0.00E + 00 (0.00E + 00 – 1.84E + 05) $p_{1-4} < 0.05$
Торф, $n = 5$ Peat, $n = 5$	2	22.42 ± 12.32 $p_{2-3} < 0.05$ $p_{2-4} < 0.05$	5.25E + 05 (2.32E + 05 – 2.18E + 06)	0.00E + 00 (0.00E + 00 – 5.26E + 04)
Песок, $n = 54$ Sand, $n = 54$	3	9.23 ± 5.70	1.29E + 06 (2.35E + 04 – 1.42E + 08) $p_{3-4} < 0.05$	0.00E + 00 (0.00E + 00 – 3.09E + 05) $p_{3-4} < 0.05$
Старый урбанозём, $n = 13$ Old urbanozem, n = 13	4	8.37 ± 4.07	1.89E + 05 (1.07E + 05 – 9.57E + 05)	0

Примечание. Здесь и в табл. 4: * – различия между группами достоверны при $p \leqslant 0{,}05$.

Note. Here and in table. 4: * – differences between groups are significant at $p \leqslant 0.05$.

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты корреляции между содержанием тяжелых металлов и некоторыми почвенными характеристиками в суглинистых (*А*) и песчаных (*Б*) почвах

Correlation coefficients between the content of heavy metals and some soil characteristics in loamy (*A*) and sandy (*B*) soils

А / A

	Cu	Pb	Zn	Fe	Cd	Ni	Mn	Z_c
Cu	1.00	–0.46**	0.13	–0.09	0.05	0.37	0.02	
Pb		1.00	–0.03	0.14	0.07	–0.24	–0.04	
Zn			1.00	0.53	–0.04	0.00	0.58	
Fe				1.00	0.04	–0.33	0.69	
Cd					1.00	0.24	–0.10	
Ni						1.00	–0.28	
Mn							1.00	
Z_c	0.48	–0.06	0.15	–0.17	0.40	0.53	–0.09	1.00
$C_{орг}$	0.16	–0.14	–0.07	–0.20	0.03	0.19	–0.14	0.06
pH	**0.35**	**–0.39**	**–0.19**	**0.01**	**–0.23**	**0.02**	**0.02**	**–0.20**

Б / B

	Cu	Pb	Zn	Fe	Cd	Ni	Mn	Z_c
Cu	1.00	0.29*	0.11	0.32	0.15	0.23	0.21	
Pb		1.00	0.15	0.35	0.22	0.14	0.43	
Zn			1.00	0.37	0.33	0.23	0.24	
Fe				1.00	0.10	0.11	0.68	
Cd					1.00	0.56	–0.11	
Ni						1.00	–0.07	
Mn							1.00	
Z_c	0.74	0.60	0.25	0.39	0.46	0.65	0.33	1.00
$C_{орг}$	**0.00**	**–0.13**	**0.13**	**–0.17**	**–0.23**	**–0.10**	**–0.01**	**–0.15**
pH	0.31	–0.06	–0.29	0.09	0.03	0.17	–0.20	0.17

Примечание. ** – Достоверные значения при $p < 0{,}05$.

Note. ** – Significant values at $p < 0.05$.

Из табл. 1 видно, что низкое содержание гетеротрофов в старых урбанозёмах по сравнению с суглинистыми почвами отмечено на фоне повышения суммарного загрязнения тяжёлыми металлами. Согласно индексу БГКП, 71,96% образцов почв были отнесены к «чистым», 11,21% – к умеренно опасным и опасным и 16,82% – к чрезвычайно опасным (см. табл. 1). Однако во всех типах почв, за исключением старых урбанозёмов, отмечены территории, относящиеся к категории «чрезвычайно опасные» (более 10^3 кл/г сух. почвы).

Согласно данным табл. 2, коэффициенты корреляции между содержанием водорастворимых тяжёлых металлов и интегральным показателем в суглинистых (*А*) и песчаных (*Б*) почвах отличались. Для первых показана положительная корреляция Z_c с содержанием Cu, Cd, Ni, отрицательная – с Fe, для вторых выявлена положительная корреляция содержания почти всех исследованных тяжёлых металлов (Fe, Cd, Mn, Pb, Ni, Cu) с показателем интегрального загрязнения Z_c.

Из идентифицированных органических загрязнений количественно определяли содержание фталатов. В изученных образцах были обнаружены два вещества из этой группы: дибутилфталат (ДБФ) и бис(2-этилгексил) фталат (ДЭГФ). В почвенных образцах жилой зоны города ДБФ обнаружен в интервале концентраций 0,005–0,032 мг/кг; содержание ДЭГФ составило 0,003–0,068 мг/кг. В контрольных образцах концентрации ДБФ были в пределах 0,001–0,0187 мг/кг, а ДЭГФ – 0–0,025 мг/кг. Необходимо отметить, что группы почв, распределённые по Z_c, не различались по содержанию фталатов (табл. 3). Коэффициенты накопления ДЭГФ и ДБФ составили 0,2–5,4, и 0,4–2,3 соответственно.

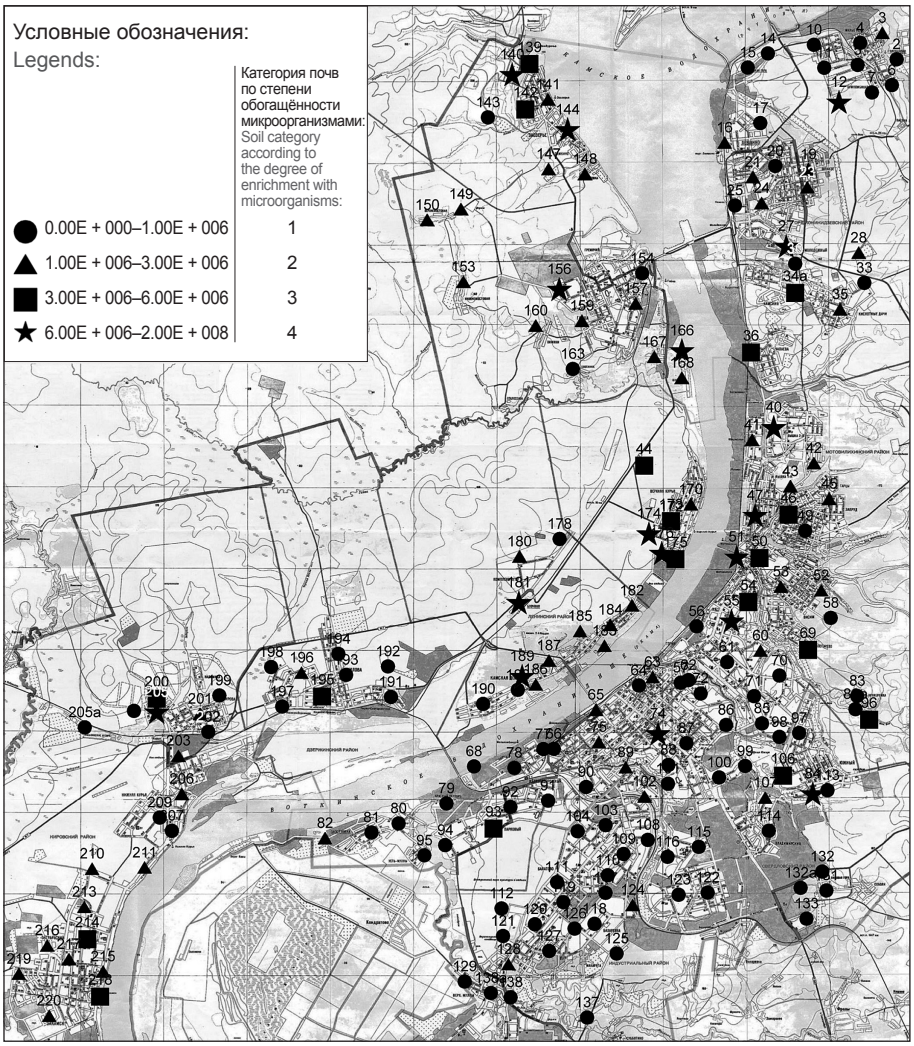
Таблица 3 / Table 3

Содержание фталатов в образцах почв с разным уровнем загрязнения водорастворимыми металлами

Phthalate content in soil samples with different levels of contamination with water-soluble metals

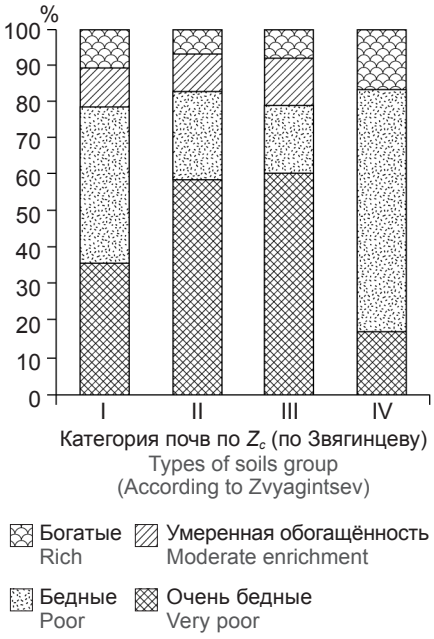
Группа почв Groups of soils	№	ДЭГФ, мг/кг Bis (2-ethylhexyl) phthalate (DEHP), mg/kg	ДБФ, мг/кг Dibutyl phthalate (DBP), mg/kg
I ($Z_c < 4$); $n = 3$	1	0.041 ± 0.012	0.020 ± 0.012
II ($4 < Z_c < 8$); $n = 6$	2	0.039 ± 0.020	0.019 ± 0.010
III ($8 < Z_c < 16$); $n = 17$	3	0.029 ± 0.017	0.018 ± 0.008
IV ($Z_c > 16$); $n = 5$	4	0.036 ± 0.022	0.013 ± 0.011

https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-116-122



◄ **Рис. 2.** Содержание гетеротрофов в почвах жилой зоны г. Перми. Категория почв по степени обогащённости микроорганизмами: 1 – очень бедные; 2 – бедные; 3 – средняя обогащённость; 4 – богатые.

◄ **Figure 2**. The content of heterotrophs in the soils of the residential zone of the city of Perm. Soil category according to the degree of enrichment with microorganisms: 1 – very poor; 2 – poor; 3 – average enrichment; 4 – rich.



▲ **Рис. 3.** Содержание микробиоты в почвах с разным показателем Z_c.

▲ **Figure 3.** Microbiota content in soils with different Z_c values.

Что касается микробиологических показателей изученных образцов, на рис. 2 представлена карта распределения почв по содержанию гетеротрофов, количество которых колебалось в широких пределах ($2{,}35 \cdot 10^4 - 1{,}42 \cdot 10^8$ кл/г сух. почвы). Согласно классификации Д.Г. Звягинцева [22], 51,4% образцов относились к очень бедным, 29,7% – к бедным, 9,7% – к почвам средней обогащённости и 9,2% – к богатым почвам. Анализ бактерий в группах почв, разделённых по Z_c, показал, что медианные значения содержания гетеротрофов в I и IV группах соответствовали категории «бедные», в группах II и III – «очень бедные» (табл. 4). Соотношение разных по обогащённости почв различалось между группами I и II; I и III (рис. 3). В целом корреляция между количеством гетеротрофов и Z_c не выявлена ($r = 0{,}07$), однако в группе III отмечена умеренная связь между содержанием тяжёлых металлов и биомассой почвенной микробиоты ($r = 0{,}3$; $p = 0{,}021$).

Среди почв с Z_c в пределах 0–16 встречались «чистые» образцы почв, согласно медианным значениям (см. табл. 4). Для группы почв с высокими значениями Z_c (IV группа) отмечено эпидемиологическое неблагополучие, согласно индексу БГКП («очень опасная»). Показатели верхнего квартиля свидетельствовали о наличии в каждой группе почв с категорией «очень богатые» по содержанию гетеротрофов, а также «очень опасных» образцов по количеству БГКП. При этом корреляция между содержанием гетеротрофов и числом бактерий *E. coli* в почвах не выявлена.

Таким образом, комплексное обследование селитебной зоны г. Перми позволило обнаружить, что в почвах с высокой антропогенной нагрузкой, связанной с загрязнением тяжёлыми металлами (IV группа по Z_c) и фталатами микробное сообщество, вероятно, находится в состоянии неустойчивого равновесия.

Таблица 4 / Table 4

Общая численность гетеротрофов и *E. coli* с учётом суммарного показателя загрязнения почвы тяжёлыми металлами

The total number of heterotrophs and *E. coli*, taking into account the total index of soil pollution with heavy metals

Группы почв Groups of soils	№	Общая численность, *Me* (Q_1–Q_3) The total number, *Me* (Q_1–Q_3)	
		гетеротрофы, кл/г сухой почвы Heterotrophs, cell/g dry soil	*Escherichia coli*, кл/г сухой почвы cell/g dry soil
I ($Z_c < 4$), $n = 63$	1	1.89E + 06 (8.00E + 04–5.41E + 07) $p_{1-2} < 0.05$; $p_{1-3} < 0.05$	0.00E + 00 (0.00E + 00–1.05E + 05)
II ($4 < Z_c < 8$), $n = 62$	2	6.54E + 05 (2.64E + 04–1.39E + 07)	0.00E + 00 (0.00E + 00–3.09E + 05)
III ($8 < Z_c < 16$), $n = 77$	3	5.94E + 05 (2.35E + 04–1.42E + 08)	0.00E + 00 (0.00E + 00–2.09E + 05) $p_{3-4} < 0.05$
IV ($Z_c > 16$), $n = 10$	4	1.38E + 06 (3.20E + 05–6.32E + 06)	1.48E + 02 (0.00E + 00–7.92E + 04)

Обсуждение

Городские территории испытывают высокую антропогенную нагрузку, в результате которой происходит сильная загрязнённость почв тяжёлыми металлами. Поступление последних в почву обусловлено выбросами автотранспорта, промышленных предприятий, тепловых электростанций, миграцией со свалок и открытых карьеров [10, 20–23]. Подвижность металлов зависит не только от их концентрации, но и от свойств почвы (pH, размера частиц, содержания органического вещества, окислительно-восстановительного потенциала, катионообменной способности) и факторов окружающей среды [24, 25]. При снижении содержания гумуса в суглинистых почвах концентрации подвижных форм свинца, железа и марганца возрастали (см. табл. 2, *А*), что, по-видимому, связано с меньшим формированием органоминеральных комплексов. В песчаных почвах подобная закономерность достоверно не выявлена. Однако показатель Z_c в последнем случае является информативным и соответствует накоплению почти всех изученных тяжёлых металлов по отдельности на основании данных корреляционного анализа (см. табл. 2, *Б*). В целом, согласно Z_c, большая часть изученных образцов почв селитебной зоны г. Перми не превышала допустимый показатель загрязнения тяжёлыми металлами по сравнению с фоновой территорией. Это согласуется с данными, полученными ранее Васильевым и Лобановой: в их исследовании почвы города имели допустимую степень загрязнения (Z_c от 1 до 16) на 83% площади от всей территории города [9]. Тем не менее необходимо отметить, что при накоплении тяжёлых металлов в почвах микробиота проявляет нестабильный уровень активности, сопровождающийся высоким потреблением органического углерода [26], что может в конечном итоге привести к истощению почв.

Органическое загрязнение фталатами происходит при их производстве, переработке вследствие широкого распространения пластифицированных пластмасс в виде товаров широкого потребления. Допустимые нормы ДБФ в почве варьируют в пределах 0,08–0,8 мг/кг, ДЭГФ – 0,05 мг/кг [27, 28]. Во всех изученных образцах содержание фталатов не превышало данных значений (см. табл. 3). Взаимосвязь между уровнем ДБФ, ДЭГФ и Z_c по тяжёлым металлам не выявлена. Но на миграцию, трансформацию и накопление фталатов оказывает влияние множество факторов. Так, период полураспада ДБФ в почве зависит от органического углерода, в том числе микробного происхождения [29]. С этих позиций обеднение микробиоты во II и III группах по Z_c является неблагоприятным прогностическим признаком восстановительных свойств почв (биодеградация фталатов).

В настоящее время в ряде работ микробная биомасса почвы используется в качестве индикатора изменения свойств почвы (структура, плотность, содержание влаги) [30]. Почвенный пул принимает на себя давление потока промышленных выбросов и отходов, выполняя важнейшую роль буфера и детоксиканта, что может привести к значительным сдвигам в составе микроценозов почвы. Недавние исследования показали, что наиболее загрязнённые почвы имели низкий индекс обогащённости, так как высокий уровень поллютантов подавляет некоторых членов бактериального сообщества, что в конечном итоге приводит к снижению генетического разнообразия [31]. Накопление химических элементов имеет поступательный характер, и в почвах с Z_c в диапазоне 4–16 (II–III группа), где отмечено снижение общего числа гетеротрофов, вероятно, происходит процесс формирования устойчивости к поллютантам среди выживших представителей таксонов почвенной микробиоты. При дальнейшем возрастании почвенного загрязнения адаптированные группы начинают занимать доминантное положение в сообществе, но не исключено, что буферные и восстановительные свойства почв, определяемые микроорганизмами, будут меняться.

Заключение

В результате проведённых исследований установлено: 1) содержание водорастворимых форм тяжёлых металлов в верхних слоях почв селитебной зоны г. Перми, согласно Z_c (Cu, Pb, Zn, Fe, Cd, Ni, Mn), соответствовало умеренной степени загрязнения у 95,4% почвенных образцов. Уровень фталатов не превышал допустимой нормы; 2) содержание гетеротрофов в почвах I (Z_c: 0–4) и IV (Z_c: 16–32) групп составило $6{,}54 \cdot 10^5$ и $5{,}94 \cdot 10^5$ кл./г сух. почвы соответственно и было меньше, чем в группах II (Z_c: 4–8) и III (Z_c: 8–16), где их количество детектировали в пределах 10^6 кл./г сух. почвы; 3) эпидемиологическое неблагополучие, согласно индексу БГКП, для почв с высокой антропогенной нагрузкой по тяжёлым металлам ($Z_c > 16$).

Урбанизированные территории (жилые и промышленные застройки) могут менять метеорологические факторы, определяющие рассеивающие и аккумулирующие способности атмосферы, и способствовать как защите от загрязнения, так и его усилению. Поэтому оценку среднего уровня загрязнения городской среды и степень экологического комфорта в отдельных районах целесообразно проводить именно на основе анализа почв, которые накапливают поллютанты разного происхождения (сточные воды, атмосферные осадки) на протяжении многих лет. При этом мониторинг городских почв, необходимый для прогнозирования потенциального экологического риска территорий, должен быть многосторонним, поскольку выявленные авторами виды антропогенного загрязнения почв г. Перми, имеющие разную степень сопряжения между собой, влияют на количественные изменения почвенной микробиоты, что в будущем может определять способность поддержания гомеостаза данной экосистемы. Это важно учитывать при комплексной оценке городской среды.

Литература

(п.п. 1, 2, 4, 12–14, 21, 22, 25–31 см. References)

3. Пукальчик М.А., Терехова В.А. Экотоксикологическая оценка городских почв и детоксицирующего эффекта нанокомпозиционного аппарата. *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение.* 2012; (4): 26–31.
5. Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. *Геохимия ландшафтов восточной Москвы.* М.; 2016.
6. Никифорова Е.М., Касимов Н.С. Геохимия городов и городских ландшафтов. В кн.: Добролюбов С.А., Касимов Н.С., Малхазова С.М., ред. *Природно-антропогенные процессы и экологический риск. Том 4.* М.: Городец; 2004: 474–507.
7. Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Корляков И.Д., Касимов Н.С. Влияние застройки на загрязнение городских почв тяжелыми металлами. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика.* 2018; (1): 36–55. https://doi.org/10.15593/2409-5125/2018.01.03
8. Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Власов Д.В. Факторы накопления тяжёлых металлов и металлоидов на геохимических барьерах в городских почвах. *Почвоведение.* 2015; (5): 536. https://doi.org/10.7868/S0032180X15050032
9. Васильев А.А., Лобанова Е.С. *Магнитная и геохимическая оценка почвенного покрова урбанизированных территорий Предуралья на примере города Перми.* Пермь: Прокрость; 2015.
10. Копылов И.С. Аномалии тяжелых металлов в почвах и снежном покрове города Перми как проявления факторов геодинамики и техногенеза. *Фундаментальные исследования.* 2013; (1–2): 335–9.
11. Богданов Н.А. Анализ информативности интегральных показателей химического загрязнения почв при оценке состояния территорий. *Гигиена и санитария.* 2012; 91(1): 10–3.
15. Селивановская С.Ю. Активность и структура микробных сообществ при обработке почвы нетрадиционными мелиорантами. *Учёные записки Казанского государственного университета.* 2009; 151(1): 115–32.

https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-116-122

16. Кузнецова М.В., Масленникова И.Л., Лаптева А.К., Шерстобитова Н.П., Шишкин М.А. Микробиологические особенности почвенного покрова жилой зоны города Перми. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2016; (2–3): 723–9.
17. Еремченко О.З., Шестаков И.Е., Москвина Н.В. *Почвы и техногенные поверхностные образования урбанизированных территорий Пермского Прикамья*. Пермь; 2016.
18. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. *Геохимия окружающей среды*. М.: Недра; 1990.
19. Звягинцев Д.Г. Биологическая активность почв и шкала для оценки некоторых ее показателей. *Почвоведение*. 1978; (6): 48–54.
20. Алексеенко В.А. *Экологическая геохимия*. М.: Логос; 2000.
23. Намазова В.Н., Романова Е.М. Сезонная динамика миграции тяжёлых металлов в почвах свалок и полигонов ТБО, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения в Ульяновской области. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2008; (4): 163–6.
24. Седых В.А., Филиппова А.В., Саидов А.К. Изменение подвижности тяжёлых металлов в почвах при применении высоких доз органических удобрений. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2012; (4): 209–12.

References

1. Edmondson J.L., Stott I., Davies Z.G., Gaston K.J., Leake J.R. Soil surface temperatures reveal moderation of the urban heat island effect by trees and shrubs. *Sci. Rep.* 2016; 6: 33708. https://doi.org/10.1038/srep33708
2. Lovett G.M., Traynor M.M., Pouyat R.V., Carreiro M.M., Zhu W.X., Baxter J.W. Atmospheric deposition to oak forests along an urban-rural gradient. *Environ. Sci. Technol.* 2000; 34(20): 4294–300. https://doi.org/10.1021/es001077q
3. Pukal'chik M.A., Terekhova V.A. Ecotoxicological evaluation of urban soils and detoxication effect of nanocomposite preparation. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*. 2012; (4): 26–31. (in Russian)
4. Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Korlyakov I.D., Kasimov N.S. Contamination of urban soils with heavy metals in Moscow as affected by building development. *Sci. Total Environ*. 2018; 636: 854–63. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.308
5. Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M. *Geochemistry of Landscapes of Eastern Moscow [Geokhimiya landshaftov vostochnoy Moskvy]*. Moscow; 2016. (in Russian)
6. Nikiforova E.M., Kasimov N.S. Geochemistry of cities and urban landscapes. In: Dobrolyubov S.A., Kasimov N.S., Malkhazova S.M., eds. *Natural and Anthropogenic Processes and Environmental risk. Volume 4 [Prirodno-antropogennye protsessy i ekologicheskiy risk]*. Moscow: Gorodets; 2004: 474–507. (in Russian)
7. Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Korlyakov I.D., Kasimov N.S. Effect of build development on contamination of urban soils with heavy metals. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*. 2018; (1): 36–55. https://doi.org/10.15593/2409-5125/2018.01.03 (in Russian)
8. Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Vlasov D.V. Factors of the accumulation of heavy metals and metalloids at geochemical barriers in urban soils. *Pochvovedenie*. 2015; 48(5): 476–92.
9. Vasil'ev A.A., Lobanova E.S. *Magnetic and Geochemical Assessment of the Soil Cover of the Urbanized Territories of the Urals by the Example of the City of Perm [Magnitnaya i geokhimicheskaya otsenka pochvennogo pokrova urbanizirovannykh territoriy Predural'ya na primere goroda Permi]*. Perm': Prokrost'; 2015. (in Russian)
10. Kopylov I.S. Anomalies of heavy metals in soils and snow cover of the city of Perm, as manifestations of geodynamic and technogenic factors. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013; (1–2): 335–9. (in Russian)
11. Bogdanov N.A. Analysis of the informative value of integral indicators of chemical soil contamination in the evaluation of the status of areas. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2012; 91(1): 10–3. (in Russian)
12. Singh J.S., Gupta V.K. Soil microbial biomass: A key soil driver in management of ecosystem functioning. *Sci. Total Environ*. 2018; 634: 497–500. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.373
13. Mishra G.K. Microbes in heavy metal remediation: a review on current trends and patents. *Recent Pat. Biotechnol*. 2017; 11(3): 188–96. https://doi.org/10.2174/1872208311666170120121025
14. Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters. *Environ. Monit. Assess*. 2019; 191(9): 544. https://doi.org/10.1007/s10661-019-7718-3
15. Selivanovskaya S.Yu. The activity and structure of microbial communities in the processing of soil by unconventional reclaimants. *Uchenye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2009; 151(1): 115–32. (in Russian)
16. Kuznetsova M.V., Maslennikova I.L., Lapteva A.K., Sherstobitova N.P., Shishkin M.A. Microbiological features of the soil cover in the residential zone of Perm city. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2016; (2–3): 723–9. (in Russian)
17. Eremchenko O.Z., Shestakov I.E., Moskvina N.V. *Soils and Technogenic Surface Formations of the Urbanized Territories of Perm Prikamye [Pochvy i tekhnogennye poverkhnostnye obrazovaniya urbanizirovannykh territoriy Permskogo Prikam'ya]*. Perm'; 2016. (in Russian)
18. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Environmental Geochemistry [Geokhimiya okruzhayushchey sredy]*. Moscow: Nedra, 1990. (in Russian)
19. Zvyagintsev D.G. Soil biological activity and a scale for assessing some of its indicators. *Pochvovedenie*. 1978; (6): 48–54. (in Russian)
20. Alekseenko V.A. *Ecological Geochemistry [Ekologicheskaya geokhimiya]*. Moscow: Logos; 2000. (in Russian)
21. Kumar S., Ghosh S., Mukherjee S., Sarkar S. Chromium and nickel migration study through fine grained soil. *J. Hazard Mater.* 2009; 170(2–3): 1192–6. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.097
22. Travar I., Kihl A., Kumpiene J. Utilization of air pollution control residues for the stabilization/solidification of trace element contaminated soil. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2015; 22(23): 19101–11. https://doi.org/10.1007/s11356-015-5087-1
23. Namazova V.N., Romanova E.M. Seasonal dynamics of heavy metals migration in the soils of dumps and polygons located on the agricultural territories of Ulyanovsk region. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2008; (4): 163–6. (in Russian)
24. Sedykh V.A., Filippova A.V., Saidov A.K. Effect of applying high doses of organic fertilizers on heavy metals migration changeability in soil. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012; (4): 209–12. (in Russian)
25. He Z.L., Yang X.E., Stoffella P.J. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 2005; 19(2–3): 125–40. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.02.010
26. Yang Y., Campbell C.D., Clark L., Cameron C.M., Paterson E. Microbial indicators of heavy metal contamination in urban and rural soils. *Chemosphere*. 2006; 63(11): 1942–52. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.10.009
27. Lü H., Mo C.H., Zhao H.M., Xiang L., Katsoyiannis A., Li Y.W., et al. Soil contamination and sources of phthalates and its health risk in China: A review. *Environ. Res.* 2018; 164: 417–29. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.03.013
28. Garrido Frenich A., de las Nieves Barco Bonilla M., López Martínez J.C., Martínez Vidal J.L., Romero-González R. Determination of di-(2-ethylhexyl)phthalate in environmental samples by liquid chromatography coupled with mass spectrometry. *J. Sep. Sci.* 2009; 32(9): 1383–9. https://doi.org/10.1002/jssc.200900020
29. Cheng J., Wan Q., Ge J., Feng F., Yu X. Major factors dominating the fate of dibutyl phthalate in agricultural soils. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2019; 183: 109569. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109569
30. Rai P.K, Rai A., Singh S. Change in soil microbial biomass along a rural-urban gradient in Varanasi (U.P., India). *Geology, Ecology and Landscapes*. 2018; 2(1): 15–21. https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1438743
31. Markowicz A., Płaza G., Piotrowska-Seget Z. Activity and functional diversity of microbial communities in long-term hydrocarbon and heavy metal contaminated soils. *Arch. Environ. Prot.* 2016; 4: 3–11.