

Тяжёлые металлы в почвах различных функциональных зон урбанизированных территорий: оценка содержания и экологического риска

© 2023. Т. А. Трифонова^{1,2}, д. б. н., профессор,

И. Н. Курочкин¹, аспирант, Ю. Н. Курбатов¹, аспирант,

¹Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, 600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87,

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1,

e-mail: tatrifon@mail.ru, ivan33vl@yandex.ru, iur.curbatov@gmail.com

С целью анализа загрязнения тяжёлыми металлами урболандшафтов г. Владимира проведён отбор и исследование почвенных образцов. Почвенные образцы проанализированы на содержание свинца, цинка, меди, никеля, марганца, кобальта и хрома. Проведено сравнение полученных показателей с предельно допустимыми концентрациями и фоновыми значениями. Установлены закономерности между близостью исследуемых участков к промышленным предприятиям и концентрацией тяжёлых металлов в почве. Рассчитаны коэффициенты накопления тяжёлых металлов в почвах и выявлены металлы, являющиеся приоритетными загрязнителями с наибольшими показателями коэффициента накопления. При помощи расчёта суммарного показателя накопления тяжёлых металлов территория города дифференцирована по степени опасности. Проведён расчёт таких показателей, как общий индекс загрязнения *PLI*, показатель потенциального экологического риска *PERI*, индекс загрязнения Nemerow (*NPI*). Установлено, что приоритетными загрязнителями являются свинец, мышьяк и цинк. Использование различных расчётных параметров загрязнения позволило выявить более детальную картину пространственного распределения тяжёлых металлов в почвах урболандшафтов, находящихся под влиянием сильной антропогенной нагрузки. Несмотря на имеющиеся различия в расчёте индексов, обнаружена высокая корреляционная зависимость между значениями суммарного показателя загрязнения (Z_c), индекса загрязнения Nemerow (*NPI*) и индекса потенциального экологического риска (*PERI*). Степень загрязнения почв различных функциональных зон по показателю потенциального экологического риска и общему индексу загрязнения *PLI* увеличивается в следующем ряду: зоны многоэтажной застройки < зоны зелёных насаждений < зоны транспортной инфраструктуры < зоны малоэтажной застройки < промышленные зоны.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, функциональное зонирование, загрязнение почв, урбанизированные почвы, антропогенное воздействие, геоинформационные системы.

Heavy metals in soils of various functional zones of urbanized territories: assessment of the content and environmental risk

© 2023. T. A. Trifonova^{1,2} ORCID: 0000-0002-1628-9430^{*}

I. N. Kurochkin¹ ORCID: 0000-0002-0405-2225^{*}, Yu. N. Kurbatov¹ ORCID: 0000-0002-0904-3854^{*}

¹Vladimir State University,

87, Gorkogo St., Vladimir, Russia, 600000,

²Lomonosov Moscow State University,

1, Leninskiye Gory, Moscow, Russia, 119991,

e-mail: tatrifon@mail.ru, ivan33vl@yandex.ru, iur.curbatov@gmail.com

In order to analyze heavy metal pollution of urbanized soils of the city of Vladimir, the selection and study of soil samples was carried out. Soil samples were analyzed for lead, zinc, copper, nickel, manganese, cobalt and chromium. The obtained indicators were compared with the maximum permissible concentrations and background values. The regularities between the proximity of the studied sites to industrial enterprises and the concentration of heavy metals in the soil are established. The coefficients of accumulation of heavy metals in soils have been calculated and metals that are priority pollutants with the highest accumulation coefficient have been identified. By calculating the total accumulation index of heavy metals, the territory of the city is differentiated by the degree of danger. The calculation of such indicators as: the general pollution index *PLI*, the indicator of potential environmental risk *PERI*, the Nemerow pollution index (*NPI*). It has been established that lead, arsenic and zinc are priority pollutants. The use of various calculated parameters of pollution allowed us to reveal

a more detailed picture of the spatial distribution of heavy metals in the soils of urban landscapes under the influence of a strong anthropogenic load. Despite the differences in the calculation of the indices, a high correlation was found between the values of the total pollution index (Z_c), the Nemerow pollution index (NPI) and the potential environmental risk index ($PERI$). The degree of soil contamination of various functional zones according to the indicator of potential environmental risk and the general pollution index PLI increases in the following series: zones of multi-storey buildings < zones of green spaces < zones of transport infrastructure < zones of low-rise buildings < industrial zones.

Keywords: heavy metals, functional zoning, soil pollution, urbanized soils, anthropogenic impact, geoinformation systems.

Снижение качества атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод – прямой результат широкого распространения процессов урбанизации и промышленного производства. К деградации городских почв и зелёных насаждений приводят такие процессы, как активная жилищная застройка, развитие транспортной сети, проведение коммуникаций [1–3].

Почвы урбанизированных территорий требуют особого внимания в части загрязнения тяжёлыми металлами, ввиду того, что они осуществляют важные экологические функции, участвуют в биогеохимических круговоротах, регуляции газового обмена. Причиной аккумуляции различных токсических веществ в поверхностном слое урбанизированных ландшафтов являются в основном выбросы промышленных предприятий и возрастающее количество автотранспорта. Однако буферная способность почв может быть утрачена в течение короткого промежутка времени в результате нерационального использования этой территории [4].

В работах многих авторов подчёркивается, что для урбанизированных почв, характеризующихся слабощелочной или нейтральной реакцией, тяжёлые металлы находятся в форме оксидов или гидроксидов, плохо растворимых в воде, в связи с чем их миграция в почве значительно затруднена [5, 6].

Город Владимир относится к категории населённых пунктов, ранее являющимися многопрофильными крупными промышленными центрами с развитой заводской инфраструктурой различных отраслей промышленности. Однако, начиная с начала 1990-х гг., многие предприятия перепрофилировались, значительно сузили спектр производимой продукции, уменьшили производственные мощности. Многие промышленные предприятия прекратили свою деятельность. Однако в городских почвах наблюдается остаточное загрязнение, несмотря на значительно уменьшившуюся эмиссию тяжёлых металлов посредством сокращения производственной деятельности и снижения количества выбросов загрязняю-

щих веществ в атмосферу. Многолетние данные подтверждают, что на здоровье жителей городов Европейской части России непосредственное влияние оказывает низкое качество атмосферного воздуха, способствуя развитию различных заболеваний [7–9].

При этом на изменение элементного состава почв непосредственное влияние оказывают численность населения и особенности городского ландшафта, а именно: размещение промышленного производства, транспортной сети, селитебных и рекреационных зон [10–13].

Для выявления геохимического состояния и характера загрязнения почв в настоящее время в мире широко применяются различные показатели, как простые (индекс геоаккумуляции I_{geo} , коэффициент концентрации EF , индивидуальный индекс загрязнения PI), так и комплексные (общий индекс загрязнения PLI , показатель потенциального экологического риска $PERI$ и др.) [14, 15].

Целью настоящего исследования являлось проведение оценки загрязнения тяжёлыми металлами урбанизированных почв г. Владимира, анализ пространственного распределения уровня загрязнённости и оценка геохимического состояния почв различных функциональных зон урболандшафтов с использованием нескольких индексов загрязнения.

Объекты и методы исследования

Исследование почвенного покрова было проведено в г. Владимире, промышленном и административном центре области. Объектом данного исследования являются верхние горизонты городских почв. Почвенный покров города представлен преимущественно трансформированными дерново-подзолистыми почвами [9]. Известно, что для почв урбанизированных территорий характерна размытость почвенных горизонтов, нарушение почвенного профиля, наличие посторонних включений.

Воздушный бассейн города ежегодно подвергается высокой нагрузке из-за газопылевых выбросов промышленных предприятий

и автотранспорта, что подтверждается в исследованиях [16, 17].

Транспортная инфраструктура города представлена двумя основными транспортными артериями. В последние годы введена в эксплуатацию Лыбедская магистраль, строительство которой предусматривало разгрузку автотранспорта от центральной исторической части города, где расширение проезжей части невозможно ввиду исторической застройки и памятников архитектуры. Помимо данных объектов транспортной инфраструктуры, город пронизывают десятки крупных дорог районного и местного значения.

В промышленных зонах г. Владимира было отобрано 8 образцов почв, в рекреационных – 12, в зонах малоэтажной застройки – 7, в зонах многоэтажной застройки – 13, в транспортно-селитебной зоне – 9 образцов.

В рекреационных зонах с относительно хорошо развитым растительным покровом (парки, участки городских зелёных насаждений) преобладают естественные и поверхностно антропогенно-преобразованные почвы. В зонах малоэтажной застройки микроклиматические условия близки к естественным, площадь искусственного покрытия не оказывает сильного влияния на развитие растительного покрова и почвенные характеристики. Искусственная расчленённость рельефа в зонах многоэтажной селитебной застройки является причиной значительного изменения температурного режима, что оказывает непосредственное воздействие на видовой состав и жизнеспособность напочвенной травянистой растительности. Почвы транспортно-селитебной и промышленной зон относятся к глубоко антропогенно-преобразованным. Большая часть промышленных предприятий сконцентрирована в восточной части города.

Оценку загрязнения урбанизированных почв тяжёлыми металлами (ТМ) проводили в три этапа: 1) отбор почвенных образцов и пробоподготовка в соответствии с ГОСТ 14.4.4.02-84; 2) анализ содержания ТМ методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии с использованием кристалл-дифракционного спектрометра «Спектроскан МАКС» (погрешность выполненных измерений приведена в таблице 1 в соответствии с «Методикой выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах методом рентгенофлуоресцентного анализа» М049-П/02); 3) импорт полученных значений и проведение интерполяции с использованием инструментов геоинформационной системы ArcGIS.

Для определения степени загрязнения почв ТМ рассчитан индекс загрязнения (Single Pollution Index), который используется для выявления наличия загрязнения отдельными поллютантами [17, 18]:

$$PI = \frac{C_i}{GB}, \quad (1)$$

где PI – индекс загрязнения; C_i – содержание i -го тяжёлого металла в верхнем горизонте почвы (мг/кг); GB – фоновое содержание (или кларк в почве) i -го тяжёлого металла (мг/кг).

Для расчёта совокупной аккумуляции ТМ был рассчитан коэффициент загрязнения PLI (Pollution Load Index) [19]:

$$PLI = (PI_1 \cdot PI_2 \cdot \dots \cdot PI_n)^{1/n}. \quad (2)$$

Значение $PLI < 1,0$ свидетельствует об отсутствии загрязнения [19].

Для оценки качества почв отечественными и зарубежными исследователями широко используется индекс загрязнения Nemerow (NPI) [2, 19], учитывающий вклад не только каждого загрязняющего вещества, но и потенциальную опасность металла-загрязнителя с наибольшим содержанием. Индекс загрязнения рассчитывается по формуле:

$$NPI = \sqrt{0,5(PI_{\max}^2 + PI_{\text{ave}}^2)} \quad (3),$$

где PI_{\max} – максимальное значение PI среди n металлов, PI_{ave} – среднее значение PI . Согласно показателю NPI , выделяется пять классов загрязнения почвы: $NPI < 0,7$ – чистая почва, $0,7 < NPI < 1,0$ – пограничный уровень, $1,0 < NPI < 2,0$ – слабое загрязнение, $2,0 < NPI < 3,0$ – среднее, $NPI > 3$ – сильное загрязнение [20].

В ходе работы рассчитывали индекс потенциального экологического риска (Potential Ecological Risk Index). Данный индекс всесторонне учитывает уровень токсичности, концентрацию ТМ и их экологическую чувствительность [19, 20], $PERI$ состоит из трёх модулей – степень загрязнения, фактор токсического воздействия и потенциальный фактор экологического риска. Показатель потенциального экологического риска ($PERI$) рассчитывается по следующей формуле [20–22]:

$$PERI = \sum PI_i \cdot T_i, \quad (4),$$

где T_i – коэффициент токсичности ТМ. Значение $PERI < 90$ означает низкий уровень экологической опасности, 90–180 – средний,

180–360 – высокий, 360–720 – очень высокий, > 720 – чрезвычайно высокий [20].

Статистическая обработка полученных данных проведена с помощью инструментов MS Excel.

Картографирование результатов полученных данных и создание интерполированных поверхностей на основе вычисляемых индексов проведено при помощи модуля «Spatial Analyst» ГИС «ArcGIS 10.4».

Результаты и обсуждение

В ходе исследования нами были определены концентрации ТМ и мышьяка в почвах г. Владимира (табл. 1).

По сравнению с фоновыми значениями, в почвах г. Владимира наблюдаются высокие средние концентрации Pb, As, Zn и Cu. Показатели содержания Ni и Co сравнимы с кларком, а концентрации оксида Mn, Cr и V значительно ниже его.

Значения комплексных показателей загрязнения *PLI* и *NPI* свидетельствуют о зна-

чительной деградации поверхностного слоя городских почв и сильной степени загрязнения ТМ. Максимальные значения показателя потенциального экологического риска характеризуют его как высокий, однако в среднем по городу наблюдается низкий уровень экологической опасности.

Величины коэффициента вариации, полученные при анализе результатов исследования, указывают на однородную степень рассеивания таких металлов, как Cu, Ni, Mn, Cr и V. В то же время наблюдается сильно неоднородная степень рассеивания для Pb и As.

Согласно полученным результатам, наибольшими средними коэффициентами накопления отличаются Pb (6,833), As (2,909) и Zn (2,835). Максимальные значения среднего индекса загрязнения наблюдаются в промышленной зоне (2,787) и в зонах малоэтажной застройки (2,483).

Территориальное распределение суммарного показателя загрязнения на территории г. Владимира выглядит следующим образом

Таблица 1 / Table 1

Тяжёлые металлы и мышьяк в городских почвах г. Владимира (мг/кг)
Heavy metals and As in urban soils of Vladimir (mg/kg)

Показатель Indicator	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Co	MnO	Cr	V
Минимум / Minimum	17,5	2,516	55,98	0,001	15,35	0,001	270,7	53,5	9,41
Максимум / Maximum	338,5	55,91	453,1	91,23	57,53	26,47	1270	210,6	93,58
Среднее / Average	68±31*	12±9	142±28	52±26	37±10	11±6	720±60	87±26	61±19
Медиана / Median	50,02	8,582	109,1	52,53	36,72	11,64	739	81,56	63,07
Стандартное отклонение Standart deviation	58,65	9,47	81,77	16,99	8,61	5,71	208,92	24,03	17,74
Стандартная ошибка Standart error	8,29	1,34	11,56	2,4	1,21	0,8	29,54	3,39	2,5
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation	85,84	81,46	57,7	32,84	23,40	50,41	28,94	27,54	29,03
Фоновое содержание (кларк)** Background content (clark)**	10	4	50	20	40	8	750	200	100
ОДК** Approximate permissible concentrations**	130	10	220	132	80	5***	1500***	6***	150***

Примечания: * – значения погрешностей рассчитаны в соответствии с методикой измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв и донных отложений рентгенофлуоресцентным методом М-049-ПДО/18. ФР.1.31.2018.32143; ** – фоновые содержания и ОДК указаны в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21; *** – предельно допустимые концентрации.

Notes: * – the error values were calculated in accordance with the method of measuring the mass fraction of metals and metal oxides in powder samples of soils and bottom sediments by the X-ray fluorescence method M-049-PDO/18. FR.1.31.2018.32143; ** – background contents and maximum allowable concentrations are indicated. UEC are specified in accordance with the SanPiN 1.2.3685-21; *** – the maximum permissible concentrations are indicated.

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты корреляции Пирсона r между различными показателями загрязнения
Pearson correlation coefficients r between different pollution indicators

Показатели Indicators	Значение r / r value	Интерпретация Interpretation	Уровень статистической значимости корреляции The level of statistical significance of correlation
Z_c / PLI	0,528	средняя / average	$p = 0,0001$
Z_c / $PERI$	0,974	сильная / strong	$p = 3,2 \cdot 10^{-31}$
Z_c / NPI	0,957	сильная / strong	$p = 2,3 \cdot 10^{-26}$
PLI / $PERI$	0,340	умеренная / medium	$p = 0,018$
PLI / NPI	0,276	слабая / weak	$p = 0,057$
$PERI$ / NPI	0,996	сильная / strong	$p = 3,1 \cdot 10^{-50}$

(рис. 1, см. цв. вкладку III) (цифрами на рисунке 1 и далее обозначены номера участков пробоотбора).

Выделяется три крупных очага со значительным превышением допустимых показателей. Первый, в северо-западной части города (участок отбора № 22), располагается на территории промышленной зоны. К тому же, менее чем в 500 м к северу от данного местоположения, проходит федеральная трасса М-7 «Волга».

Повышенное значение Z_c в центральной части города (участок № 17), вероятно обусловлено высоким трафиком автомобильного транспорта и значительным техногенным прессингом данной территории. Проходящее рядом Судогодское шоссе, пересекающее р. Клязьма, является крупной региональной трассой, соединяющей областную центр с районными центрами юго-востока Владимирской области. В конце 1950-х гг. эта территория была подвергнута значительному антропогенному вмешательству, для строительства данной трассы был срезан слой грунта около 4–5 м.

Также высокие значения суммарного показателя загрязнения наблюдаются на востоке города (участок № 38), что связано с наличием поблизости нескольких крупных промышленных предприятий. При этом территории, находящиеся к западу от предприятий, не так сильно подвержены загрязнению.

Наиболее напряжённую ситуацию представляет собой загрязнение почв г. Владимира свинцом. Это также подтверждается в исследовании, проведённом в 2019 г. [3]. Предельно допустимая концентрация Pb (32 мг/кг) превышена почти в два раза на значительных площадях, в основном же уровень загрязнения Pb колеблется в пределах 1,2–1,6 ПДК.

Выявлены значимые корреляционные зависимости между рассматриваемыми параметрами (табл. 2).

Так, между суммарным показателем загрязнения (Z_c) и индексом загрязнения Nemerow (NPI) $r = 0,974$, а между Z_c и показателем потенциального экологического риска $r = 0,957$. Это позволяет не рассматривать детально каждый из данных трёх показателей. В то же время значительной корреляционной зависимости между суммарным показателем загрязнения и коэффициентом загрязнения PLI не выявлено ($r = 0,528$).

Градации показателей PLI весьма условна (упоминается лишь, что $PLI < 1,0$ указывает на отсутствие загрязнения [23]), а максимальные значения данного показателя достигают 2,5. Пространственное распределение PLI , полученное по результатам математической обработки имеющихся данных, представляет собой следующую картину (рис. 2, см. цв. вкладку III).

Наибольшие значения коэффициента PLI (2–2,5) наблюдаются на территории промышленных зон в восточной части города и вдоль федеральной трассы М-7 «Волга». Повышенные значения (1,5–2) на юго-западе города, вероятно, связаны с близостью железнодорожных путей, и техногенной нагрузкой при строительстве новых жилых массивов. Отсутствие загрязнения ($PLI < 1$) зафиксировано лишь на двух участках. Это крайняя юго-западная часть города, представляющая собой селитебную застройку двухэтажными домами (бывший пос. совхоза «Вышка») и небольшой участок территории в историческом центре города – комплекс ландшафтов, относящихся к фрагменту древних владимирских валов домонгольской эпохи. В остальной части города показатель PLI в основном колеблется от 1 до 1,5.

Почвенные образцы отобраны во всех основных типах функциональных зон города.

Т. А. Трифонова, И. Н. Курочкин, Ю. Н. Курбатов
«Тяжёлые металлы в почвах различных функциональных зон
урбанизированных территорий: оценка содержания
и экологического риска». С. 38.

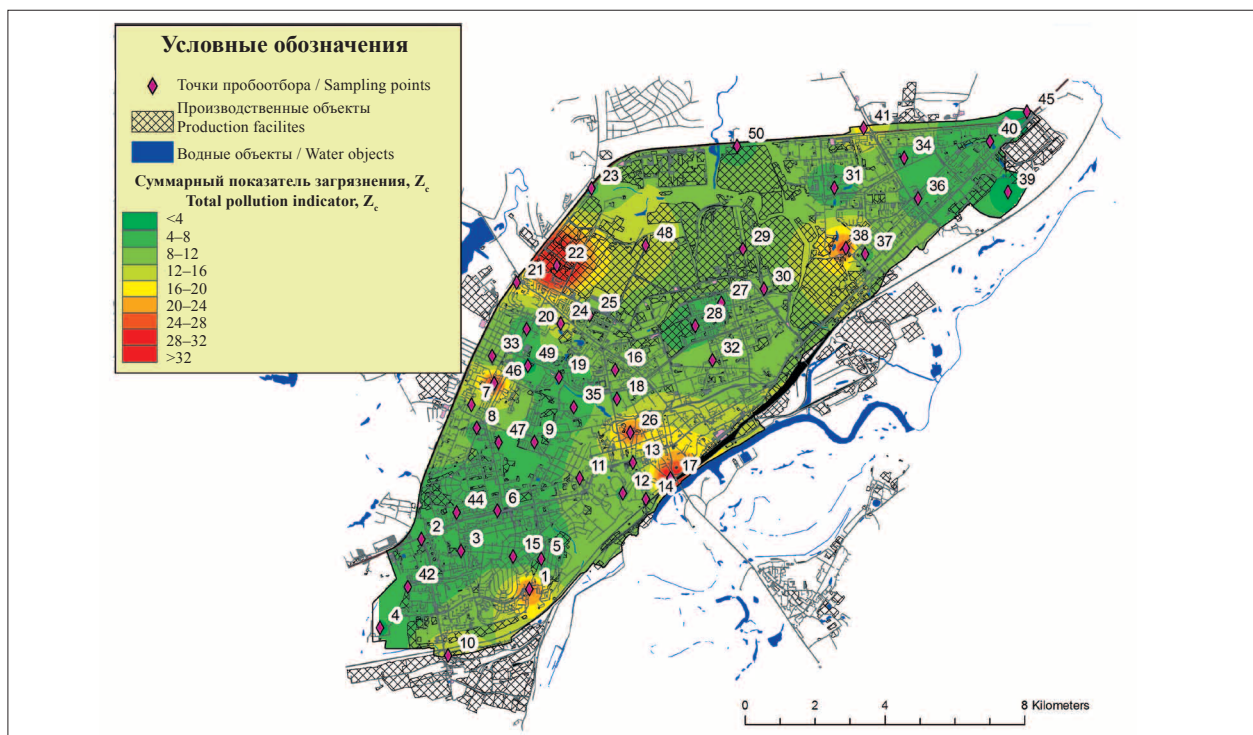


Рис. 1. Суммарный показатель загрязнения почв г. Владимира
Fig. 1. Total indicator of soil pollution in Vladimir

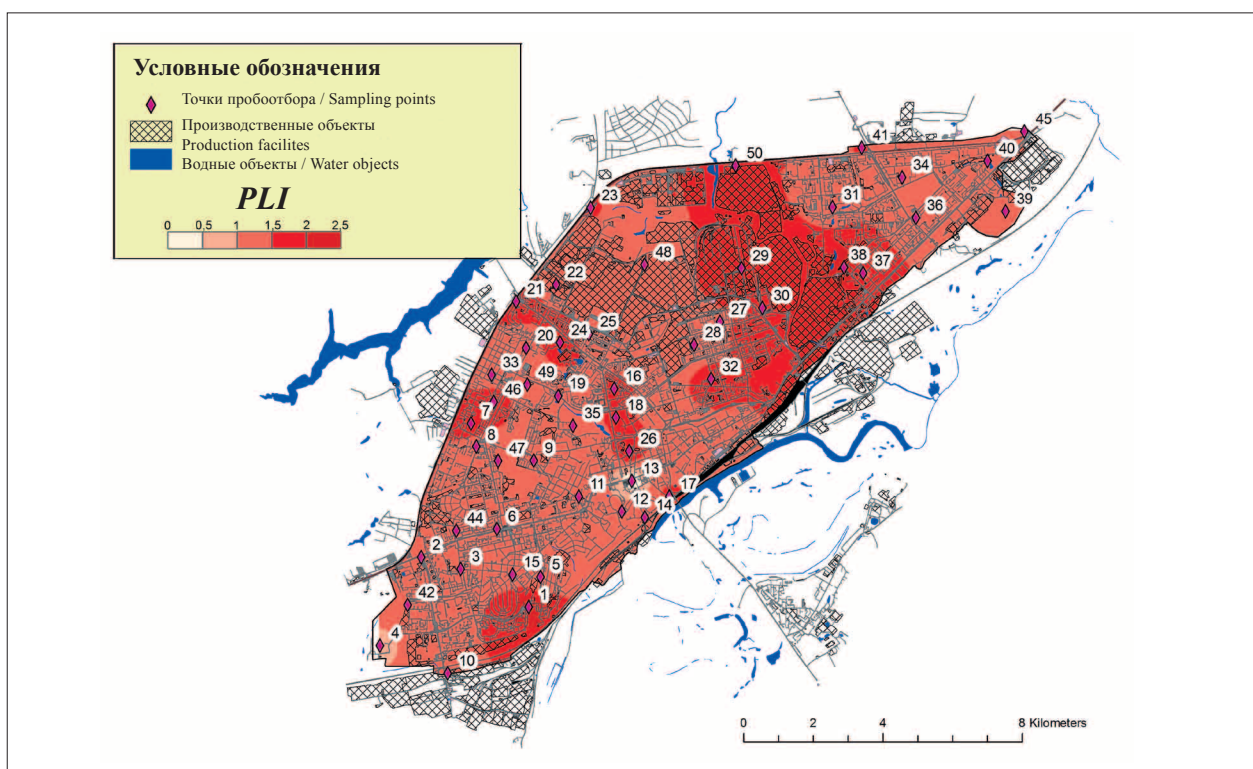


Рис. 2. Коэффициент загрязнения *PLI* (Pollution Load Index) для почв г. Владимира
Fig. 2. Pollution coefficient *PLI* for Vladimir soils

Т. А. Трифонова, И. Н. Курочкин, Ю. Н. Курбатов
«Тяжёлые металлы в почвах различных функциональных зон
урбанизированных территорий: оценка содержания
и экологического риска». С. 38.

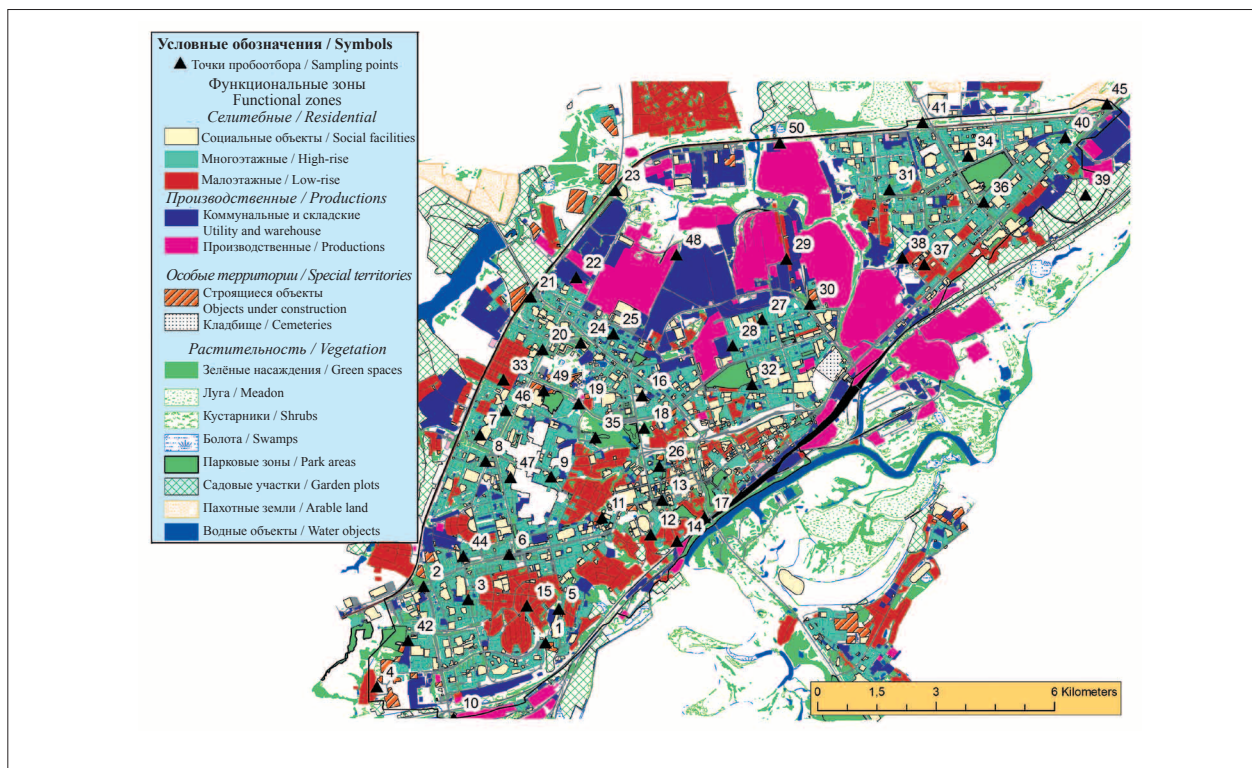


Рис. 3. Распределение участков отбора по функциональным зонам г. Владимира
Fig. 3. Distribution of selection points by functional zones of Vladimir

Данные, представленные на карте-схеме (рис. 3, см. цв. вкладку IV), позволяют оценить функциональное зонирование города. Так, наибольшую площадь занимают массивы средне- и многоэтажных домов (16,52%). При выделении функциональных зон городских территорий производственные зоны делятся на два типа – 14% занимают коммунальные и складские зоны, расположенные в основном в северной части города, рядом с промышлен-

ными предприятиями, а также на юго-западе и северо-востоке, вдоль железной дороги. Чуть меньшую площадь (13,68%) занимают непосредственно промышленные предприятия.

Зелёные насаждения, представленные в городе как массивами деревьев в жилых зонах, так и газонами, и посадками вдоль дорог, небольшими участками естественной древесной растительности на месте предприятий, прекративших свою производствен-

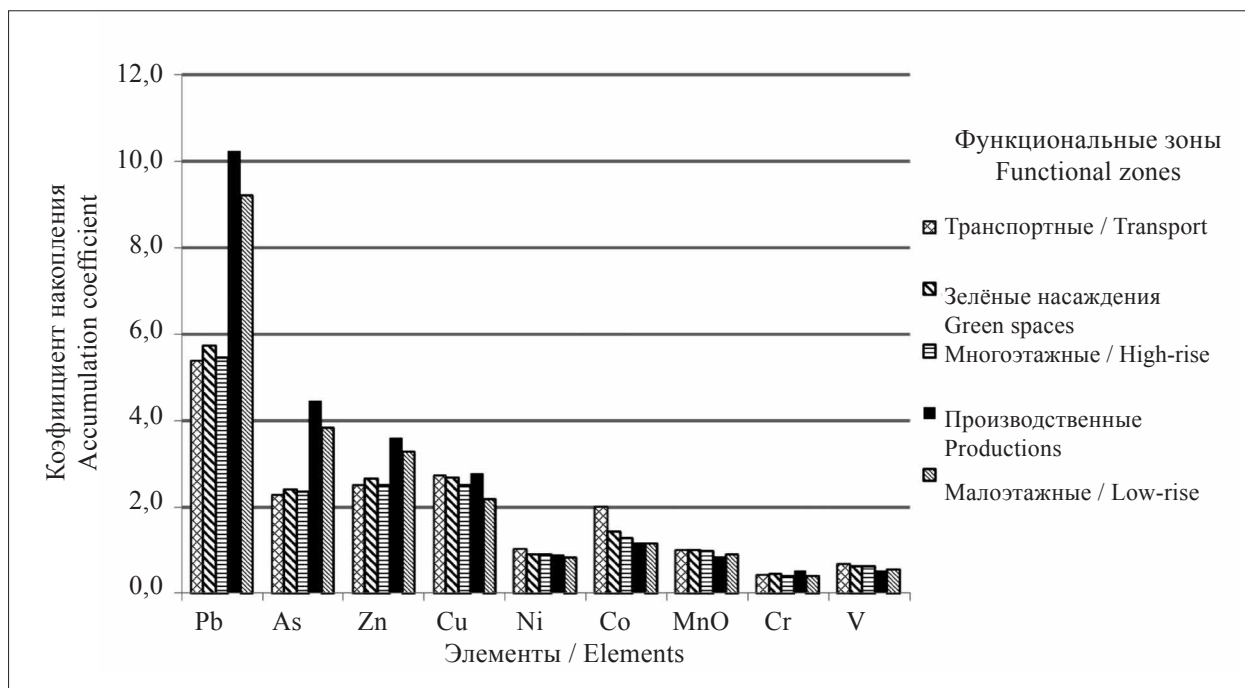


Рис. 4. Коэффициенты накопления тяжёлых металлов и мышьяка в различных функциональных зонах г. Владимира

Fig. 4. Indicators of heavy metals and As accumulation in various functional zones of Vladimir

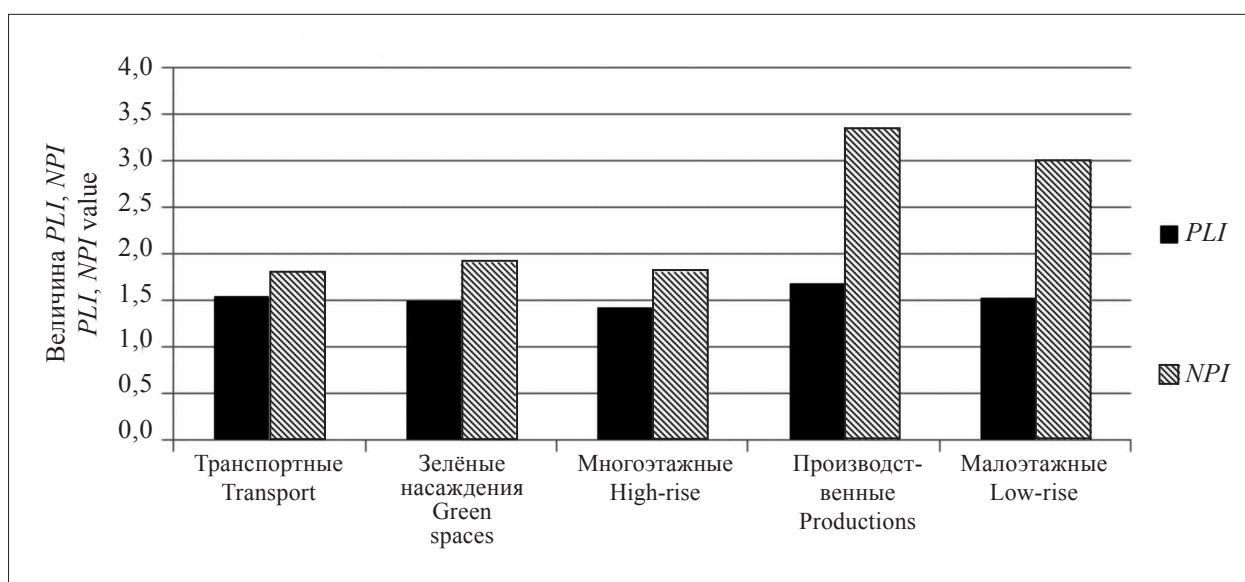


Рис. 5. Показатели NPI и PLI в различных функциональных зонах г. Владимира

Fig. 5. NPI and PLI indicators in various functional zones of Vladimir

ную деятельность, занимают 13,33% площади территории города.

Наибольшими коэффициентами накопления Pb и As характеризуются почвы промзон и малоэтажной застройки (рис. 4). В зонах транспортной инфраструктуры отмечается значительное накопление Co. Хотя Co, как правило, не поступает в больших количествах в окружающую среду, он является одним из опасных загрязнителей, так как потенциально токсичен и является канцерогеном. По уровню фитотоксичности Co занимает третье место среди металлов после Cd и Cu. Для остальных исследуемых тяжёлых металлов значимых различий коэффициентов накопления не выявлено.

Судя по значениям комплексного индекса загрязнения Nemerow (*NPI*) степень загрязнения городских почв возрастает в следующем порядке: зоны транспортной инфраструктуры (1,82, слабое загрязнение) < зоны селитебной многоэтажной застройки (1,83, слабое загрязнение) < зоны зелёных насаждений (1,92, слабое загрязнение) < зона малоэтажной застройки (3,00, среднее загрязнение) < производственные зоны (3,36, сильное загрязнение).

Анализ значений коэффициента загрязнения *PLI* несколько иначе характеризует ситуацию (рис. 5), порядок нарастания загрязнения претерпевает некоторые изменения и выглядит следующим образом: зоны многоэтажной застройки < зоны зелёных насаждений < зоны малоэтажной застройки < зоны транспортной инфраструктуры < производственные зоны.

Разница в порядке нарастания загрязнения для *PLI* и *NPI* заключается в том, что при расчёте *PLI* учитываются лишь средние показатели загрязнения для каждого исследуемого металла; *NPI* же предусматривает включение в расчёт потенциальной опасности металла-загрязнителя с наибольшим содержанием.

Достаточно высокий уровень загрязнения почв в зонах малоэтажной застройки может быть обусловлен сочетанием нескольких факторов. Около 50% домохозяйств в зонах малоэтажной застройки имеют печное отопление, что сказывается на накоплении в почвах угольной пыли, шлака и продуктов сжигания бытового мусора. Также следует обратить внимание, что повсеместно в зимний период городские коммунальные службы для отсыпки дорог и тротуаров используют шлак, который весной с талыми водами попадает на газоны и придомовые участки, загрязняя почву и увеличивая количество пыли в воздухе.

Кроме того, на приусадебных садах и огородах жители зачастую используют широкий ассортимент продукции сельскохозяйственной химии, в которой в виде примесей содержатся ТМ.

Таким образом, следствием отсутствия канализации и централизованного отопления, широкого несбалансированного применения населением удобрений является значительное повышение концентраций ТМ в почвах зон малоэтажной застройки.

В промышленных зонах и зонах транспортной инфраструктуры показатели накопления и рассчитанные индексы также имеют высокие значения, что говорит о большом количестве газопылевых выбросов промышленных предприятий и автомобильного транспорта.

Заключение

По итогам проведённого анализа показателей концентраций тяжёлых металлов в почвах г. Владимира было подтверждено, что близость промышленных предприятий к жилым массивам влечёт за собой накопление в почвах загрязнителей, которые при высоких концентрациях опасны для здоровья человека.

Использование различных расчётных параметров загрязнения позволило выявить более детальную картину пространственного распределения тяжёлых металлов в почвах урбололандшафтов, находящихся под влиянием сильной антропогенной нагрузки. Несмотря на имеющиеся различия в расчёте индексов, обнаружена высокая корреляционная зависимость между значениями суммарного показателя загрязнения (Z_c), индекса загрязнения Nemerow (*NPI*) и индекса потенциального экологического риска (*PERI*).

Степень загрязнения почв различных функциональных зон по показателю потенциального экологического риска увеличивается в следующем ряду: зоны многоэтажной застройки < зоны зелёных насаждений < зоны транспортной инфраструктуры < зоны малоэтажной застройки < промышленные зоны.

Литература

1. Кряжева Е.Ю., Лаптева Е.М., Денева С.В., Холопов Ю.В., Бадулина Н.В., Осадчая Г.Г. Оценка антропогенного загрязнения тяжёлыми металлами и мышьяком почв города Ухта (Республика Коми) // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 95–101.

2. Жарикова Е.А. Тяжёлые металлы в городских почвах: Оценка содержания и экологического риска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 1. С. 164–173.

3. Трифонова Т.А., Чугай Н.В., Кулагина Е.Ю., Курочкин И.Н., Краснощекоев А.Н., Ларионов М.В. Картографирование результатов оценки загрязнения тяжёлыми металлами почв г. Владимира с применением ГИС-технологий // АгроЭкоИнфо. 2020. № 1. С. 1–8.

4. Qian Y., Gallaghe F., Deng Y., Wu M., Feng H. Risk assessment and interpretation of heavy metal contaminated soils on an urban brownfield site in New York metropolitan area // Environmental Science and Pollution Research. 2017. V. 24. P. 23549–23558.

5. Кошелёва Н.Е., Касимов Н.С., Корляков И.Д., Власов Д.В. Влияние застройки на загрязнение городских почв тяжёлыми металлами // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2020. № 12. С. 137–144.

6. Новикова Н.С., Довганюк А.И. Оценка степени загрязнения тяжёлыми металлами почв в условиях городской среды // Вестник ландшафтной архитектуры. 2020. № 23. С. 51–54.

7. Савченко О.В., Тюпелев П.А. Особенности микроэлементного статуса у детей, проживающих в районах города с разной степенью загрязнения окружающей среды // Экология человека. 2009. № 1. С. 47–50.

8. Наумов Ю.А., Подкопаева О.В. Особенности, тенденции и последствия загрязнения атмосферы городов Приморского края // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2013. № 4. С. 155–171.

9. Дорохова М.Ф., Кошелева Н.Е., Терская Е.В. Экологическое состояние городских почв в условиях антропогенного засоления и загрязнения (на примере Северо-Западного округа Москвы) // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 4. С. 16–24.

10. Олькова А.С., Зимонина Н.М., Лялина Е.И., Бобрецова В.Р. Диагностика локального загрязнения урбанизированных территорий в районах автозаправочных станций // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 1. С. 56–62.

11. Экологический атлас бассейна реки Клязьмы: Человек в окружающей среде / Под ред. Т.А. Трифоновой. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018. 312 с.

12. Прокофьева Т.В., Герасимова М.И., Безуглова О.С., Бахматова К.А., Гольева А.А., Горбов С.Н., Жарикова Е.А., Матинян Н.Н., Наквасина Е.Н., Сивцева Н.Е. Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1115–1164.

13. Калманова В.Б. Экологический каркас урбанизированных территорий (на примере города Биробиджана) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2. С. 385–388.

14. Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive

evaluation of the degree of soil contamination. A review // Environmental Geochemistry and Health. 2018. V. 40. P. 2395–2420.

15. Tong S., Li H., Wang L., Tudi M., Yang L. Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019 – a systematic review // International Journal Environmental Research and Public Health. 2020. V. 17. Article No. 3099.

16. Мищенко Н.В., Краснощекоев А.Н., Трифонова Т.А. Оценка состояния почвенно-растительного покрова промышленного центра с применением геоинформационных технологий // Экология урбанизированных территорий. 2009. № 1. С. 89–95.

17. О состоянии окружающей среды и здоровья населения Владимирской области в 2016 году: ежегодный доклад. Владимир: Транзит-ИКС, 2017. 118 с.

18. Kwon Y.T., Lee C.W. Application of multiple ecological risk indices for the evaluation of heavy metal contamination in a coastal dredging area // The Science of the Total Environment. 1998. V. 214. P. 203–210.

19. Nabholz J.V. Environmental hazard and risk assessment under the United States Toxic Substances Control Act // Sci. Total Environ. 1991. V. 109. P. 649–665.

20. Singh A., Sharma R.K., Agrawal M., Marshall F.M. Health risk assessment of heavy metals via dietary intake of foodstuffs from the wastewater irrigated site of a dry tropical area of India // Food Chem. Toxicol. 2010. V. 48. P. 611–619.

21. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach // Water Research. 1980. V. 14. P. 975–1001.

22. Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review // Environmental Geochemistry and Health. 2019. V. 40. P. 2395–2420.

23. Chen J. Application of improved Nemerow index method based on entropy weight for groundwater quality evaluation // International Journal of Environmental Sciences. 2012. V. 2. P. 212–219.

References

1. Kryazheva E.Yu., Lapteva E.M., Badulina N.V., Deneva S.V., Kholopov Yu.V., Osadchaya G.G. Assessment of anthropogenic pollution by heavy metals and arsenic in soils of Ukhta city (Komi Republic) // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 2. P. 95–101 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-095-101

2. Zharikova E.A. Assessment of heavy metals content and environmental risk in urban soils // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2021. V. 332. No. 1. P. 164–173 (in Russian). doi: 10.18799/24131830/2021/1/3009

3. Trifonova T.A., Chugay N.V., Kulagina E.Yu., Kurochkin I.N., Krasnoshchekov A.N., Larionov M.V.

Mapping of heavy metal pollution assessment results for Vladimir soils using GIS technologies // *AgroEcoInfo*. 2020. No. 1. P. 1–8 (in Russian).

4. Qian Y., Gallaghe F., Deng Y., Wu M., Feng H. Risk assessment and interpretation of heavy metal contaminated soils on an urban brownfield site in New York metropolitan area // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. V. 24. P. 23549–23558. doi: 10.1007/s11356-017-9918-0

5. Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Korlyakov I.D., Vlasov D.V. Influence of development on contamination of urban soils with heavy metals in eastern Moscow // *Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnykh resursov*. 2020. No. 12. P. 137–144 (in Russian). doi: 10.36535/0235-5019-2020-12-4

6. Novikova N.S., Dovganyuk A.I. Assessment of the degree of heavy metal contamination of soils in an urban environment // *Vestnik landshaftnoy arkhitektury*. 2020. No. 23. P. 51–54 (in Russian).

7. Savchenko O.V., Tyupelev P.A. Features of the microelement status in children lived in city areas with the different degrees of environmental contamination // *Human ecology*. 2009. No. 1. P. 47–50 (in Russian).

8. Naumov Yu.A., Podkopaeva O.V. Features, trends and effects of air pollution to the cities of Primorsky region // *Territoriya novykh vozmozhnostey. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa*. 2013. No. 4. P. 155–171 (in Russian).

9. Ecological atlas of the Klyazma River basin / Ed. T.A. Trifonova. Vladimir: VISU, 2018. 312 p. (in Russian).

10. Dorokhova M.F., Kosheleva N.E., Terskaya E.V. Ecological state of urban soils subject to anthropogenic salinization and pollution (the North-Western District of Moscow as a study case) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2015. No. 4. P. 16–24 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-4-016-024

11. Olkova A.S., Zimonina N.M., Lyalina E.I., Bobretsova V.R. Diagnostics of local pollution of urbanized areas in the areas of petrol stations // *Theoretical and Applied Ecology*. 2017. No. 1. P. 56–62 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-056-062

12. Prokof'eva T.V., Gerasimova M.I., Bezuglova O.S. and others. Inclusion of soils and soil-like bodies of urban territories into the Russian soil // *Eurasian Soil Science*. 2014. No. 10. P. 1115–1164 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X14100104

13. Kalmanova V.B. The ecological framework of the urbanized territories (on the example of Birobidzhan city) // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2016. V. 18. No. 2. P. 385–388 (in Russian).

14. Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review // *Environmental Geochemistry and Health*. 2018. V. 40. P. 2395–2420. doi: 10.1007/s10653-018-0106-z

15. Tong S., Li H., Wang L., Tudi M., Yang L. Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019 – a systematic review // *International Journal Environmental Research and Public Health*. 2020. V. 17. Article No. 3099. doi: 10.3390/ijerph17093099

16. Mishchenko N.V., Krasnoshchekov A.N., Trifonova T.A. The evaluation of the state of the topsoil in industrial centre performed with the use of geo-informative technologies // *Ekologiya promyshlennykh territoriy*. 2009. No. 1. P. 89–95 (in Russian).

17. On the state of the environment and the health of the population of the Vladimir region in 2016: annual report // Administration of the Vladimir Region, Department of Nature Management and Environmental Protection. Vladimir: Transit-X, 2017. 118 p. (in Russian).

18. Kwon Y.T., Lee C.W. Application of multiple ecological risk indices for the evaluation of heavy metal contamination in a coastal dredging area // *The Science of the Total Environment*. 1998. V. 214. P. 203–210. doi: 10.1016/S0048-9697(98)00069-2

19. Nabholz J.V. Environmental hazard and risk assessment under the United States Toxic Substances Control Act // *Sci. Total Environ*. 1991. V. 109. P. 649–665. doi: 10.1016/0048-9697(91)90218-4

20. Singh A., Sharma R.K., Agrawal M., Marshall F.M. Health risk assessment of heavy metals via dietary intake of foodstuffs from the wastewater irrigated site of a dry tropical area of India // *Food Chem. Toxicol*. 2010. V. 48. P. 611–619. doi: 10.1016/j.fct.2009.11.041

21. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A Sedimentological approach // *Water Research*. 1980. V. 14. P. 975–1001. doi: 10.1016/0043-1354(80)90143-8

22. Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review // *Environmental Geochemistry and Health*. 2019. V. 40. P. 2395–2420. doi: 10.1007/s10653-018-0106-z

23. Chen J. Application of improved Nemerow index method based on entropy weight for groundwater quality evaluation // *International Journal of Environmental Sciences*. 2012. V. 2. P. 212–219. doi: 10.6088/ijes.00202030015