

УДК 631.45

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-164-184



Ссылки для цитирования:

Тагивердиев С.С., Плахов Г.А., Сальник Н.В., Безуглова О.С., Горбов С.Н. Закономерности распределения цинка, меди и свинца в различных размерных фракциях агрегатов городских почв Ростова-на-Дону // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 120. С. 164-184. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-164-184

Cite this article as:

Tagiverdiev S.S., Plakhov G.A., Salnik N.V., Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Regularity of zinc, copper, and lead distribution in different size fractions of Rostov-on-Don urban soil aggregates, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 120, pp. 164-184, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-164-184

Благодарность:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента для молодых ученых-кандидатов наук МК-3257.2022.1.4.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № FENW-2023-0008.

Acknowledgments:

The research was carried out with the financial support of the Presidential Grant for Young PhD Scientists MK-3257.2022.1.4.

The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment in scientific activity No. FENW-2023-0008.

Закономерности распределения цинка, меди и свинца в различных размерных фракциях агрегатов городских почв Ростова-на-Дону

© 2024 г. С. С. Тагивердиев^{*}, Г. А. Плахов, Н. В. Сальник^{**},
О. С. Безуглова^{***}, С. Н. Горбов^{****}

*Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского
Южного федерального университета, Россия,
344090, Ростов-на-Дону, пр-кт Стачки, 194/1,*

^{}<https://orcid.org/0000-0003-4422-1094>, e-mail: 2s-t@mail.ru,*

*^{***}<https://orcid.org/0000-0001-7840-365X>,*

***<https://orcid.org/0000-0003-4180-4008>,
****<https://orcid.org/0000-0002-0174-1631>.

*Поступила в редакцию 05.10.2023, после доработки 20.10.2023,
принята к публикации 21.08.2024*

Резюме: Статья посвящена исследованию содержания цинка, меди и свинца в почвах Ростова-на-Дону. Пробы почв были отобраны из полнопрофильных разрезов, расположенных в разных районах города и пригородов Ростова-на-Дону. Группа антропогенно-измененных почв включала урбостратоземы и реплантоземы (Urbic Technosol), а также урбистратифицированные черноземы (Calcic Chernozems (Technic)). Естественные почвы рекреационных территорий представлены черноземами миграционно-сегрегационными (Calcic Chernozems). Содержание металлов определяли с использованием атомно-абсорбционной спектроскопии (1 н вытяжка азотной кислоты) и рентгенофлуоресцентного анализа. Для выделения размерных фракций (<0.25; 1–2; 3–5; 5–7; >10 мм) структуры почв применяли метод Саввинова (сухое просеивание). Изучение взаимосвязей проводили с помощью критерия Вилкоксона для связанных выборок. Цель работы – оценить содержание тяжелых металлов в разных размерных фракциях агрегатов и способность структурных фракций к аккумуляции цинка, меди и свинца. Структурные агрегаты различной размерности различаются по способности к накоплению цинка, меди и свинца. Цинк, включая его подвижные соединения, преимущественно накапливается в микроагрегатах. Содержание валовой меди и особенно свинца приурочено к более крупным агрегатам. В то же время подвижные соединения меди концентрируются в микроагрегатах и во фракции размерностью более 10 мм. Подвижные соединения свинца распределяются по фракциям разной размерности довольно равномерно во всех изученных почвах.

Ключевые слова: тяжелые металлы; почвенные агрегаты; урбостратоземы; черноземы; городские почвы; антропогенное загрязнение.

Regularity of zinc, copper, and lead distribution in different size fractions of Rostov-on-Don urban soil aggregates

© 2024 S. S. Tagiverdiev*, G. A. Plakhov, N. V. Salnik**,
O. S. Bezuglova***, S. N. Gorbov****

Academy of Biology and Biotechnology
D.I. Ivanovsky Southern Federal University,
194/1 Stachki Avenue, Rostov-on-Don 344090, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0003-4422-1094>, e-mail: 2s-t@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-7840-365X>,
<https://orcid.org/0000-0003-4180-4008>,
<https://orcid.org/0000-0002-0174-1631>.

Received 05.10.2023, Revised 20.10.2023, Accepted 21.08.2024

Abstract: The article is devoted to the study of zinc, copper, and lead content in the soils of Rostov-on-Don. Soil samples were collected from full-profile sections located in different districts of the city and suburbs of Rostov-on-Don. The group of anthropogenically disturbed soils included Urbic Technosol urbanstratozems and replantozems, as well as urbanized chernozems Calcic Chernozems (Technic). Natural soils of recreational areas are represented by migration-segregation chernozems Calcic Chernozems (Pachic). The study was carried out using atomic absorption spectrometry and X-ray fluorescence analysis to determine metal content. Soil structure was determined by the Savvinov method (dry sieving) (<0.25; 1–2; 3–5; 5–7; >10 mm). Statistical analysis of the Wilcoxon criterion for related samples was performed to identify relationships. The main objective of the study was to assess the heavy metal content in different size fractions of aggregates and the ability of structural fractions to accumulate zinc, copper, and lead. Structural aggregates of different sizes differ in their ability to accumulate zinc, copper and lead. Zinc, including its mobile compounds, is predominantly accumulated in microaggregates. The content of gross copper and especially lead is confined to larger aggregates. At the same time, mobile copper compounds are concentrated in microaggregates and in fractions larger than 10 mm. Mobile lead compounds are distributed in fractions of different sizes quite uniformly in all studied soils.

Keywords: heavy metals; soil aggregates; urban stratozems; chernozems; urban soils; anthropogenic pollution.

ВВЕДЕНИЕ

Стабильность городской среды опосредованно связана с устойчивостью почвенного покрова, который выполняет ряд экологических функций, обеспечивая рост и развитие зеленых насаждений, сорбируя соединения различных поллютантов, препятствуя таким образом загрязнению сопредельных сред, а также поддерживает условия для микробиологической активности и жизнедея-

тельности почвенных животных (Hong et al., 2022). А так как города исторически в основном являются центрами производственной деятельности, в почвенный покров вместе с побочными продуктами антропогенной деятельности проникают поллютанты различного генезиса. Такие элементы, как Zn, Pb, Cu, находясь в первом классе экологической опасности, являются наиболее распространенными компонентами-маркерами антропогенного воздействия (Горбов, Безуглова, 2020). Таким образом, изучение закономерностей изменения содержания и профильного перемещения цинка, свинца и меди дает возможность отслеживать изменения экологического состояния городских почв, а также оценивать степень антропогенной трансформации естественных почв (Горбов и др., 2015; Безуглова и др. 2012).

Важным почвенным свойством особенно в условиях городской среды является состояние структурных агрегатов. Структура определяет фильтрационные свойства грунтов, и, как следствие, опосредованно влияет на миграцию элементов в почвенном профиле (Холодов и др., 2019; Тагивердиев и др., 2021; Luan et al., 2022; Peng et al., 2022). Структура почвы участвует в формировании водно-воздушного, температурного режимов, плотности сложения (Chen et al., 2014; Dvornikov et al., 2021). Имеются работы, указывающие на то, что структурное состояние почв влияет на эмиссию углерода и азота (Yazdanpanah et al., 2016). Так, например, установлено, что с уменьшением диаметра агрегатов сокращается эмиссия молекулярного азота и возрастает доля промежуточных продуктов денитрификации (Степанов, 2000). Однако структурное состояние урбопочв мало изучается с точки зрения фактора, влияющего на депонирование и миграцию химических элементов и, в частности, тяжелых металлов. Чаще данный показатель рассматривается как показатель деградации физических свойств (Zheng et al., 2022), на которые помимо естественных процессов структурообразования накладывают отпечаток антропогенные воздействия.

Установлено, что деградация структуры в почвах городов происходит за счет привнесения не склонных к агрегации субстратов, таких как, например, песок, гравий, обломки стекла, керамики. Негативно влияет на структуру почвы и механическое разру-

шение, уплотнение, сведение естественных растительных ассоциаций и сниженный привнос растительного опада, замена микробиологических сообществ на патогенные (Chen et al., 2014; Dvornikov et al., 2021). Структурное состояние почв тесно связано с органическим веществом, которое действует как “клей”, способствующий сцеплению частиц в агрегаты. И, как следствие, трансформация органического вещества под воздействием антропогенных процессов приводит к изменению процессов формирования и стабилизации почвенных агрегатов. Несмотря на выполняемые функции, роль структуры в экологических процессах городской экосистемы/среды недооценивается. А значит и изучение влияния структуры агрегатов на распределение и накопление тяжелых металлов в профиле городских почв является перспективным направлением в урбопочвоведении.

Целью нашего исследования являлось определение способности к депонированию цинка, меди и свинца агрегатами различных размерных фракций черноземов миграционно-сегрегационных под естественными травянистыми фитоценозами и урбостратоземов на черноземах. А также оценка содержания тяжелых металлов в разных размерных фракциях агрегатов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводили в Ростовской агломерации. Почвообразующими породами на данной территории чаще всего выступают четвертичные отложения, представленные лёссовидными глинами и суглинками (Безуглова, Хырхырова, 2008).

Были исследованы черноземы миграционно-сегрегационные (Шишов и др., 2004) под естественными травянистыми фитоценозами и урбостратоземы на черноземах. Профили данных почв имеют вид AU-BCA-C и UR-[AU]-[BCA]-[C] соответственно (Прокофьева и др., 2014). Где AU – это темногумусовые горизонты; BCA – аккумулятивно-карбонатные, а C – почвообразующая порода, их погребенными аналогами являются горизонты [AU], [BCA], [C]. Почвообразующую породу в данном исследовании не изучали. Всего было заложено 8 разрезов, изучено 42 почвенных горизонта, отобрано 210 образцов с учетом деления на фракции.

Отобранные в полевых условиях образцы сушили до воздушно-сухого состояния, затем рассеивали в колонке сит по методу Саввинова (сухое просеивание) (Вадюнина, Корчагина, 1986). Отдельные фракции агрегатов (<0.25 ; 1–2; 3–5; 5–7; <10 мм) отбирали для дальнейшего определения в них содержания цинка, меди и свинца. Выбор фракций обоснован структурным состоянием изучаемых черноземов и его трансформацией в результате урбопедогенеза. Так, в предыдущих работах было показано, что в черноземах преобладают фракции 2–1, 5–3 и >10 мм, а в результате антропогенного воздействия максимумы смещаются в сторону содержания фракций размерностью <0.25 ; 7–5 мм (Тагивердиев и др., 2021).

После пробоподготовки в образцах почв определяли цинк, медь, свинец методом рентгенфлуоресцентной спектрометрии на приборе МАКС-GVM (ГОСТ 33850-2016).

Подвижные формы цинка, меди и свинца определяли в азотнокислых вытяжках (1н HNO_3) атомно-абсорбционным методом на приборе МГА-915.

Статистический анализ включал в себя расчет и оценку критерия Вилкоксона для связанных выборок, среди различных размерных фракций агрегатов для выявления достоверных различий в содержании цинка, меди и свинца. Данный критерий позволяет сравнивать разные горизонты. Благодаря этому можно получить общие закономерности в распределении изучаемых показателей, как по профилю, так и между черноземами и урбостратоземами.

Оценка содержания тяжелых металлов производилась в соответствии с нормативом СанПин 1.2.3685-21, который определяет предельно допустимые концентрации ПДК и ориентировочно допустимые концентрации ОДК в почвах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего необходимо отметить, что медианы и средне-статистические значения валового содержания всех трех элементов практически совпадают, что свидетельствует о подчинении этих рядов закону нормального распределения (рис. 1А), в то время как в урбостратоземах наблюдается иная картина (рис. 1Б).

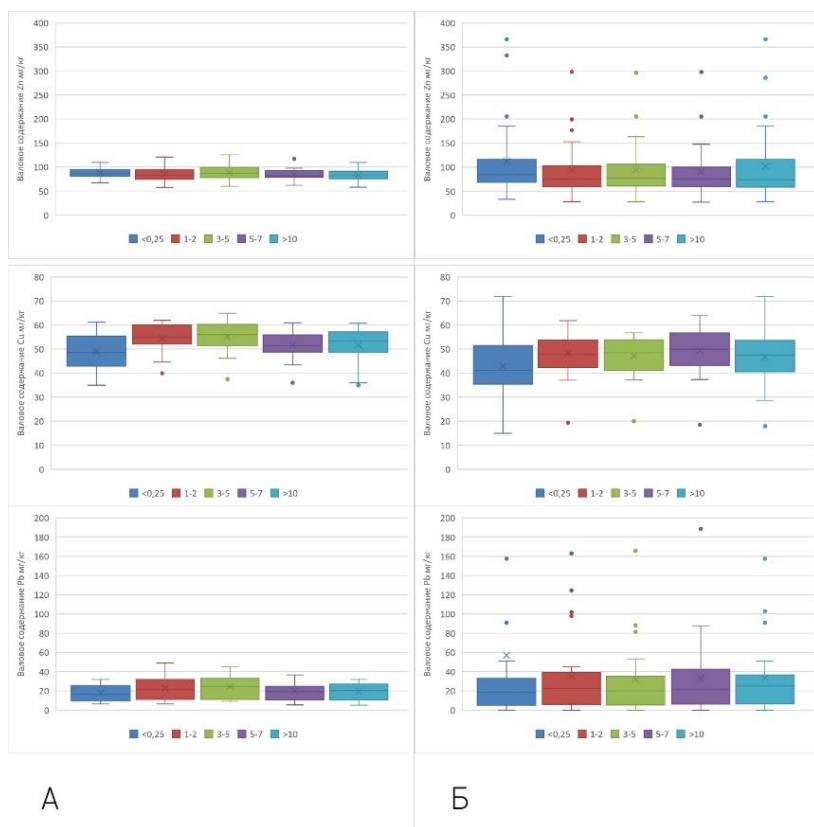


Рис. 1. Валовое содержание цинка, меди и свинца в различных фракциях агрегатов: **А** – выборка черноземов; **Б** – выборка урбостратоземов.

Fig. 1. Total content of zinc, copper and lead in different fractions of aggregates: **A** – sample of chernozems; **B** – sample of urban stratozems.

Если для меди значения этих двух статистических показателей также совпадают, то по цинку и свинцу наблюдается превышение средних значений над медианой, положительная асимметрия свидетельствует об антропогенном характере накоплений, причем более заметная разница фиксируется и для цинка, и для свинца в микроагрегатах и в глыбистых отдельностях.

Медианы валового содержания цинка в черноземах (рис. 1А) всех агрегатных фракций выше таковых в урбостратозе-

мах (рис. 1Б). При этом более высокие средние значения наблюдаются в выборках урбостратоземов, что связано с наличием нескольких горизонтов, содержание цинка в которых, по разным агрегатным фракциям, находится в диапазоне 200–366 мг/кг. Высокий размах в выборках урбостратоземов также обусловлен антропогенным воздействием: высокая неоднородность свойств – характерная черта урбостратоземов (Прокофьева и др., 2014). Экстремумы, как минимальные, так и максимальные, во всех агрегатных фракциях также выше в урбостратоземах.

Медианы и средние значения валового содержания меди выше в черноземах относительно урбостратоземов. Минимумы ниже в выборках урбостратоземов, максимумы выше для этих же почв в агрегатных фракциях <0.25; 5–7; >10 мм. Нужно отметить, что имеется тренд на уменьшение валового содержания меди в ходе урбопедогенеза в Ростове-на-Дону. Причиной, возможно, является привнос песка (Тагивердиев, 2020), который приводит к разбавлению естественной концентрации. С другой стороны, более высокое содержание меди в черноземах может быть обусловлено обработкой древесных насаждений медьсодержащими фунгицидами, так как часть разрезов была заложена в искусственных древесных насаждениях – лесополосах, питомниках сосны и лиственных деревьев.

Для свинца средние значения выше в урбостратоземах, в целом, как и медианы, кроме фракции 3–5 мм. Минимумы содержания свинца во всех фракциях урбостратоземов составляют 0 мг/кг, чего не наблюдается в черноземах. Максимумы выше в урбостратоземах за исключением фракции 1–2 мм. В выборках урбостратоземов отмечается большое количество выбросов, среди которых имеется даже точка с содержанием свинца до 715 мг/кг (не отображена на графике). В целом распределение валового свинца в агрегатных фракциях этого горизонта представляется очень интересным, его содержание составляет 715, 124, 90, 75, 46 мг/кг, возрастающая с увеличением размера фракции.

Отмечается отсутствие превышений ОДК во всех выборках черноземов по всем элементам. Среди урбостратоземов превышение ОДК имеется в одном горизонте по цинку, где загрязнение фиксируется во всех агрегатных фракциях. Загрязнение по свинцу

наблюдается в двух горизонтах, один из которых загрязнен по всем агрегатным фракциям, другой – только во фракциях <0.25 и >10 мм.

Содержание подвижных форм изученных элементов по агрегатным фракциям представлено на рисунке 2.

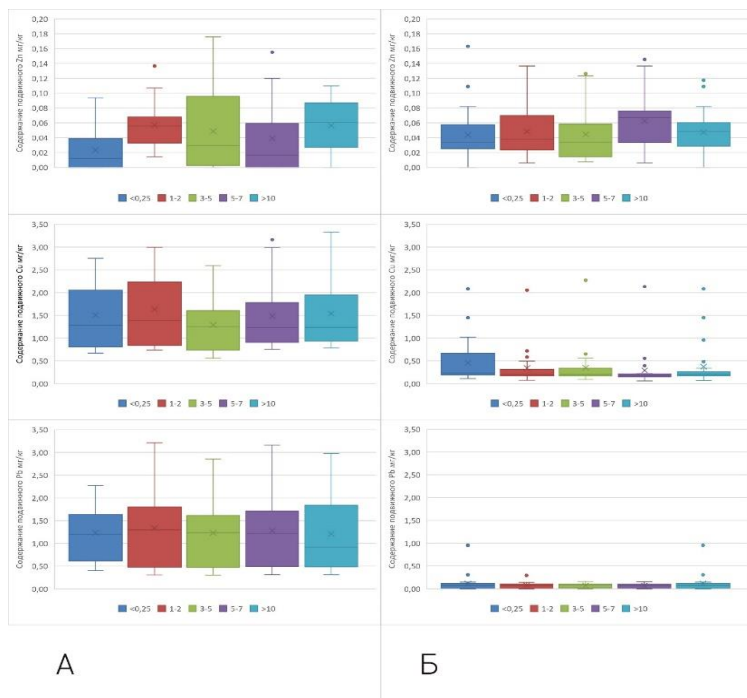


Рис. 2. Содержание подвижных соединений цинка, меди и свинца в различных фракциях агрегатов: **А** – выборка черноземов; **Б** – выборка урбостратоземов.

Fig. 2. Content of mobile compounds of zinc, copper, and lead in different fractions of aggregates: **A** – sample of chernozems; **B** – sample of urban stratozems.

Содержание подвижного цинка в выборках черноземов и урбостратоземов сопоставимо. Содержание подвижной меди значительно меньше в выборках урбостратоземов. Такая же законо-

мерность прослеживается и для свинца. Однако в случае меди это обосновано привнесом в почвы песчаных частиц, а в случае свинца добавляется фактор связывания металла в неподвижные соединения. Содержания подвижных форм цинка и свинца не превышают ПДК. Содержание подвижной меди превышено в трех образцах из черноземов во фракциях размерностью 5–7 и >10 мм.

Чтобы изучить депонирование валовых форм цинка, меди и свинца провели анализ критерия Вилкоксона для связанных выборок в черноземах и урбостратоземах (табл. 1).

Таблица 1. Критерий Вилкоксона для связанных выборок между различными размерными фракциями агрегатов по валовому содержанию Zn, Cu, Pb n = 20; p = 0.05 (+ наличие достоверных различий; - отсутствие достоверных различий)

Table 1. Wilcoxon criterion for related samples between different size fractions of aggregates by gross content of Zn, Cu, Pb n = 20; p = 0.05 (+ presence of reliable differences; - absence of reliable differences)

Пара сравнения	Черноземы			Урбостратоземы		
	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu	Pb
<0.25 мм / 1–2 мм	-	+	+	+	+	+
<0.25 мм / 3–5 мм	-	+	+	+	+	-
<0.25 мм / 5–7 мм	-	-	+	+	+	-
<0.25 мм / >10 мм	+	-	+	+	+	+
1–2 мм / 3–5 мм	+	-	-	+	-	+
1–2 мм / 5–7 мм	-	+	+	+	-	-
1–2 мм / >10 мм	+	+	+	+	+	+
3–5 мм / 5–7 мм	+	+	+	+	+	-
3–5 мм / >10 мм	+	+	+	+	-	+
5–7 мм / >10 мм	+	+	+	+	+	+

Распределение цинка в размерных фракциях агрегатов черноземов можно представить в виде ряда: (>10) < 5–7 ≤ 1–2 ≤ (<0.25) ≤ 3–5 мм (табл. 1). Минимальные значения приходятся на

крупные фракции <10 и 5–7 мм, мелкие фракции более однородны в отношении содержания цинка. Однако уже в урбостратоземах содержание цинка приобретает строгую закономерность, фракции агрегатов выстраиваются в убывающий по этому показателю ряд: (>10) < 5–7 < 1–2 < 3–5 < (<0.25) мм. Следует отметить, что указанные ряды в черноземах и урбостратоземах в целом можно считать одинаковыми. Таким образом отмечается максимальное концентрирование цинка во фракциях <0.25 и 3–5 мм как в черноземах, так и в урбостратоземах. Обусловлено это тем, что в этих фракциях концентрируется органическое вещество (Тагивердиев и др., 2022), а цинк образует с гумусовыми кислотами комплексно-гетерополярные соединения и адсорбционные комплексы (Baier et al., 2022). Из таблицы 1 и рисунка 1 также следует, что с усилением загрязнения цинком все пары сравнений показывают достоверные различия, т. е. закономерность усиливается, что также обусловлено связыванием загрязняющих веществ органическим веществом. К агрегатам размером менее 0.25 мм приурочено и максимальное содержание неорганического углерода, представленного в почвах региона карбонатами. Цинк, как известно, образует труднорастворимые соединения с карбонатами.

Урбопедогенез изученных почв сопровождается небольшим снижением валового содержания меди. Валовое количество меди распределяется по фракциям агрегатов в черноземах, составляя возрастающий ряд: (<0.25) ≤ 5–7 < (>10) < 1–2 ≤ 3–5 мм, в урбостратоземах ряд имеет похожий вид: <0.25 < (>10) < 1–2 ≤ 3–5 ≤ 5–7 мм (табл. 1). Пылеватые агрегаты (<0.25 мм) характеризуются наименьшим содержанием этого металла. Максимумы характерны для фракций 1–2; 3–5 мм в черноземах и 3–5, 5–7 мм – в урбостратоземах. Похожие данные получены в работе Wang и др. (2016), где отмечено наибольшее концентрирование меди в агрегатах размерностью 1–2 мм.

Похожая ситуация и со свинцом. Распределение валового содержания свинца в размерных фракциях агрегатов черноземов имеет вид: (<0.25) < 5–7 < (>10) < 3–5 ≤ 1–2 мм; для урбостратоземов: (<0,25) < 3–5 ≤ 5–7 < 1–2 < (>10) мм (табл. 1). Как и с медью, минимальное содержание свинца приходится на фракцию

<0.25 мм. Максимумы в черноземах приурочены к фракции 1–2, 3–5 мм, а в урбостратоземах – к фракции >10 мм.

Вероятно, существует механизм, при котором свинец по достижении некоторой критической концентрации начинает замещать поглощенный Ca^{2+} (Понизовский, Мироненко, 2001), что в сумме с трансформацией микробиологических сообществ (Мосина и др. 2012) приводит к деградации структуры. Это подтверждается данными рисунка 1, где показано, что среднее содержание свинца во фракции <0.25 мм для урбостратоземов самое высокое среди остальных фракций и составляет 57 мг/кг. Иными словами, есть единичные случаи критических концентраций, которые разрушают агрегаты до фракции <0.25 мм. Учитывая, что выборка с содержанием свинца в указанной фракции неоднородна и имеются горизонты как с высоким, так и с низким содержанием Pb, целостность закономерностей, при которых в одних фракциях содержание элемента больше, нарушается и анализ связанных выборок Вилкоксона в урбостратоземах показывает отсутствие достоверных различий в парах сравнений <0.25 и 3–5 мм; <0.25 и 5–7 мм. Также в урбостратоземах высокую сорбцию свинца во фракции >10 мм можно связать с тем, что свинец мигрирует преимущественно в твердом состоянии в виде достаточно крупных частиц (Понизовский, Мироненко, 2001; Kelly et al., 1996; Li et al., 2001; Chen et al., 2005; Duzgoren-Aydin et al., 2006; Крестьянникова и др., 2015), которые способны задерживаться только в макропорах, присущих более крупным агрегатам.

Подвижные формы цинка, меди и свинца статистически анализировали сообразно валовому содержанию (табл. 2). Фракции агрегатов по содержанию подвижных форм цинка в черноземах можно выстроить в ряд: $(<0,25) \leq 5-7 \leq 3-5 \leq 1-2 < (>10)$ мм, а для урбостратоземов ряд несколько иной: $(<0,25) \leq 3-5 \leq 1-2 \leq (>10) \leq 5-7$ мм. Минимальные значения подвижного цинка приходятся на фракции <0.25 мм, при этом валовое содержание цинка в этой фракции наибольшее, что говорит о высокой роли данной структурной фракции в локализации и связывании цинка, нейтрализующей его токсическое действие. Однако высокое содержание данной фракции в почвах уменьшает противозерозионную стойкость почвы (Шеин, 2005), что объективно может способствовать

опосредованному загрязнению сопредельных сред. Напротив, наибольшее содержание подвижных форм цинка приурочено к фракции >10 мм, в которой валовое количество этого металла минимальное.

Таблица 2. Критерий Вилкоксона для связанных выборок между различными структурными фракциями по содержанию подвижных форм Zn, Cu, Pb n = 20; p = 0.05 (+ наличие достоверных различий; - отсутствие достоверных различий)

Table 2. Wilcoxon criterion for connected samples between different structural fractions by the content of mobile forms of Zn, Cu, Pb n = 20; p = 0.05 (+ presence of reliable differences; - absence of reliable differences)

Пара сравнения	Черноземы			Урбостратоземы		
	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu	Pb
<0.25 мм / 1–2 мм	+	+	-	-	+	+
<0.25 мм / 3–5 мм	-	+	-	-	+	-
<0.25 мм / 5–7 мм	+	-	-	+	+	+
<0.25 мм / >10 мм	+	-	-	+	+	-
1–2 мм / 3–5 мм	-	+	+	-	-	-
1–2 мм / 5–7 мм	-	-	-	+	+	-
1–2 мм / >10 мм	+	-	-	-	-	-
3–5 мм / 5–7 мм	-	+	-	+	+	-
3–5 мм / >10 мм	+	+	-	+	-	-
5–7 мм / >10 мм	+	+	-	+	-	-

Структурные фракции по содержанию подвижных форм меди в черноземах можно выстроить в ряд: 5–7 < 3–5 < (<0.25) ≤ (>10) ≤ 1–2 мм; для урбостратоземов: 5–7 < 1–2 ≤ 3–5 ≤ (>10) < (<0.25) мм. Фракция 5–7 мм характеризуется минимальным содержанием меди и в урбостратоземах, и в черноземах. В целом содержание подвижной меди ниже в урбостратоземах, чем в черноземах.

Структурные фракции по содержанию подвижных форм свинца в черноземах можно выстроить в ряд: $(>10) < (<0.25) < 5-7 \leq 3-5 \leq 1-2$ мм; для урбостратоземов: $5-7 < 1-2 \leq (>10) < (<0.25) < 3-5$ мм. Свинец – единственный из изученных металлов имеет различные фракции с минимальным его содержанием для подвижной формы в черноземах и урбостратоземах. Распределение подвижного свинца по фракциям довольно однородное как в черноземах, так и в урбостратоземах. Медианы и большинство средних значений из выборок в урбостратоземах отличаются лишь в 0.001 и 0.0001 долях, при этом анализ Вилкоксона свидетельствует о достоверной значимости этих различий. В целом содержание подвижных форм свинца гораздо выше в черноземах, чем в урбостратоземах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структурные агрегаты различной размерности различаются по способности к накоплению цинка, меди и свинца. Если цинк, включая его подвижные соединения, преимущественно накапливается в микроагрегатах, то валовое количество меди и особенно свинца приурочено к более крупным агрегатам. В то же время подвижные соединения меди сосредотачиваются в микроагрегатах и во фракции размерностью более 10 мм. Подвижные соединения свинца распределяются по фракциям разной размерности довольно равномерно во всех изученных почвах.

Отмеченные закономерности обусловлены разной способностью изученных металлов образовывать соединения с гумусовыми веществами, а также различиями в свойствах соединений металлов, поступающих из материнской породы и имеющих антропогенное происхождение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безуглова О.С., Горбов С.Н., Морозов И.В., Невидомская Д.Г. Урбопочвоведение. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2012. 264 с.
2. Безуглова О.С., Тагивердиев С.С., Горбов С.Н. Физические характеристики городских почв Ростовской агломерации // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1153–1159.

3. *Безуглова О.С., Хырхырова М.М.* Почвы Ростовской области. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2008. 352 с.
4. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
5. *Горбов С.Н., Безуглова О.С.* Тяжелые металлы и радионуклиды в почвах Ростовской агломерации. Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2020. 124 с. DOI: [10.18522/801273349](https://doi.org/10.18522/801273349).
6. *Горбов С.Н., Безуглова О.С., Вардуни Т.В., Горовцов А.В., Тагивердиев С.С., Гильдебрант Ю.А.* Генотоксичность и загрязнение тяжелыми металлами естественных и антропогенно-измененных почв Ростова-на-Дону // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1519–1529.
7. ГОСТ 33850-2016. Почвы. Определение химического состава методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии, 2017.
8. *Крестьянникова Е.В., Козлова В.В., Ларина Н.С., Ларин С.И.* Химико-экологическая оценка загрязнения свинцом атмосферы города Тюмени // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 5(2). С. 679–684.
9. *Мосина Л.В., Довлетярова Э.А., Ефремова С.Ю., Норвосурэн Ж.* Экологическая опасность загрязнения почвы тяжелыми металлами (на примере свинца) // Известия ПГПУ им. В.Г. Белинского. 2012. № 29. С. 383–386.
10. *Понизовский А.А., МIRONENKO Е.В.* Механизмы поглощения свинца(п) почвами // Почвоведение. 2001. № 4. С. 418–429.
11. *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. 1155–1164. DOI: [10.7868/S0032180X14100104](https://doi.org/10.7868/S0032180X14100104).
12. СанПин 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. 2021
13. *Степанов А.Л.* Микробная трансформация азота в почвах: Дис. ... докт. биол. наук: 03.00.27, 03.00.07. М., 2000. 265 с.
14. *Тагивердиев С.С.* Влияние урбопедогенеза на морфологические и физические свойства почв Ростовской агломерации: Дис. ... канд. биол. наук: 03.02.13. Ростов-на-Дону, 2020. 206 с.
15. *Тагивердиев С.С., Безуглова О.С., Горбов С.Н., Сальник Н.В.* О локализации углерода в структурных фракциях черноземов и

урбостратоземов // Живые и биокосные системы. 2022. № 42. DOI: [10.18522/2308-9709-2022-42-6](https://doi.org/10.18522/2308-9709-2022-42-6).

16. Тагивердиев С.С., Безуглова О.С., Горбов С.Н., Скрипников П.Н., Козырев Д.А. Особенности агрегатного состава в связи с соотношением углерода органического вещества и карбонатов в почвах Ростовской агломерации // Почвоведение. 2021. № 9. С. 1–7. DOI: [10.31857/S0032180X21090124](https://doi.org/10.31857/S0032180X21090124).

17. Тагивердиев С.С., Скрипников П.Н., Безуглова О.С., Горбов С.Н., Козырев Д.А. Содержание и распределение органического и неорганического углерода в городских почвах Ростовской агломерации // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2020. № 4(208). С. 118–129. DOI: [10.18522/1026-2237-2020-4-118-129](https://doi.org/10.18522/1026-2237-2020-4-118-129).

18. Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиев А.Я., Лазарев В.И., Фрид А.С. Изменение соотношения фракций агрегатов в гумусовых горизонтах черноземов в различных условиях землепользования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 184–193. DOI: [10.1134/S0032180X19020060](https://doi.org/10.1134/S0032180X19020060).

19. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.

20. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

21. Bauer T.V., Pinski D.L., Minkina T.M., Shuvaeva V.A., Soldatov A.V., Mandzhieva S.S., Tsitsuashvili V.S., Nevidomskaya D.G., Semenov I.N. Application of XAFS and XRD methods for describing the copper and zinc adsorption characteristics in hydromorphic soils // Environmental Geochemistry and Health. 2022. Vol. 44. No. 2. P. 335–347. DOI: [10.1007/s10653-020-00773-2](https://doi.org/10.1007/s10653-020-00773-2).

22. Chen J., He F., Zhang X., Sun X., Zheng J., Zheng J. Heavy metal pollution decreases microbial abundance, diversity and activity within particle-size fractions of a paddy soil // FEMS Microbiology Ecology. 2014. No. 87(1). P. 164–181. DOI: [10.1111/1574-6941.12212](https://doi.org/10.1111/1574-6941.12212).

23. Chen T.B., Zheng Y., Lei M., Huang Z., Wu H., Chen H., Fan K., Yu K., Wu X., Tian Q. Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China // Chemosphere. 2005. No. 60. P. 542e551. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2004.12.072](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.12.072).

24. Duzgoren-Aydin N.S., Wong C.S.C., Aydin A., Song Z., You M., Li X.D. Heavy metal contamination and distribution in the urban environment of Guangzhou, SE China // Environmental Geochemistry and Health. 2006. No. 28. P. 375–391. DOI: [10.1007/s10653-005-9036-7](https://doi.org/10.1007/s10653-005-9036-7).

25. *Dvornikov Y.A., Vasenev V.I., Romzaykina O.N., Grigorieva V.E., Litvinov Y.A., Gorbov S.N., Dolgikh A.V., Korneykova M.V., Gosse D.D.* Projecting the urbanization effect on soil organic carbon stocks in polar and steppe areas of European Russia by remote sensing // *Geoderma*. 2021. No. 399. P. 115039. DOI: [10.1016/j.geoderma.2021.115039](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115039).
26. *Hong E.Y., Wan Z., Kim Y., Yu J.* Submerged zone and vegetation drive distribution of heavy metal fractions and microbial community structure: Insights into stormwater biofiltration system // *Science of the Total Environment*. 2022. No. 853. P. 158367. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.158367](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158367).
27. *Kelly J., Thornton I., Simpson P.R.* Urban Geochemistry: a study of the influence of anthropogenic activity on the heavy metal content of soils in traditionally industrial and non-industrial areas of Britain // *Applied Geochemistry*. 1996. No. 11. P. 363e370. DOI: [10.1016/0883-2927\(95\)00084-4](https://doi.org/10.1016/0883-2927(95)00084-4).
28. *Li X.D., Poon C.S., Liu P.S.* Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong // *Applied Geochemistry*. 2001. No. 16. P. 1361e1368. DOI: [10.1016/S0883-2927\(01\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00045-2).
29. *Luan H., Zhang X., Liu Y., Huang S., Chen J., Guo T., Liu Y., Guo S., Qi G.* The microbial-driven C dynamics within soil aggregates in walnut orchards of different ages based on microbial biomarkers analysis // *Catena*. 2022. No. 211. P. 105999. DOI: [10.1016/j.catena.2021.105999](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105999).
30. *Peng J., Wu X., Ni S., Wang J., Song Y., Cai C.* Investigating intra-aggregate microstructure characteristics and influencing factors of six soil types along a climatic gradient // *Catena*. 2022. No. 210. P. 105867. DOI: [10.1016/j.catena.2021.105867](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105867).
31. *Wang Q.Y., Hu B., Yu H.W.* Adsorption behaviors of fungicide-derived copper onto various size fractions of aggregates from orchard soil // *Environ Sci Pollut Res Int*. 2016. No. 23. P. 24983–24990. DOI: [10.1007/s11356-016-7743-5](https://doi.org/10.1007/s11356-016-7743-5).
32. *Yazdanpanah N., Mahmoodabadi M., Cerdà A.* The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands // *Geoderma*. 2016. No. 266. P. 58–65. DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.11.032](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.032).
33. *Zheng Y., Li S., Zhou W., Fan Z., Du T., Qu B., Sun X.* Soil erodibility after the removal of wood chip mulch: A wind tunnel experiment // *Journal of Soil and Water Conservation*. 2022. No. 77(5). P. 493–500. DOI: [10.2489/JSWC.2022.00125](https://doi.org/10.2489/JSWC.2022.00125).

REFERENCES

1. Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Morozov I.V., Nevidomskaya D.G., *Urbopochvovedenie* (Urban soil science), Rostov-na-Donu: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2012, 264 p.
2. Bezuglova O.S., Tagiverdiev S.S., Gorbov S.N., Fizicheskie kharakteristiki gorodskikh pochv Rostovskoi aglomeratsii (Physical characteristics of urban soils of Rostov agglomeration), *Pochvovedenie*, 2018, No. 9, pp. 1153–1159.
3. Bezuglova O.S., Khyrkyrova M.M., *Pochvy Rostovskoi oblasti* (Soils of the Rostov region), Rostov-na-Donu: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2008, 352 p.
4. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* (Methods of research of physical properties of soils), Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.
5. Gorbov S.N., Bezuglova O.S., *Tyazhelye metally i radionuklidy v pochvakh Rostovskoi aglomeratsii* (Heavy metals and radionuclides in soils of Rostov agglomeration), Rostov-na-Donu – Taganrog: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2020, 124 p., DOI: [10.18522/801273349](https://doi.org/10.18522/801273349).
6. Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Varduni T.V., Gorovtsov A.V., Tagiverdiev S.S., Gil'debrant Yu.A., Genotoksichnost' i zagryaznenie tyazhelymi metallami estestvennykh i antropogenno-izmenennykh pochv Rostova-na-donu (Genotoxicity and heavy metal pollution of natural and anthropogenically modified soils of Rostov-on-Don), *Pochvovedenie*, 2015, No. 12, pp. 1519–1529.
7. GOST 33850-2016. Soils. Determination of chemical composition by X-Ray fluorescence spectrometry, 2017
8. Krest'yannikova E.V., Kozlova V.V., Larina N.S., Larin S.I., Khimiko-ekologicheskaya otsenka zagryazneniya svintsom atmosfery goroda Tyumeni (Chemical and ecological assessment of lead pollution of the Tyumen city atmosphere), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2015, Vol. 17, No. 5(2), pp. 679–684.
9. Mosina L.V., Dovletyarova E.A., Efremova S.Yu., Norvosuren Zh., Ekologicheskaya opasnost' zagryazneniya pochvy tyazhelymi metallami (na primere svintsa) (Ecological Hazard of Soil Pollution by Heavy Metals (Lead as an Example)), *Izvestiya PGPU im. V.G. Belinskogo*, 2012, No. 29, pp. 383–386.
10. Ponizovskii A.A., Mironenko E.V., Mekhanizmy pogloshcheniya svintsa(p) pochvami (Mechanisms of lead(p) absorption by soils), *Pochvovedenie*, 2001, No. 4, pp. 418–429.
11. Prokof'eva T.V., Gerasimova M.I., Bezuglova O.S., Bakhmatova K.A., Gol'eva A.A., Gorbov S.N., Zharikova E.A., Matinyan N.N., Nakvasina E.N.,

Sivtseva N.E., Vvedenie pochv i pochvopodobnykh obrazovaniy gorodskikh territorii v klassifikatsiyu pochv Rossii (Addition of soils and soil-like formations of urban areas into the classification of soils in Russia), *Pochvovedenie*, 2014, No. 10, pp. 1155–1164, DOI: [10.7868/S0032180X14100104](https://doi.org/10.7868/S0032180X14100104).

12. SanPin 1.2.3685-21. Hygienic norms and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness of habitat factors for humans, 2021.

13. Stepanov A.L., *Mikrobnaya transformatsiya zakisi azota v pochvakh: Dis. ... dokt. biol. nauk* (Microbial transformation of nitrous oxide in soils: Dr. Biol. Sci. thesis), Moscow, 2000, 265 p.

14. Tagiverdiev S.S., *Vliyanie urbopedogeneza na morfologicheskie i fizicheskie svoystva pochv Rostovskoi aglomeratsii: Dis. ... kand. biol. nauk* (Influence of urban pedogenesis on morphological and physical properties of soils of the Rostov agglomeration: Candidate of Biol. Sci. thesis), Rostov-na-Donu, 2020, 206 p.

15. Tagiverdiev S.S., Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Sal'nik N.V., O lokalizatsii ugleroda v strukturnykh fraktsiyakh chernozemov i urbostratozemov (About localisation of carbon in structural fractions of chernozems and urban stratozems), *Zhivye i biokosnye sistemy*, 2022, No. 42, DOI: [10.18522/2308-9709-2022-42-6](https://doi.org/10.18522/2308-9709-2022-42-6).

16. Tagiverdiev S.S., Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Skripnikov P.N., Kozyrev D.A., Osobennosti agregatnogo sostava v svyazi s sootnosheniem ugleroda organicheskogo veshchestva i karbonatov v pochvakh Rostovskoi aglomeratsii (Features of aggregate composition in connection with the ratio of carbon of organic matter and carbonates in soils of Rostov agglomeration), *Pochvovedenie*, 2021, No. 9, pp. 1–7, DOI: [10.31857/S0032180X21090124](https://doi.org/10.31857/S0032180X21090124).

17. Tagiverdiev S.S., Skripnikov P.N., Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Kozyrev D.A., Soderzhanie i raspredelenie organicheskogo i neorganicheskogo ugleroda v gorodskikh pochvakh Rostovskoi aglomeratsii (Content and distribution of organic and inorganic carbon in urban soils of Rostov agglomeration), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennye nauki*, 2020, No. 4(208), pp. 118–129, DOI: [10.18522/1026-2237-2020-4-118-129](https://doi.org/10.18522/1026-2237-2020-4-118-129).

18. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Farkhodov Yu.R., Belobrov V.P., Yudin S.A., Aidiev A.Ya., Lazarev V.I., Frid A.S., Izmenenie sootnosheniya fraktsii agregatov v gumusovykh gorizontakh chernozemov v razlichnykh usloviyakh zemlepol'zovaniya (Changes in the ratio of aggregate fractions in humus horizons of chernozems under different land use conditions), *Pochvovedenie*, 2019, No. 2, pp. 184–193, DOI: [10.1134/S0032180X19020060](https://doi.org/10.1134/S0032180X19020060).

19. Shein E.V., *Kurs fiziki pochv* (Soil physics course), Moscow: Izd-vo

MGU, 2005, 432 p.

20. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of soils in Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.

21. Bauer T.V., Pinskii D.L., Minkina T.M., Shuvaeva V.A., Soldatov A.V., Mandzhieva S.S., Tsitsuashvili V.S., Nevidomskaya D.G., Semenov I.N., Application of XAFS and XRD methods for describing the copper and zinc adsorption characteristics in hydromorphic soils, *Environmental Geochemistry and Health*, 2022, Vol. 44, No. 2, pp. 335–347, DOI: [10.1007/s10653-020-00773-2](https://doi.org/10.1007/s10653-020-00773-2).

22. Chen J., He F., Zhang X., Sun X., Zheng J., Zheng J., Heavy metal pollution decreases microbial abundance, diversity and activity within particle-size fractions of a paddy soil, *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, No. 87(1), pp. 164–181, DOI: [10.1111/1574-6941.12212](https://doi.org/10.1111/1574-6941.12212).

23. Chen T.B., Zheng Y., Lei M., Huang Z., Wu H., Chen H., Fan K., Yu K., Wu X., Tian Q., Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China, *Chemosphere*, 2005, No. 60, pp. 542e551, DOI: [10.1016/j.chemosphere.2004.12.072](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.12.072).

24. Duzgoren-Aydin N.S., Wong C.S.C., Aydin A., Song Z., You M., Li X.D., Heavy metal contamination and distribution in the urban environment of Guangzhou, SE China, *Environmental Geochemistry and Health*, 2006, No. 28, pp. 375–391, DOI: [10.1007/s10653-005-9036-7](https://doi.org/10.1007/s10653-005-9036-7).

25. Dvornikov Y.A., Vasenev V.I., Romzaykina O.N., Grigorieva V.E., Litvinov Y.A., Gorbov S.N., Dolgikh A.V., Korneykova M.V., Gosse D.D., Projecting the urbanization effect on soil organic carbon stocks in polar and steppe areas of European Russia by remote sensing, *Geoderma*, 2021, No. 399, pp. 115039, DOI: [10.1016/j.geoderma.2021.115039](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115039).

26. Hong E.Y., Wan Z., Kim Y., Yu J., Submerged zone and vegetation drive distribution of heavy metal fractions and microbial community structure: Insights into stormwater biofiltration system, *Science of the Total Environment*, 2022, No. 853, pp. 158367, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.158367](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158367).

27. Kelly J., Thornton I., Simpson P.R., Urban Geochemistry: a study of the influence of anthropogenic activity on the heavy metal content of soils in traditionally industrial and non-industrial areas of Britain, *Applied Geochemistry*, 1996, No. 11, pp. 363e370, DOI: [10.1016/0883-2927\(95\)00084-4](https://doi.org/10.1016/0883-2927(95)00084-4).

28. Li X.D., Poon C.S., Liu P.S., Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong, *Applied Geochemistry*, 2001, No. 16, pp. 1361e1368, DOI: [10.1016/S0883-2927\(01\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00045-2).

29. Luan H., Zhang X., Liu Y., Huang S., Chen J., Guo T., Liu Y., Guo S.,

- Qi G., The microbial-driven C dynamics within soil aggregates in walnut orchards of different ages based on microbial biomarkers analysis, *Catena*, 2022, No. 211, pp. 105999, DOI: [10.1016/j.catena.2021.105999](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105999).
30. Peng J., Wu X., Ni S., Wang J., Song Y., Cai C., Investigating intra-aggregate microstructure characteristics and influencing factors of six soil types along a climatic gradient, *Catena*, 2022, No. 210, pp. 105867, DOI: [10.1016/j.catena.2021.105867](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105867).
31. Wang Q.Y., Hu B., Yu H.W., Adsorption behaviors of fungicide-derived copper onto various size fractions of aggregates from orchard soil, *Environ Sci Pollut Res Int*, 2016, No. 23, pp. 24983–24990, DOI: [10.1007/s11356-016-7743-5](https://doi.org/10.1007/s11356-016-7743-5).
32. Yazdanpanah N., Mahmoodabadi M., Cerdà A., The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands, *Geoderma*, 2016, No. 266, pp. 58–65, DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.11.032](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.032).
33. Zheng Y., Li S., Zhou W., Fan Z., Du T., Qu B., Sun X., Soil erodibility after the removal of wood chip mulch: A wind tunnel experiment, *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, No. 77(5), pp. 493–500, DOI: [10.2489/JSWC.2022.00125](https://doi.org/10.2489/JSWC.2022.00125).