

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ  
И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.416.9;547.6;614.76;632.15;631.417.7

ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ И МЕТАЛЛОИДЫ В ПОЧВАХ, ДОРОЖНОЙ ПЫЛИ  
И ИХ ФРАКЦИИ  $PM_{10}$  В СЕВАСТОПОЛЕ: УРОВНИ, ИСТОЧНИКИ  
И ОПАСНОСТЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ<sup>1</sup>

© 2022 г. Л. А. Безбердая<sup>а, \*</sup>, Н. С. Касимов<sup>а</sup>, О. В. Черницова<sup>а</sup>,  
А. Н. Ткаченко<sup>а</sup>, М. Ю. Лычагин<sup>а</sup>

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

\*e-mail: lilia\_8888@mail.ru

Поступила в редакцию 11.07.2022 г.

После доработки 03.08.2022 г.

Принята к публикации 12.08.2022 г.

Впервые в крупном промышленно-рекреационном г. Севастополь установлены уровни накопления, пространственное распределение и источники тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) в городских почвах, дорожной пыли и их частицах  $PM_{10}$  (диаметром <10 мкм) в различных функциональных зонах и на разных типах дорог. Анализ содержания ТММ проводили методами ICP-MS и ICP-AES. Основными загрязнителями городских почв и дорожной пыли являются Pb, Zn, Sb, Cd, Sn, Cu, Mo. Полученные результаты показали неравномерное пространственное распределение отдельных ТММ в пределах города из-за влияния терригенных и антропогенных факторов. В частицах  $PM_{10}$  почв и пыли концентрации практически всех ТММ заметно больше общих содержаний, доля Zn, Bi, Cs составляет более 65% от общего содержания, а As, Pb, Sb, Cd, W, V, Ni, Co – около 50%. Наибольшую опасность представляют частицы  $PM_{10}$ , формирующие большее количество аномалий с экстремальным уровнем загрязнения ТММ в промышленных зонах и внутридворовых проездах селитебных зон.

**Ключевые слова:** частицы  $PM_{10}$ , загрязнение городских почв, гранулометрические фракции, обогащение, Urbic Technosols

**DOI:** 10.31857/S0032180X22600913

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы существенно возрастает рекреационное использование побережья Черного моря, что определяет актуальность изучения экологического состояния приморских городов [8, 9, 21]. В Крыму особое внимание привлекает Севастополь – крупный морской порт, важный промышленный и одновременно рекреационный центр [11, 29], на территории которого имеются разнообразные источники эмиссии, с которыми связано поступление в окружающую среду опасных загрязняющих веществ [20, 27, 28], в том числе тяжелых металлов и металлоидов (ТММ). Микрочастицы аэрозоля, загрязненные ТММ, при осадении из атмосферы аккумулируются в почвах, растениях, на поверхности зданий, сооружений, тротуаров, автомобильных дорог, ухудшая экологическое состояние городов и качество жизни как постоянных жителей, так и многочисленных отдыхающих [36, 38, 67].

Эколого-геохимическая оценка городской среды основывается на концепции депонирующих сред, в которых накапливаются и преобразуются продукты техногенеза [4]. Для выявления пространственных особенностей и геохимической индикации многолетнего загрязнения городских ландшафтов в качестве депонирующей среды обычно изучаются почвы [3, 55, 62]. В последние годы для индикации современного, в том числе сезонного загрязнения городов, используют дорожную пыль, состоящую из твердых частиц разного размера, выпадающих из атмосферы, выбросов промышленности и автотранспорта, загрязненных городских почв, а также твердофазного вещества противогололедных реагентов в зимний период [56, 71, 80]. Дорожная пыль стала важнейшим источником загрязнения атмосферного воздуха [35, 70, 81].

Повышенный интерес представляют мелкодисперсные взвешенные частицы диаметром <10 мкм [35, 38, 47], которые состоят из наиболее тонких фракций – ила (диаметром 0.001 мм и менее), мелкой и средней пыли (0.01 мм и менее). Для микрочастиц в разных компонентах ландшафтов: почвах, дорожной пыли, снеге, речной взвеси –

<sup>1</sup> Дополнительные материалы к этой статье доступны по doi 10.31857/S0032180X22600913 для авторизованных пользователей.

применяется единая система обозначения размерности – с помощью аббревиатуры РМ (particulate matter). Для населения опасность загрязнения почв и дорожной пыли связана с возможностью их выдувания, что увеличивает загрязненность атмосферы твердыми частицами [37, 60, 68], которые способны находиться во взвешенном состоянии продолжительное время и переноситься на сотни километров от источника воздействия [75]. Активность выдувания частиц и интенсивность накопления в них поллютантов обычно возрастает с уменьшением их размера [34, 53], что определяет важность исследования гранулометрического состава почв и пыли [32, 50]. Попадая в организм человека, частицы РМ<sub>10</sub> задерживаются в верхних дыхательных путях, повышая риск респираторных (астма, бронхит, пневмония), сердечно-сосудистых (инфаркт миокарда, инсульт, ишемическая болезнь сердца) и онкологических заболеваний [16, 23]. Повышенная опасность этих фракций связана с частым прилипанием к рукам и прохождением через слизистую оболочку желудка, а также с более эффективной адсорбцией в тканях человека [85].

Детальный анализ химического состава почв, дорожной пыли и их отдельных гранулометрических фракций делается во всем мире [34, 37, 54, 64, 69, 71, 84, 86]. В России подобные исследования проводили в Москве, Тюмени, Сургуте, Челябинске и других городах [10, 56–58, 66, 76], однако загрязнение мелких фракций почв и пыли оценивается редко [3, 9, 80], что связано со сложностью и трудоемкостью выделения частиц диаметром <20 мкм [59].

Значительный уровень техногенного воздействия в мегаполисах и крупных промышленных центрах обусловил большую изученность территорий по сравнению с относительно небольшими приморскими городами. Экологическое состояние городов Республики Крым и Севастополя изучено слабо [7, 29, 39]. В Севастополе осуществляется мониторинг содержания в почвах ограниченного числа ТММ [5]. Комплексная эколого-геохимическая оценка состояния почв для мониторинга многолетнего загрязнения и дорожной пыли для характеристики сезонного загрязнения не проводится. В Севастополе содержание поллютантов в микрочастицах разного размера ранее не изучалось, что затрудняет получение достоверной оценки экологической опасности загрязнения города. Настоящее исследование направлено на выявление особенностей накопления и источников ТММ в почвах, дорожной пыли и их фракциях РМ<sub>10</sub> в промышленно-рекреационном г. Севастополь.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Севастополь расположен на побережье Черного моря в юго-западной части Крымского п-ова в

пределах двух климатических поясов. В северной части города климат морской умеренно континентальный, ландшафты представлены ковыльно-типчаковой растительностью с фоновыми черноземами обыкновенными (Pachic Chernozems) на известняках [14]. На южном побережье Севастополя в условиях субтропического средиземноморского климата под можжевельно-дубовыми лесами формируются фоновые коричневые почвы (Cambisols). На большей части территории городов Крыма распространены антропогенно-преобразованные и сконструированные человеком антропогенные почвы, которые представлены в основном урбаноземами (Urbic Technosols) с нарушенным почвенным профилем, верхняя часть которого состоит из серовато-бурого гумусово-аккумулятивного горизонта с включением строительного и бытового мусора [22]. Средняя температура воздуха в феврале +2.6°C, июле +22.4°C [15]. Летом преобладают западные и северо-западные ветры, зимой – северо-восточные, приносящие холодный арктический воздух, в межсезонье – южные [1]. Рельеф города формируют глубокие балки и многочисленные бухты.

Территория Севастополя составляет 1080 км<sup>2</sup>, численность населения города – 522 тыс. человек [25]. На его территории размещены предприятия машиностроения и металлообработки, судостроения и судоремонта, нефтехимии и пищевой промышленности, строительных и лакокрасочных материалов. Севастопольский морской торговый порт обеспечивает перевозку и хранение песка, угля, нефтепродуктов, металлов и других грузов. Источниками загрязнения являются теплоэлектростанция и котельные, которые долгое время использовали уголь в качестве топлива. В атмосферный воздух Севастополя ежегодно поступает до 5 тыс. т загрязняющих веществ, с каждым годом объемы выбросов увеличиваются за счет роста мощности предприятий теплоэнергетики [5]. Значительную роль в загрязнении города играют полигоны твердых бытовых отходов, куда ежегодно поступает около 200 тыс. т отходов [5].

Севастополь – культурно-исторический и рекреационный город, куда ежегодно приезжает большое количество отдыхающих и туристов, что дает дополнительную нагрузку на окружающую среду за счет увеличения потока автотранспорта и частых затопов на дорогах. Значительный вклад в загрязнение городов вносит использование угля для отопления частных жилых домов, при сжигании которого в окружающую среду могут поступать ТММ и полициклические ароматические углеводороды.

Распределение источников загрязнения и формирование техногенных аномалий поллютантов определяется функциональным использованием городских территорий. По космическим сним-

кам Sentinel-2 и WorldView-2 в Севастополе выделены функциональные зоны с различными типами землепользования: промышленная, транспортная, селитебная с малоэтажной (до 2 этажей) и многоэтажной (3 этажа и выше) жилой застройкой, рекреационная, агрогенная и зона специального назначения (рис. S1). В транспортной зоне дороги разделены по ширине и интенсивности движения автотранспорта на крупные (3 полосы и более в одну сторону), средние (2 полосы) и малые (1 полоса и проезды во дворах).

Полевые исследования проводили в 2017 г. в рамках Крымской экспедиции Русского географического общества и МГУ им. М.В. Ломоносова. Геохимическую съемку городской территории осуществляли на основе методических рекомендаций “Urban geochemical mapping manual”, разработанных Международной экспертной группой ЕС по городской экогеохимии [41], она включала опробование по сетке с шагом 700–1000 м верхнего (0–10 см) слоя антропогенно-преобразованных почв. Дорожную пыль отбирали с поверхности крупных, средних и малых дорог пластиковыми щеткой и совком. Смешанные образцы почв и пыли состояли из 5 индивидуальных образцов, отобранных на расстоянии 5–10 м друг от друга. Во всех функциональных зонах и типах дорог отобрали 200 почвенных проб и 110 образцов дорожной пыли. Для оценки регионального почвенно-геохимического фона отобрали 10 образцов поверхностных горизонтов черноземов обыкновенных (Pachic Chernozems) на элювии и элюво-делювии известняков в 2 км к северо-востоку от Севастополя.

Образцы почв и дорожной пыли высушивали, отбирали корни растений и включения мусора. В Эколого-геохимическом центре МГУ в образцах почв и пыли потенциометрическим методом рН-метром “Эксперт-рН” (Россия) измеряли величину рН и кондуктометром SevenEasy S30 (MettlerToledo, Швейцария) удельную электропроводность (ЕС) при соотношении почва : вода 1 : 2.5. Содержание органического углерода ( $C_{орг}$ ) в почвах и дорожной пыли определяли методом Тюрина с титриметрическим окончанием [12], гранулометрический состав анализировали на лазерном гранулометре Fritsch (Германия). Для выделения гранулометрической фракции  $PM_{10}$  из почв и дорожной пыли проводили диспергирование образцов с помощью влажного растирания. Затем смесь переносили в стеклянный цилиндр объемом 1 л, наполненный дистиллированной водой и выделяли фракцию  $PM_{10}$  методом осаждения по закону Стокса [61, 63]. Полученные растворы фильтровали через мембранные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм. Содержание ТММ определяли в сертифицированной лаборатории Всероссийского исследовательского института

минерального сырья им. Н.М. Федоровского (г. Москва) масс-спектрометрией и атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS, ICP-AES).

Загрязнение фракции  $PM_{10}$  почв ТММ оценивали с помощью коэффициентов концентрации ( $K_c$ ) и рассеяния ( $K_p$ ):  $K_c = C_i/C_b$  и  $K_p = C_b/C_i$ , где  $C_i$  – содержание поллютанта в почвах или их фракции  $PM_{10}$  в городе, мг/кг;  $C_b$  – в фоновых почвах или их фракциях  $PM_{10}$ , мг/кг. Для дорожной пыли из-за отсутствия фонового аналога содержания элементов сравнивали с кларками верхней части континентальной земной коры, рассчитывали кларки концентрации ( $KK$ ) и рассеяния ( $KP$ ):  $KK = C_i/K$ ,  $KP = K/C_i$ , где  $C_i$  – содержание элемента в дорожной пыли или ее фракции  $PM_{10}$ , мг/кг,  $K$  – кларк элемента [73].

Для характеристики фракционного состава почв и дорожной пыли, то есть доли ТММ во фракциях  $PM_{10}$  относительно общего содержания использовали уравнение [33]:  $D_{10} = (C_{10}P_{10}/C \times 100)$  100, где  $C_{10}$  – концентрация ТММ в  $PM_{10}$  почв или пыли, мг/кг;  $P$  – доля фракции  $PM_{10}$  в пыли или почвах, %;  $C$  – концентрация ТММ в почве или дорожной пыли, мг/кг. Интенсивность накопления поллютантов в частицах  $PM_{10}$  относительно общего (валового) содержания определяли с помощью показателя  $D_x = C_{фракция}/C_{вал}$ .

Поступление ТММ в почвы, пыль и их фракции  $PM_{10}$  от природных и антропогенных источников оценивали с помощью коэффициента обогащения  $EF = (C_i/C_{ref})/(K_i/K_{ref})$ , где  $C_i$  и  $C_{ref}$  – содержание  $i$ -го и нормирующего элементов в пробе, мг/кг;  $K_i$  и  $K_{ref}$  – содержание  $i$ -го и нормирующего элементов в фоновых почвах или верхней части земной коры, мг/кг [72]. Фоновые почвы использовали в качестве эталона сравнения для городских почв, а кларки верхней части земной коры – для дорожной пыли. В качестве нормирующего элемента выбран Al, практически не поступающий из антропогенных источников [35, 80].

Загрязнение почв, пыли и их микрочастиц  $PM_{10}$  ассоциациями ТММ характеризовали величиной суммарного показателя загрязнения  $Z_c = \sum K_c - (n - 1)$ , где  $n$  – число химических элементов с  $K_c > 1.5$ . Для  $PM_{10}$  дорожной пыли  $Z_c$  рассчитывали по формуле:  $Z_c = \sum KK - (n - 1)$ , где  $KK > 1.5$ . Степень экологической опасности загрязнения определяли в зависимости от величины  $Z_c$  [4]: <16 – неопасный, 16–32 – умеренно опасный, 32–64 – опасный, 64–128 – очень опасный, >128 – чрезвычайно опасный.

Статистическую обработку данных проводили в пакете Statistica 10. Для свойств почв, дорожной пыли и содержания ТММ рассчитывали средние  $m$ , медианные, минимальные и максимальные значения, среднеквадратичные отклонения  $\sigma$ , коэф-

коэффициенты вариации  $Cv = \sigma/m \times 100\%$ . Для выявления взаимосвязей между элементами, их происхождения и источников использовали метод главных компонент (РСА) и коэффициенты корреляции Пирсона ( $r$ ). Факторные нагрузки рассчитывали с помощью метода вращения Varimax normalized. Сильная связь выявлялась при величине факторных нагрузок  $>0.7$ , средняя – от 0.5 до 0.7. Значимость коэффициентов корреляции между химическими элементами проверяли при  $p < 0.001$ . Карты загрязнения почв, дорожной пыли и фракции  $PM_{10}$  ТММ составляли в пакете ArcGis 10.4, способ изображения – градуированные символы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Почвенно-геохимический фон

Фоновые черноземы обыкновенные (Pachic Chernozems) имеют легко- и среднеглинистый гранулометрический состав (содержание физической глины – 63–76%), реакция среды меняется от слабокислой до слабощелочной (рН 6.0–7.7). Электропроводность в среднем составляет 167 мкСм/см, варьируя от 45 до 225 мкСм/см, содержание  $C_{орг}$  колеблется от 0.8 до 2.3%.

В поверхностных горизонтах черноземов обыкновенных верхней части континентальной земной коры накапливаются Cd и As ( $KK = 2.4–2.8$ ). В коричневых почвах на элюво-делювии алевролитов и аргиллитов Южного склона хребта Демерджи концентрации Cd и As близки к фоновым уровням Севастополя, что указывает на вероятный литогенный источник этих ТММ – почвообразующие породы богаты этими элементами [9]. Вe, Cr, W, Ba, Sr рассеиваются, содержание Sn, Co, Fe, Ni, V, Mo, Zn, Sb, Mn, Cs близко к кларку верхней части земной коры.

В частицах  $PM_{10}$  фоновых черноземах обыкновенных характерно накопление Cd и As. Во фракции  $PM_{10}$  по сравнению с общим содержанием концентрации практически всех ТММ, кроме Mo и Sr, больше: Zn в 2.3 раза, Bi, Mn, Pb, Cs, W, Fe в 1.5–2.0 раза и на 10–40% остальных ТММ. Высокие уровни накопления ТММ в тонкодисперсных частицах обнаружены также в почвах эрозионных форм рельефа, расположенных в центре европейской части России, где на частицы  $PM_1$  и  $PM_{1-10}$  приходится около 50% Mn, Cu, Zn, Pb, Co, Ni и Cr [74].

### Физико-химические свойства городских почв и дорожной пыли

*Городские почвы.* Реакция среды рН водной вытяжки городских антропогенно-преобразованных почв изменяется от нейтральной (6.9) до сильнощелочной (8.5), составляя в среднем 7.7

(табл. 1), что близко к уровням почв Нахимовского района северной части Севастополя с рН 7.4–7.5 в селитебных, сельскохозяйственных и рекреационных зонах [24]. Электропроводность водной вытяжки почв в среднем составляет 381 мкСм/см, варьируя от 100 до 2225 мкСм/см и превышая уровень фоновых почв до 6 раз. Наибольшие значения рН (8.5) и ЕС (2225 мкСм/см) установлены в почвах транспортной зоны, что указывает на техногенное подщелачивание и засоление почв, обусловленное преимущественно влиянием автотранспорта. В прибрежных городах Крыма высокие значения электропроводности почв могут быть связаны также с привнесением солей с поверхности Черного моря [9].

Содержание  $C_{орг}$  в городских почвах составляет в среднем 3.6%, изменяясь от 1.0 до 14.8%, что до 7 раз больше фоновых аналогов. По функциональным зонам содержание  $C_{орг}$  изменяется в 9–10 раз, что зависит от применения органических удобрений и торфо-компостных смесей. В отдельных местах рекреационной (до 15%) и селитебной зон разной этажности (до 11%) высокие уровни  $C_{орг}$  связаны, вероятно, с наличием клумб, обуславливающих поступление существенных масс органического материала в проводимой уборкой опада листьев древесных растений. Из-за влияния этих факторов содержание  $C_{орг}$  в почвах рекреационной и селитебной зон северной части Севастополя достигает 13–16% [24].

Гранулометрический состав городских почв в среднем тяжелосуглинистый (содержание частиц  $PM_{10}$  46%), меняясь от супесчаного (13%) до легкогоглинистого (75%). В пределах функциональных зон города наиболее тяжелый состав имеют почвы агрогенной зоны с содержанием частиц  $PM_{10}$  в среднем 66%. Такое утяжеление состава выявлено в почвах рекреационной зоны Алушты, что связано с уплотнением почв при использовании сельскохозяйственной техники и орошением полей речными водами, содержащими тонкие частицы речной взвеси [9]. В почвах Севастополя содержание частиц  $PM_{10}$  в почвах больше, чем в Алуште (31%), что усиливает сорбционную способность почв по отношению к ТММ.

*Дорожная пыль.* Реакция среды дорожной пыли на всех типах дорог щелочная (рН 8.1–8.2), изменяясь от нейтральной (рН 7.1–7.5) до сильнощелочной (рН 8.5–10.4). Пыль Севастополя по величине рН более щелочная (8.2), чем в Алуште (7.5) [9]. Значения рН  $> 9$  почв и пыли встречаются часто в ряде других городов России [39, 52] и мира [40, 49, 78], что указывает на известную тенденцию их подщелачивания.

Электропроводность дорожной пыли в среднем составляет 267 мкСм/см, изменяясь от 83 до 1895 мкСм/см. Наибольшие значения ЕС обнару-

**Таблица 1.** Физико-химические свойства почв и дорожной пыли Севастополя

Объект (число проб)	pH	ЕС, мкСм/см	C <sub>орг</sub> , %	Содержание физической глины, %
Почвы				
Селитебная с малоэтажной застройкой (59)	7.7 (7.3–8.5)	392 (138–970)	3.6 (1.0–11)	46 (13–75)
Селитебная с многоэтажной застройкой (42)	7.6 (7.1–8.1)	411 (167–1079)	3.6 (1.3–11)	47 (18–69)
Рекреационная (20)	7.7 (6.9–8.0)	315 (100–855)	4.1 (1.1–15)	50 (14–67)
Агрогенная (2)	7.7 (7.6–7.8)	259 (245–272)	1.5 (1.3–1.8)	66 (64–68)
Промышленная (27)	7.7 (7.2–8.3)	371 (186–1027)	4.0 (1.2–9.3)	44 (22–70)
Транспортная (50)	7.9 (6.9–8.5)	377 (156–2225)	3.4 (1.0–9.4)	43 (19–75)
Среднее по городу (200)	7.7 (6.9–8.5)	381 (100–2225)	3.6 (1.0–15)	46 (13–75)
Фоновые почвы (10)	7.1 (6.0–7.7)	167 (45–2225)	1.7 (0.8–2.3)	63 (59–76)
Дорожная пыль				
Малые дороги (47)	8.1 (7.5–8.9)	227 (83–542)	2.0 (0.1–6.7)	33 (13–62)
Средние дороги (28)	8.2 (7.1–8.7)	277 (124–667)	1.5 (0.1–3.0)	39 (9–74)
Крупные дороги (35)	8.2 (7.4–10.4)	312 (100–1895)	1.8 (0.4–4.7)	35 (23–69)
Среднее по городу (110)	8.2 (7.4–10.4)	267 (83–1895)	1.8 (0.1–6.7)	35 (9–74)

Примечание. В скобках указаны минимальные и максимальные значения.

жены на крупных дорогах (312 мкСм/см), наименьшие – на малых (227 мкСм/см), то есть с ростом интенсивности движения и крупности дорог ЕС увеличивается. По величине ЕС водной вытяжки дорожной пыли Севастополя и Алушты различаются слабо, средний уровень составляет 267, 315 и 283 мкСм/см соответственно, что указывает на относительно стабильное содержание растворимых соединений в дорожной пыли разных городов [9].

На разных типах дорог содержание C<sub>орг</sub> в дорожной пыли в среднем составляет 1.5–2.0%, изменяясь от 0.1 до 6.7%. Большее содержание C<sub>орг</sub> в дорожной пыли может быть связано с поступлением частиц почв с большим содержанием гумуса, а также органического углерода техногенного происхождения (частицы сажи), образующегося при сжигании топлива автотранспортом и при истирании шин и асфальтового покрытия [52]. Среднее содержание C<sub>орг</sub> в дорожной пыли Севастополя и Алушты (1.7–1.8%) одинаково [9].

Гранулометрический состав дорожной пыли Севастополя в среднем среднесуглинистый (содержание частиц РМ<sub>10</sub> 33–39%), варьируя от песчаного (около 9%) до легкоголинистого (до 69%). Высокое содержание частиц РМ<sub>10</sub> в дорожной пыли Севастополя связано с привнесом на дорожное полотно мелких почвенных частиц из-за тяжелого гранулометрического состава почв Крыма. Доля фракции РМ<sub>1</sub> в пыли в среднем по городу составляет 6%, РМ<sub>1–10</sub> – 29%, РМ<sub>10–50</sub> – 15%, РМ<sub>>50</sub> – 50%. Среднее содержание физической

глины в дорожной пыли Севастополя (35%) превышает аналогичный показатель для Алушты (22%), что определяет большую сорбционную емкость пыли Севастополя для поллютантов [9].

#### Содержание ТММ в городских почвах и их фракции РМ<sub>10</sub>

В почвах Севастополя выявлены две ассоциации накапливающихся элементов: Pb–Zn–Sb, содержание которых в 3–5 раз больше фоновых уровней и Cd–Sr–Sn–Cu–Mo – в 2–3 раза (табл. 2, рис. 1). Концентрации W, Ba, Bi, Cr, Ni, As, Co, Be, Mn, Cs, V близки к фоновым уровням (Kc 0.7–1.1). Из-за высокой неоднородности концентраций ТММ наряду со средними значениями рассчитывали медианы. Медианные показатели Pb, Sb, Cd, Zn, Sn, Cu меньше их средних значений, то есть не соответствуют нормальному закону распределения, указывая на смещение данных в сторону аномальных значений. Уровни накопления ТММ сильно различаются в разных городах из-за степени урбанизации и типа промышленного производства [48, 65]. Так, перечень накапливающихся поллютантов в почвах Севастополя слабо отличается от установленного в Алуште, но уровни их накопления в несколько раз выше [9].

Вблизи различных источников техногенного воздействия в городских почвах формируются локальные техногенные геохимические аномалии с высокими концентрациями поллютантов (рис. 2). В почвах промышленной зоны Нахимовского района концентрации Zn превышают фоновые

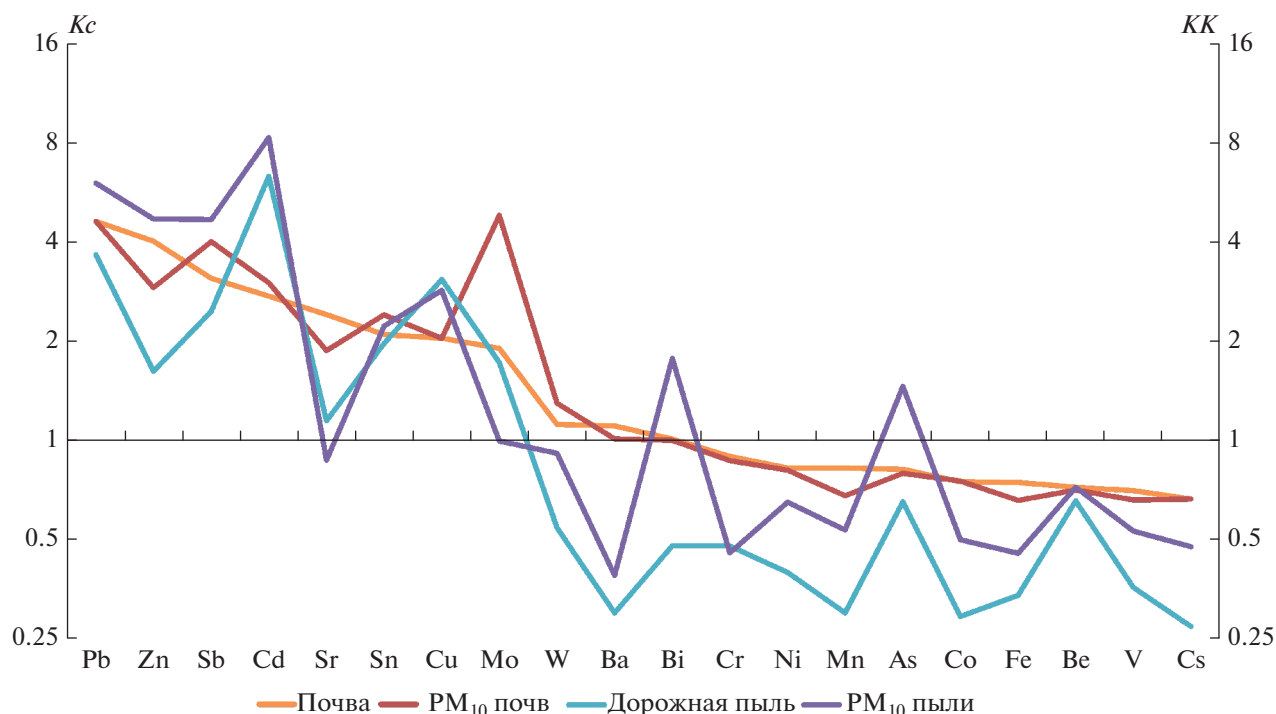


Рис. 1. Геохимическая специализация городских почв, дорожной пыли и их фракций  $PM_{10}$  в Севастополе. Для почв приводятся  $K_c$ , для дорожной пыли –  $KK$  элементов.

значения в 247 раз, Sb – 91, Cd – 23, Pb – 19, Ba – 17, Sn и Cd – 12 раз. В почвах северной части города наиболее интенсивно накапливается Pb ( $K_c$  15), Cd (20), Sb (10) вдоль Севастопольской бухты рядом с судоремонтным заводом. На существенную роль автотранспорта в загрязнении почв Севастополя указывает приуроченность ареалов концентраций поллютантов к местам скопления автотранспорта и объектам транспортной инфраструктуры [29]. Sb–Cd–Pb-аномалия сформировалась в восточной части города с гаражными кооперативами и жилыми зонами с многоэтажной застройкой, где концентрации Sb превышают фоновые значения в 3–14 раз, Pb – 45–51, Cd – 15–18 раз. В почвах центральной части города рядом с Южной бухтой под влиянием выбросов автотранспорта повышены содержания ТММ по сравнению с фоном: Pb – до 11, Sb – до 10, Cd – до 5 раз. Высокие  $K_c$  Pb, Cd, Sb установлены в почвах вдоль Симферопольского шоссе в районе Инкермана.

Во фракции  $PM_{10}$  почв ассоциация ТММ такая же, как в почвах, но содержание многих элементов в несколько раз больше. Частицы  $PM_{10}$  почв относительно общих содержаний обогащены всеми поллютантами, кроме Sr, особенно Bi и Zn ( $D_x$  1.6–1.7), а также Sb, Pb, Cs, Cd ( $D_x$  1.5). Особенностью почвенных  $PM_{10}$  в Севастополе являются наибольшие значения  $K_c$  4.8 у Mo из-за низ-

кого содержания в  $PM_{10}$  фоновых почв. Средние концентрации Pb, Sb, Cd, Zn, Sn, Cu в  $PM_{10}$  почв, как и в общей массе почвы, в 1.5–2 раза выше медианных значений, что подтверждает неоднородность выборки.

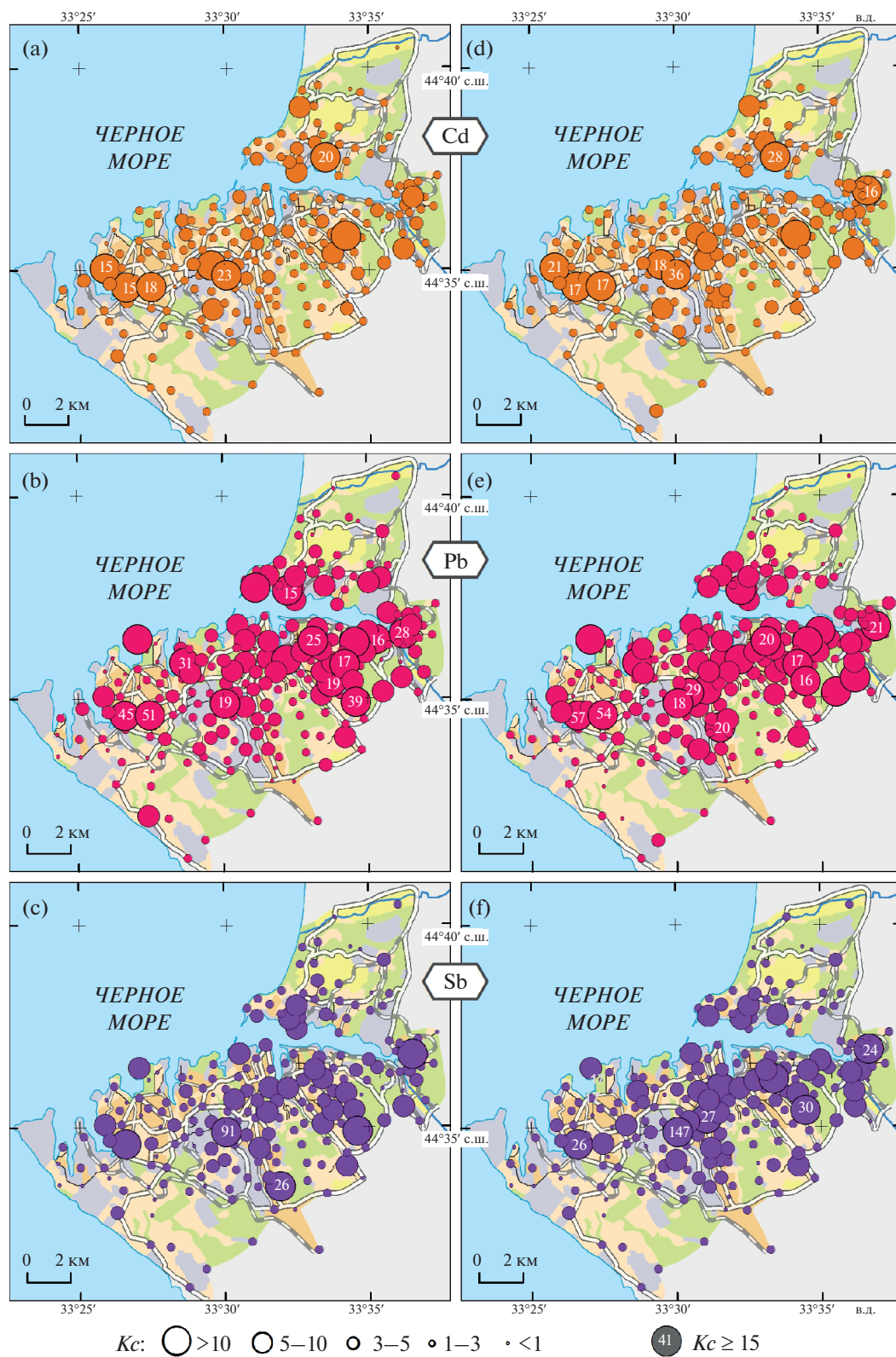
В пределах города концентрация многих ТММ в частицах  $PM_{10}$  почв существенно меняется. В западной части Севастополя в жилой зоне рядом с гаражным кооперативом установлена контрастная аномалия с максимальной аккумуляцией элементов, где  $K_c$  для ТММ составляют: Sb – 144, Zn – 109, Pb – 54, Cd – 34, Sn – 29, Mo – 25, Cu – 19 (рис. 2). Полиэлементные аномалии Sb–Cd–Pb–Zn–Cu–Sn с  $K_c$  больше 3–5 формируются также в Нахимовском районе рядом с дачными участками и прилегающей к ним промышленной зоной.

Контрастные аномалии большинства элементов в частицах  $PM_{10}$  почв сформировались в районе Камышовых бухты рядом с крупным шоссе, Севастопольским морским рыбным портом и котельной. Во фракции  $PM_{10}$  почв аномалии Sb–Pb–Cd–Mo с превышением фоновых уровней более чем в 5 раз сформировались в северной части Севастополя рядом с судоремонтным заводом. В Инкермане высокие содержания ТММ выявлены вдоль долины р. Черная и вблизи промышленных предприятий по металлообработке и рыбоперерабатывающего завода. Контрастная аномалия Cu,

Таблица 2. Содержание ТММ в почвах и их фракциях РМ<sub>10</sub> в Севастополе

Элемент	Почвы						Фракции РМ <sub>10</sub> почв						D <sub>x</sub>	Кларк, мг/кг						
	среднее	медиана	min-max	Сф	Kc	Cv, %	среднее	медиана	min-max	Сф	Kc	Cv, %								
															мг/кг					
Mo	1.3	1.1	0.28-5.2	0.71	1.9	53	1.6	1.4	0.2-8.6	0.33	4.8	73	1.2	1.1						
Pb	91	52	4.7-1000	20	4.6	146	138	78	3.6-1748	31	4.6	148	1.5	17						
Sb	2.4	1.4	0.27-71	0.78	3.1	219	3.7	1.9	0.2-134	0.91	4.0	271	1.5	0.4						
Cd	0.6	0.42	0.15-5.1	0.22	2.7	111	0.9	0.6	0.2-10.8	0.3	3.0	140	1.5	0.09						
Zn	292	140	29-18000	73	4.0	437	482	256	39-21441	168	2.9	321	1.7	67						
Sn	4.2	3.0	0.5-44	2.0	2.1	109	5.2	3.6	0.3-66	2.2	2.4	131	1.2	2.1						
Cu	66	43	10-400	33	2.0	93	83	54	4.6-793	41	2.0	117	1.3	28						
Sr	223	210	53-560	93	2.4	46	172	148	38-980	1.2	1.9	61	0.7	320						
W	1.1	1.0	0.18-6.5	1.0	1.1	51	1.5	1.4	0.1-7.9	44	1.3	50	1.4	1.9						
Ba	342	300	26-5390	309	1.1	119	417	351	23-5005	414	1.0	119	1.2	624						
Bi	0.24	0.23	0.02-1.1	0.24	1.0	49	0.4	0.4	0.02-1.8	0.4	1.0	54	1.7	0.16						
Cr	48	47	17-150	54	0.9	37	64	60	19-358	74	0.9	52	1.3	92						
Ni	30	30	7.3-52	37	0.8	30	41	39	10-108	51	0.8	33	1.4	47						
As	8.6	8.0	0.2-25	10.6	0.8	43	12.2	11.5	0.2-44	15	0.8	53	1.4	4.8						
Co	8.4	8.1	1.1-33	11	0.7	41	11.5	11	1.2-36	15	0.8	43	1.4	17.3						
Be	1.06	1.0	0.1-2.0	1.5	0.7	37	1.5	1.5	0.1-4.9	2.1	0.7	40	1.4	2.1						
Mn	664	596	85-2169	804	0.8	46	867	778	94-4862	1277	0.7	59	1.3	774						
Cs	3.1	3.1	0.3-6.6	4.7	0.7	42	4.7	4.5	0.4-13.5	7.0	0.7	34	1.5	4.9						
V	52	50	14-100	74	0.7	37	72	68	19-243	109	0.7	41	1.4	97						
Fe	22150	21770	2030-40740	29629	0.7	33	29768	28474	2362-109235	45281	0.7	41	1.3	39200						

Примечание. В скобках указаны минимальные и максимальные значения. D<sub>x</sub> – отношение среднего содержания элемента в РМ<sub>10</sub> почв к общим содержаниям. Полу-жирным выделены элементы с Kc > 1.5, Cv > 60% и D<sub>x</sub> > 1.5. Элементы ранжированы по убыванию Kc во фракции РМ<sub>10</sub> почв. Сф – содержание во фракции.



**Рис. 2.** Распределение коэффициентов концентрации Cd, Pb, Sb в почве (a, b, c) и ее фракции PM<sub>10</sub> (d, e, f) в Севастополе.



**Таблица 3.** Содержание ТММ в дорожной пыли и ее фракции  $PM_{10}$  в Севастополе

Элемент	Дорожная пыль					Фракции $PM_{10}$ пыли					$D_x$	Кларк, мг/кг
	среднее	медиана	min–max	КК	Cv, %	среднее	медиана	min–max	КК	Cv, %		
	мг/кг					мг/кг						
Cd	0.57	0.25	0.1–25	6.3	418	0.74	0.61	0.24–7.7	8.3	104	1.3	0.09
Pb	62	40	8.5–650	3.6	133	102	78	24–703	6.0	87	1.7	17
Sb	2.0	1.35	0.3–24	5.0	132	3.8	3.0	0.88–17	9.5	73	1.9	0.4
Zn	121	100	33–520	1.8	59	351	308	111–1305	5.2	61	2.9	67
Cu	83	46	8.1–640	3.1	118	77	62	22–275	2.8	67	0.9	28
Sn	4.9	3.4	0.81–73	2.3	147	5.5	4.2	1.6–24	2.6	70	1.1	2.1
Bi	0.11	0.08	0.03–0.6	0.7	75	0.41	0.32	0.12–58	2.6	134	3.7	0.16
As	3.7	3.4	0.1–9.9	0.8	45	8.2	7.4	2.4–29	1.7	48	2.2	4.8
Mo	1.9	1.7	0.38–6.2	1.7	58	1.1	0.8	0.18–6.5	1.0	80	0.6	1.1
Sr	309	295	180–560	1.0	23	135	217	89–605	0.4	36	0.8	320
W	1.1	0.79	0.24–6.0	0.6	89	1.9	1.4	0.61–5.9	1.0	61	1.9	1.9
Mn	505	434	178–2711	0.7	62	555	514	230–1151	0.7	36	1.1	774
Ni	20	17	5.9–88	0.4	58	32	31	13–79	0.6	31	1.6	47
Cr	44	30	5.8–360	0.5	106	44	39	16–118	0.5	41	1.0	92
Fe	14526	13930	5180–34020	0.4	33	21552	21501	9054–47925	0.5	34	1.5	39200
Ba	213	200	100–670	0.3	33	285	277	118–1462	0.5	51	1.3	624
V	29	26	8.9–110	0.3	47	50	48	22–117	0.5	34	1.7	97
Co	4.4	4.2	1.6–9.5	0.3	34	7.4	7.2	2.8–15	0.4	33	1.7	17.3
Cs	0.9	0.8	0.4–2.4	0.2	39	2.6	2.4	1.0–6.2	0.5	40	3.1	4.9
Be	0.4	0.42	0.2–0.84	0.2	33	0.9	0.84	0.4–1.9	0.4	36	2.1	2.1

Примечание. В скобках указаны минимальные и максимальные значения.  $D_x$  – отношение среднего содержания элемента в  $PM_{10}$  пыли к дорожной пыли. Полужирным выделены элементы с  $КК > 1.5$ ,  $Cv > 60\%$  и  $D_x > 1.5$ . Элементы ранжированы по убыванию  $КК$  во фракции  $PM_{10}$  пыли.

Sb, Cd, Sn, Pb, Mo ( $K_c$  25) в частицах  $PM_{10}$  почв сформировались возле Севастопольской ГРЭС.

### Содержание ТММ в дорожной пыли и ее фракции $PM_{10}$

В дорожной пыли Севастополя накапливаются Cd–Pb–Cu и Sb–Sn–Mo–Zn ассоциации (табл. 3). Содержание Cd, Pb, Cu в среднем в 3–6 раз, а Sb, Sn, Mo, Zn – в 1.5–3 раза выше кларков верхней части земной коры. Околокларковые концентрации имеют Mn и As, остальные элементы рассеиваются. В дорожной пыли средние содержания Cd, Pb, Sb и Cu в 1.5–2 раза больше медианы из-за отклонений данных от нормального распределения к экстремальным концентрациям, которые часто встречаются в различных исследованиях загрязнения почв и дорожной пыли городов [43, 55, 56]. Состав ассоциаций ТММ с наибольшими  $КК$  в Севастополе и Алуште в целом совпадает, что указывает на ведущую роль Cd, Pb, Zn, Sb, Cu и Sn в загрязнении окружающей среды городов Крыма [9].

Локальные аномалии Pb, Zn, Cd, Cu формируются в отдельных точках в районах, примыкающих к Севастопольской бухте (рис. 3), что связано с высокими уровнями загрязнения атмосферного воздуха на побережье Северной бухты и Северной части города из-за воздействия основных источников загрязнения: автотранспорта, промышленности, нефтяной базы, Севастопольской ТЭЦ, полигона ТБО и нескольких стихийных свалок бытовых и промышленных отходов [28].

Фракция  $PM_{10}$  пыли обогащена Cd–Pb–Zn–Sb и Cu–Sn–Bi ассоциациями элементов (табл. 3). В частицах  $PM_{10}$  содержание Cd и Pb в 6–8 раз, Zn и Sb – 5, Cu, Sn и Bi – 1.5–3 раза выше кларков верхней части континентальной земной коры. Околокларковые концентрации характерны для Mn, Ni, Sr, Mo, W, содержания Cs, Be, Co, V, Ba, Fe, Cr в 1.6–2.6 раз ниже кларков. Для частиц  $PM_{10}$  пыли характерны повышенные концентрации относительно общего содержания ( $D_x$  1.0–3.7): Bi, Cs, Zn, As, Be в 3–4 раза, Sb, V, Co, W, Pb, Ni, Fe в 1.5–2 раза, Ba, Cd, Sn, Mn в 1.1–1.3 раза. Общее содержание Cu, Mo и Sr в пыли больше, чем в частицах  $PM_{10}$ .

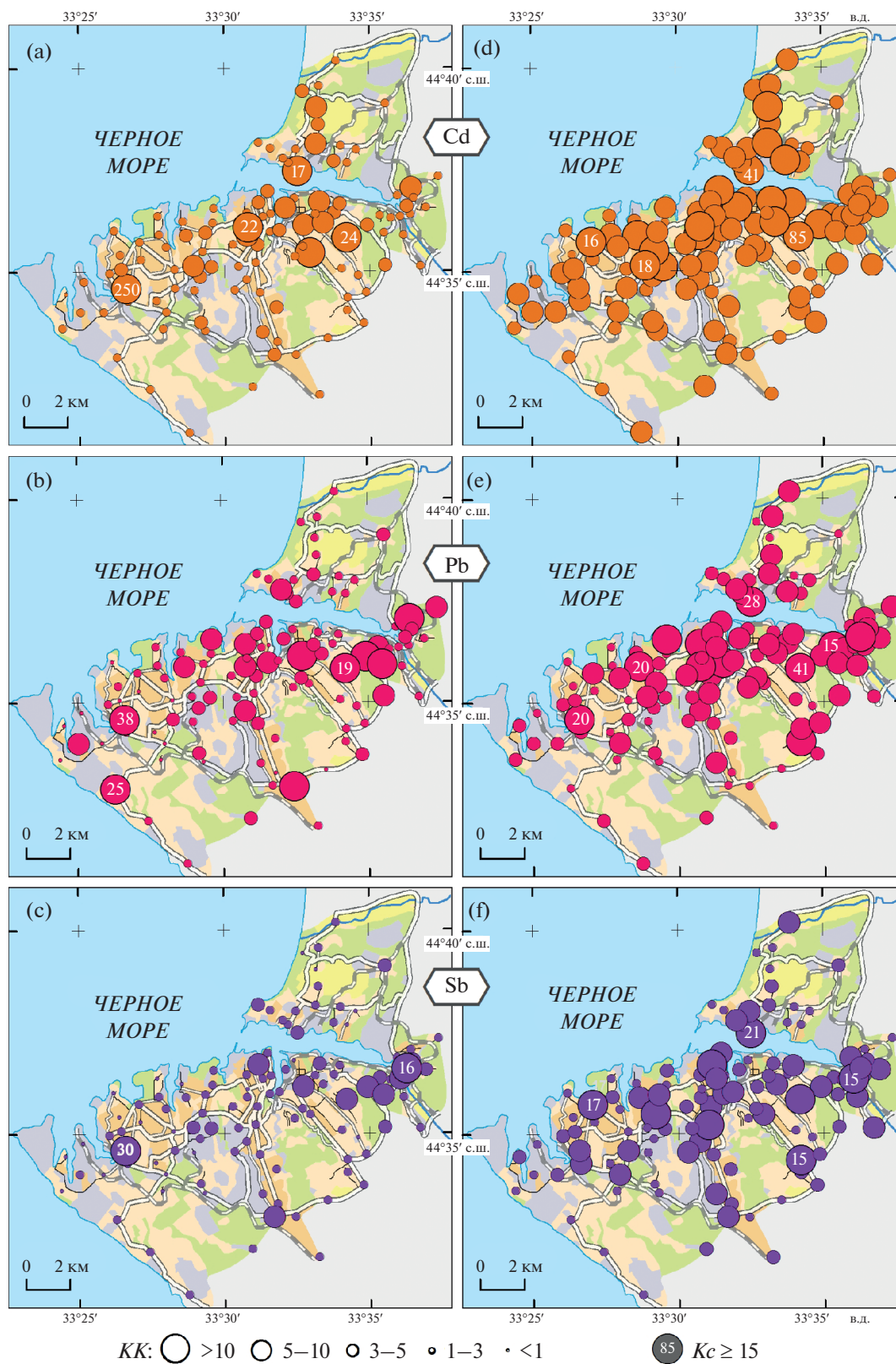


Рис. 3. Распределение коэффициентов концентрации Cd, Pb, Sb в дорожной пыли (а, б, с) и ее фракции PM<sub>10</sub> (д, е, ф) в Севастополе.

В центре Севастополя в атмосферных аэрозолях преобладающими поллютантами являются Cd, Zn и Cu, что указывает на существенное загрязнение этими ТММ различных компонентов окружающей среды города [18]. Источником Cd, W, As и Sr в частицах дорожной пыли также может служить региональный перенос поллютантов — при западных ветрах со стороны европейского Средиземноморья атмосферные осадки на побережье Севастополя сильнее обогащены этими ТММ по сравнению с осадками, выпадающими при ветрах восточных и других румбов [77]. Для Севастопольской бухты атмосферные выпадения являются существенным источником ТММ, особенно Cr, Ni, Cu, Sr, Zn, Ba, поток которых в десятки раз превышает фоновый уровень, а также Sb, Ag, As, W, Mo, Mn, Co, интенсивность выпадений которых с твердыми частицами в несколько раз превышает фоновый для южного берега Крыма уровень [17]. При преобладании ветров южного и юго-западного направлений со стороны моря в атмосферных аэрозолях Севастополя в больших количествах содержатся редкоземельные и рассеянные Hf, Th, Sc, La, Ce, диатомовые водоросли, цианобактерии и их ассоциации, при ветрах северных и северо-восточных румбов с континента в аэрозолях концентрируются Cd, As, Cu и Zn [20].

Локальные аномалии ТММ в пыли также установлены в промзонах прибрежных районов в восточной части Севастопольской бухты и Инкермане (рис. 3), где выявлено, что высокое загрязнение является одной из причин заболеваемости детского населения [31]. К югу от Севастопольской бухты наблюдаются наибольшие концентрации  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$  в атмосферном воздухе при ветрах юго-восточных и северо-восточных румбов и переносе поллютантов из центра города и со стороны северо-восточной промышленной части [2, 6].

#### **Фракционирование ТММ в почвах и дорожной пыли различных функциональных зон и типов дорог**

Связь накопления поллютантов с функциональным зонированием городов подтверждена многими исследованиями [33, 55]. В Севастополе концентрация ТММ в почве и ее фракция  $PM_{10}$  изменяется в зависимости от функционального использования территории (рис. 4).

В *промышленной зоне* почвы и их частицы  $PM_{10}$  находятся на первом месте по степени загрязнения Sb, Cd, Pb, Zn из-за выбросов объектов теплоэнергетики, предприятий металлообработки, судостроения, ремонтных мастерских и др. Так, в результате выбросов машиностроительных и металлообрабатывающих предприятий в почвах северной части Крыма интенсивно накапливаются

Cu, Pb и Zn [13]. Из-за влияния промышленных предприятий и портовых сооружений, расположенных рядом с береговой линией, илистая фракция донных отложений Севастопольской бухты загрязнена Zn, Pb, Cu, Cr, Ni [26]. Существенный вклад в загрязнение Севастополя вносят антропогенные источники, которые приводят к накоплению Sb и Cd в почвах в составе более тонких частиц, а Zn и Pb — с более широким спектром крупности частиц.

*Транспортная и селитебные зоны с малоэтажной и многоэтажной застройкой* являются вторыми по уровню накопления ТММ из-за их эмиссии от печного отопления жилых домов и выхлопных газов автотранспорта, что определяет высокий уровень загрязнения почв в этих функциональных зонах. В северной части Крыма так же, как в Севастополе, в почвах селитебных техногенных ландшафтов аккумулируются Pb, Cu, Sr, Cr и As [13].

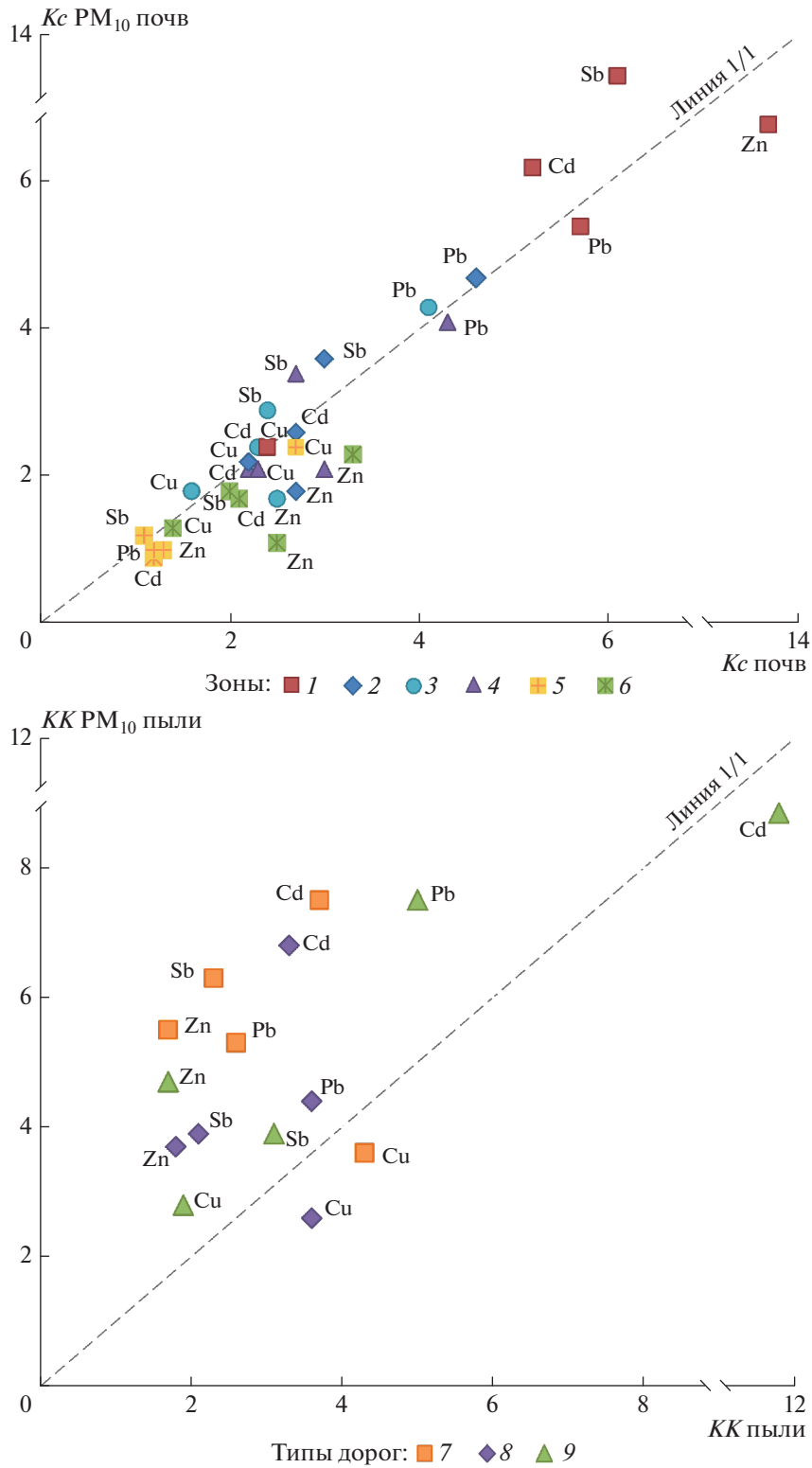
В *агрогенной зоне*, большую часть которой занимают яблоневые, персиковые сады и виноградники из-за использования медьсодержащих фунгицидов и применения минеральных удобрений в почвах накапливается Cu. Повышенные концентрации Cu неоднократно выявляли в почвах виноградников Крыма и Севастополя [82], а также в почвах других винодельческих районов Средиземноморья: Испании, Италии [33, 42]. В почвах Мурсии и Пьемонта, специализирующихся на выращивании винограда, содержание Cu достигает 350 мг/кг, то есть 12 кларков, что связано с длительным внесением в почвы пестицидов и удобрений.

В *рекреационной зоне* для почв и частиц  $PM_{10}$  характерно слабое накопление ТММ. Содержание Pb, Zn, Cd, Sb больше в общей массе почвы.

В дорожной пыли накопление и распределение ТММ зависит от состава и интенсивности транспортного потока, скорости движения автотранспорта, количества торможений и ускорений [9]. В городах загрязнение ТММ дорожной пыли и ее фракций  $PM_{10}$  часто варьирует на дорогах разной крупности [9, 56, 80].

На *крупных дорогах* в дорожной пыли интенсивнее аккумулируется Cu, а в частицах  $PM_{10}$  пыли Cd. При увеличении интенсивности автомобильного движения зафиксирован более высокий вклад  $PM_{10}$  в общее загрязнение пыли Cd, Sb, Zn и Pb, что подтверждается повышенными уровнями накопления этих элементов в микрочастицах относительно общей массы пыли. Это связано с осаждением на полотне крупных дорог загрязненными пылевыми частицами, поступающими при движении транзитного транспорта, грузовых машин и междугородних автобусов.

На *средних дорогах* выявлена та же закономерность распределения поллютантов, как и на крупных: Cd, Pb, Sb и Zn накапливаются в микроча-



**Рис. 4.** Фракционирование Zn, Sb, Pb, Cu, Cd в почвах и дорожной пыли в Севастополе. Функциональные зоны: 1 – промышленная, 2 – транспортная, 3 и 4 – жилые с многоэтажной и малоэтажной застройкой, 5 – аграрная, 6 – рекреационная. Тип дороги: 7 – крупная, 8 – средняя, 9 – малая.

стицах  $PM_{10}$ , а Cu – в дорожной пыли. Интенсивное накопление поллютантов в мелких частицах пыли средних дорог объясняется большей долей пассажирского автотранспорта с меньшими скоростями и прерывистым характером движения, частыми остановками, в результате которых увеличивается количество эмитируемых в атмосферу поллютантов.

Дорожная пыль и ее частицы  $PM_{10}$  *малых дорог* наиболее загрязнены Cd и Pb, которые являются приоритетными поллютантами Севастополя. При этом Cd активнее накапливается в общей массе пыли, а Pb – в частицах  $PM_{10}$  (рис. 4). Повышенные концентрации Cd в общей массе дорожной пыли, вероятно, связаны с поступлением преимущественно крупных частиц асфальта при разрушении дорожного покрытия и дорожной разметки, содержащих поллютант.

Таким образом, на всех типах дорог интенсивность накопления большинства элементов в частицах  $PM_{10}$  пыли больше, чем в общих пробах пыли (рис. 4) из-за их большей удельной площади поверхности и высокой сорбционной способности мелких фракций, высокого содержания органических веществ и преобладания глинистых минералов в минералогическом составе частиц.

Вклад частиц  $PM_{10}$  в общее загрязнение почв Севастополя составляет около 70–75% для Zn и Bi, 60–65% – для Cs, Pb, Be, W, V, As, Co и Cd, а также более половины – для Cr, Ni, Fe, Sb, Mn, Mo, Cu, Sn, Ba (рис. S2). На частицы  $PM_{10}$  пыли в среднем приходится до 70–85% Bi, Cs, Zn, As и 60–70% Cd, Sb, Be, Pb, W, V, Ni. Sr поступает в почвы и пыль с более крупными частицами, поэтому доля связанного с  $PM_{10}$  металла составляет всего 40%. Из-за тяжелосуглинистого гранулометрического состава почв Севастополя в частицах  $PM_{10}$  наблюдаются большие доли большинства ТММ (50–75%) по сравнению с почвами других городов, например Гонконга и Москвы, где на фракцию  $PM_{10}$  приходится <50% массы всех поллютантов [10, 64]. По этой же причине в Севастополе по сравнению с Алуштой возрастает доля связанных с  $PM_{10}$  почв ТММ, особенно Mo, доля которого в  $PM_{10}$  почв Севастополя достигает 57%, при 15% в Алуште [9].

### Источники ТММ в почвах и дорожной пыли

*Обогащение почв и дорожной пыли тяжелыми металлами и металлоидами.* Вклад природных и антропогенных факторов в загрязнение почв, дорожной пыли и их фракций  $PM_{10}$  ТММ оценивался с использованием коэффициента обогащения  $EF$ , рассчитанного относительно Al.

Почвы, дорожная пыль и их фракции  $PM_{10}$  обогащены следующими ТММ (нижние индексы – величина  $EF$ ):

Городские почвы:  $Pb_9Zn_8Sb_6Cd_6Sr_5Sn_4Cu_4Mo_3$ .

Фракция  $PM_{10}$  городских почв:  $Sb_9Pb_9Mo_9Zn_6Cd_6Sn_5Sr_4Cu_4$ .

Дорожная пыль:  $Cd_{36}Sb_{29}Pb_{21}Cu_{16}Sn_{14}Zn_{11}Mo_{10}Sr_6Bi_4As_4W_3$ .

Фракция  $PM_{10}$  пыли:  $Sb_{24}Cd_{22}Pb_{16}Zn_{14}Sn_7Cu_7Bi_6As_4$ .

В почвах и их фракции  $PM_{10}$  по источникам происхождения ТММ делятся на две группы. Первая – Sb, Pb, Mo, Zn, Cd, Sn, Sr, Cu характеризуется высокими средними коэффициентами обогащения ( $EF > 2$ ) и аномально высокими, но единичными максимальными значениями ( $EF 500–600$ ), указывая на поступление элементов из техногенных источников (рис. 5). Вторая группа – W, Ba, Bi, Cr, Ni, As, Co, Mn, Be, V, Fe, Cs с уровнями  $EF < 2$ , свидетельствует об антропогенно-терригенных источниках (почвообразующие породы, морские аэрозоли и др.) и меньшем вкладе антропогенных источников поступления. Фракция  $PM_{10}$  загрязнена теми же ТММ, но интенсивность обогащения приоритетными поллютантами – Sb, Mo, Cd, Sn в несколько раз больше по сравнению с почвами. На роль антропогенных источников указывают высокие коэффициенты  $Cv$ , отражающие пеструю картину загрязнения с локальными аномальными значениями. Наиболее сильно ( $Cv > 100\%$ ) варьируют концентрации Zn, Sb, Pb, Cd, Sn, Ba и Cu, их коэффициент вариации до 25 раз выше, чем в фоновых почвах.  $Cv$  практически всех ТММ, кроме Zn, увеличивается в частицах  $PM_{10}$  по сравнению с почвами (рис. S3). В общей массе почвы наибольшая изменчивость Zn объясняется поступлением поллютанта с более крупными фракциями почвы.

В дорожной пыли и ее фракции  $PM_{10}$  перечень накапливаемых элементов с высокими  $EF$  в целом соответствует почвам – Sb, Cd, Pb, Zn, Sn, Cu, Mo, Sr, а также As, Bi и W. В частицах  $PM_{10}$  пыли с повышенными концентрациями практически всех элементов по сравнению с общими содержаниями характерны меньшие значения  $EF$  Sb, Cd, Pb, Sn, Cu, Mo, Sr, что связано с различиями в обогащении пыли и ее частиц  $PM_{10}$  эталонным элементом Al – его содержание увеличивается при уменьшении размеров частиц. Такая же зависимость выявлена в почвах г. Сюйчжоу (Китай), где коэффициенты обогащения большинства ТММ больше в частицах размером 250–500 мкм, чем в более мелких фракциях <45 мкм [83]. Для дорожной пыли и частиц  $PM_{10}$  в Севастополе, так же как для почв, характерна сильная вариабельность содержаний многих поллютантов (рис. 3), в особенности технофильных элементов – Zn (59%), Cu

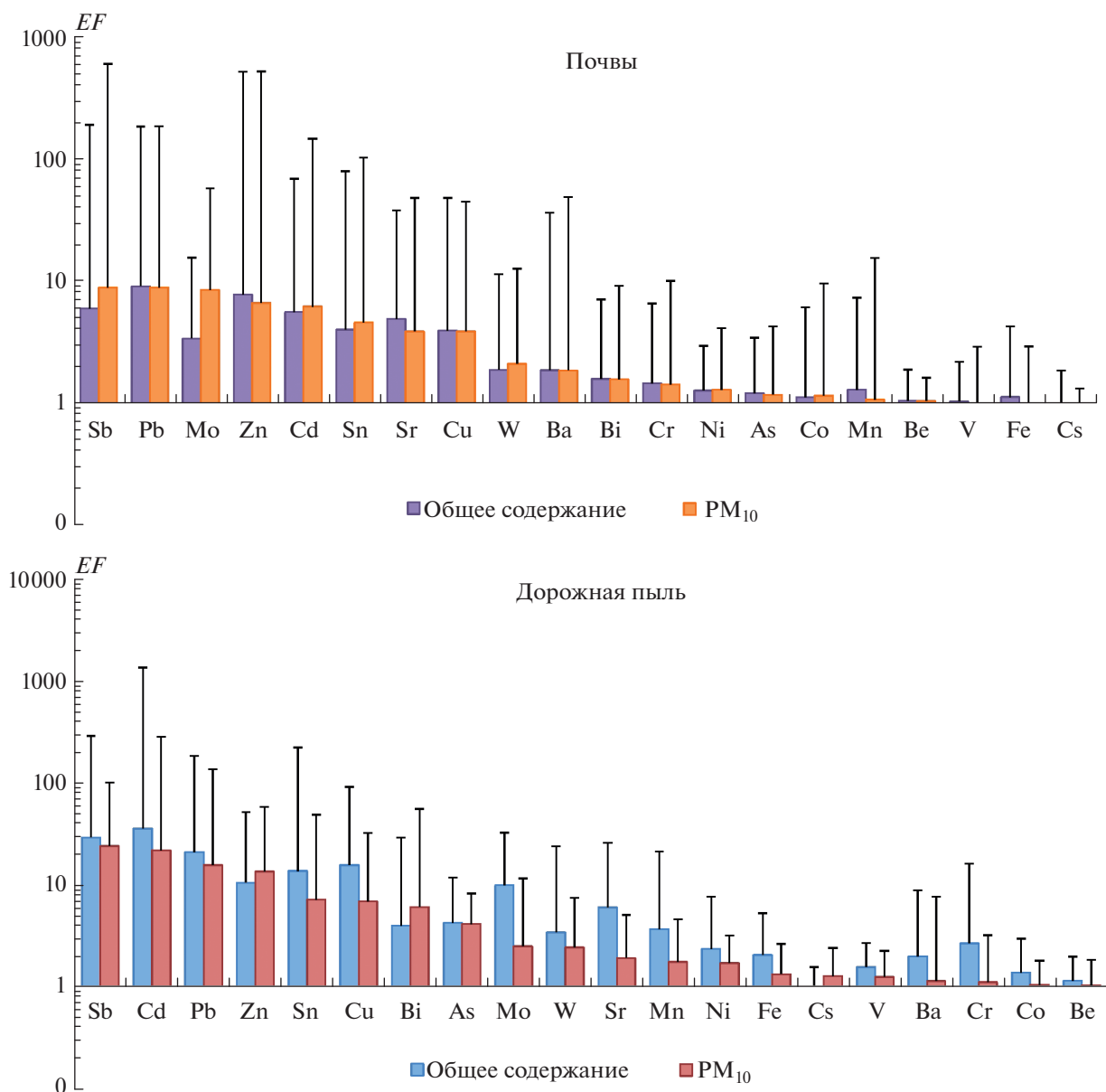


Рис. 5. Обогащение почв, дорожной пыли и их частиц PM<sub>10</sub> в Севастополе ТММ. Вертикальными линиями показаны максимальные значения EF элементов. Элементы ранжированы по убыванию EF во фракциях PM<sub>10</sub> почв и пыли.

(67–118%), Cd (104–418%), Sn (70–147%), Sb (73–132%), Pb (87–133%).

#### Источники тяжелых металлов и металлоидов

Основные источники ТММ в почвах, дорожной пыли и их фракциях PM<sub>10</sub> в Севастополе выявлены методом PCA. В качестве исходных данных для анализа источников использовали значения концентраций ТММ в почвах, дорожной пыли и их фракциях PM<sub>10</sub>. Результаты PCA представлены на рис. 6 и табл. S1.

Для городских почв и их частиц PM<sub>10</sub> в Севастополе получены четыре фактора, которые в сумме

ответственны за 77 и 79% общей дисперсии. Первый фактор (PC1) обуславливает около 37 и 39% общей дисперсии и свидетельствует о накоплении в основном литофильных элементов Be, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, As, Cs в почвах за счет терригенных источников (почвообразующих пород). Поступление этих ТММ от одного источника подтверждается высокими положительными значениями коэффициента корреляции (табл. S2) между концентрациями элементов данной группы ( $r = 0.5–0.9$ ).

Второй (PC2) и третий факторы (PC3) вносят соответственно 25–26 и 8–9% в общую дисперсию и обусловлены влиянием выбросов авто-



почв Pb может свидетельствовать о его значительном поступлении в окружающую среду в прошлые годы, когда использовался этилированный бензин. Из-за наличия многообразных невыхлопных источников сложно провести их подробную идентификацию, что является существенной проблемой при изучении влияния транспорта на окружающую среду [80].

Четвертый фактор (PC4) с 5.5% общей дисперсии объясняет формирование в почвах аномалий W и Cr, а в частицах PM<sub>10</sub> почв — Cu и Mo, поступление которых связано с теплоэнергетикой, металлообработкой, судостроением, судоремонтом и разнообразными ремонтными мастерскими. Важным источником Mo и W может являться сжигание бытовых отходов и биомассы, ископаемых видов топлива, например угля, используемого для отопления жилых домов в Севастополе. В городе широко распространены предприятия строительной промышленности по производству кирпича, цемента, плитки, активно проводятся строительные и демонтажные работы. Состав почв и их частиц PM<sub>10</sub> в среднем слабо различается, что подтверждается одинаковым количеством выделенных главных компонент и сходным перечнем элементов, накапливающихся в результате влияния этих факторов.

Для дорожной пыли и ее частиц PM<sub>10</sub> также получены четыре главных фактора, в сумме ответственных за 61 и 83% общей дисперсии. Первый фактор PC1 свидетельствует о накоплении антропогенно-терригенных элементов: в дорожной пыли — Be, V, Fe, Co, As, Cs, в PM<sub>10</sub> пыли — Be, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, As, Cs. Водная и ветровая эрозия почв является основным источником минеральных компонентов дорожной пыли [45]. Этот фактор активнее проявляется для фракции PM<sub>10</sub>, которая наиболее подвержена выдуванию, обуславливая 52% дисперсии, в то время как для дорожной пыли дисперсия составляет всего 28%.

PC2 ответственен за 15–18% дисперсии и характеризует вклад автотранспорта в накопление Pb и Cd в общей массе пыли и ее частицах PM<sub>10</sub>, а также Sb — в дорожной пыли и Ba, Sn, Zn — в PM<sub>10</sub>. Перечень элементов, выделенных для дорожной пыли и PM<sub>10</sub> пыли в результате воздействия второго фактора, в целом совпадает с полученными для почв и их частиц PM<sub>10</sub>, что указывает на поступление этих элементов в почвы и пыль от единого источника — автотранспорта.

PC3 вносит 7–9% в общую дисперсию и объясняет формирование в пыли аномалий Zn, Mo, Ba, W, а в PM<sub>10</sub> пыли — Mo, Sb, W, Cu, Zn. Так, Mo является индикатором влияния промышленности на загрязнение окружающей среды городов, что говорит о поступлении данной ассоциации элементов в дорожную пыль Севастополя от про-

мышленных предприятий и объектов теплоэнергетики. Дополнительным источником Mo, Zn, Ba, W, Sb являются автомобильные колодки, шины, разрушение дорожного покрытия и дорожной разметки. В дорожной пыли Москвы анализ источников ТММ показал, что Mo и Sb могут поступать вместе при истирании тормозных колодок и деталей автомобилей [80].

PC4 объясняет 5–8% дисперсии и связан с обогащением пыли Cr, Ni, Mn, и частиц PM<sub>10</sub> — Sr и Bi, которые поступают на дорожное полотно в результате выдувания загрязненных частиц почв.

### Эколого-геохимическая оценка загрязнения

*Городские почвы.* Используемый в России для оценки загрязнения почв тяжелыми металлами и металлоидами суммарный показатель Zc в среднем соответствует низкому неопасному уровню (Zc < 16) на 71% территории города (рис. S4). Средний, умеренно опасный (Zc 16–29) и высокий, опасный уровень (33–60) загрязнения имеют только 17 и 10% почв соответственно. Очень высокий, очень опасный (98–124) и максимальный, чрезвычайно опасный (419) уровень загрязнения выявлены в 2% проб почв. Две аномальные зоны (98–124) в почвах сформировались в восточной части города под влиянием выбросов автотранспорта, другая аномалия (419) — в промышленной зоне недалеко от аэродрома. Высокие значения Zc (46–59), сформированные преимущественно Cu, Zn и Pb в почвах Севастополя, зафиксированы ранее на территории гаражных комплексов в промышленной зоне [29]. Санитарно-гигиеническая оценка состояния атмосферы, поверхностных вод, почвы, растительности указывают на наиболее интенсивное влияние промышленных объектов и автотранспорта [30].

На 19% территории города суммарный показатель загрязнения фракции почв PM<sub>10</sub> увеличивается по сравнению с общим содержанием до среднего, умеренно опасного уровня (Zc 20). Общая площадь участков с низким, неопасным уровнем суммарного загрязнения частиц PM<sub>10</sub> почв (Zc < 16) составляет около 68%. В зону высокого, опасного загрязнения (32–63) попадает 9% проб, а очень высокий, очень опасный (71–128) и максимальный, чрезвычайно опасный уровень (143–384) установлен на 3 и 1% территории соответственно. Во фракции PM<sub>10</sub> по сравнению с почвами не меняется локализация аномалий ТММ, но увеличивается интенсивность загрязнения до очень высоких (82–123) и максимальных (137–353) уровней.

*Дорожная пыль.* Суммарный показатель загрязнения дорожной пыли Севастополя в среднем соответствует неопасному уровню (Zc 15), увеличиваясь от крупных (12) и средних дорог (12) к малым (18). Около 94% проб дорожной пыли



имеют неопасный уровень загрязнения (1–31) и 4% – умеренно опасный уровень (33–54). Наибольшие уровни  $Zc$  с опасным и очень опасным загрязнением дорожной пыли обнаружены в восточной (323) и западной частях Севастополя (65) во дворах, что представляет наибольшую экологическую опасность для городских жителей (рис. S4).

Во фракции  $PM_{10}$  пыли наблюдаются более высокие уровни загрязнения ТММ по сравнению с дорожной пылью (25). На разных типах дорог  $Zc$  увеличивается в ряду: средние (19) < крупные дороги (27) = малые (27), что соответствует среднему умеренно опасному уровню загрязнения. В частицах  $PM_{10}$  пыли контрастность аномалий ТММ во многих точках увеличивается. Очень опасное и опасное загрязнение зафиксировано на 3% территории в северной (126), восточной (179) и северо-западной частях города (71).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые детально изучено содержание ТММ в почвах, дорожной пыли и их фракциях  $PM_{10}$  в крупном промышленно-рекреационном городе Севастополь. Приоритетными поллютантами городских почв и дорожной пыли являются Pb, Zn, Sb, Cd, Sn, Cu, Mo, концентрации которых до 5–6 раз выше фоновых уровней и кларков земной коры. Распределение многих ТММ значительно различается в пределах города, отражая пространственную неоднородность загрязнения почв и пыли из-за наличия локальных источников воздействия. На фоне общей высокой антропогенной нагрузки локальные аномалии ТММ с экстремально высокими содержаниями в городских почвах и дорожной пыли приурочены к промышленным зонам и внутридворовым проездам, в десятки и сотни раз превышая фоновые значения.

При одинаковом составе приоритетных поллютантов в почвах, пыли и фракциях  $PM_{10}$  уровни их накопления в мелких частицах заметно больше. Это обусловлено высокой сорбционной емкостью частиц  $PM_{10}$ , которые являются главными носителями Zn, Bi, Cs (>65% от общего содержания), а также As, Pb, Sb, Cd, W, V, Ni, Co (>50%) в почвах и дорожной пыли Севастополя.

Наиболее значимыми факторами, оказывающими влияние на состав почв, дорожной пыли и частиц  $PM_{10}$ , являются терригенные источники (почвообразующие породы, выдувание почв), вклад которых составляет 37–39% для почв и их частиц  $PM_{10}$  и 30–50% – для дорожной пыли  $PM_{10}$  пыли. Другими источниками ТММ являются невыхлопные выбросы автотранспорта, которые обусловлены истиранием тормозных колодок, шин и дорожного покрытия, а также промышленные выбросы – объектов теплоэнергетики, строительства и предприятий металлообработки.

Повышенные уровни ТММ в почвах и дорожной пыли Севастополя в целом свидетельствует о низкоопасной или неопасной экологической обстановке. В тонкодисперсных фракциях  $PM_{10}$  почв и пыли интенсивность загрязнения увеличивается до средних умеренно опасных уровней, что подтверждает связь поллютантов с частицами  $PM_{10}$ . Из-за их подверженности выдуванию они способны активно мигрировать в атмосферном воздухе на дальние расстояния и, выпадая из атмосферы, накапливаться в почвах и на поверхности дорог, оказывая негативное воздействие на здоровье населения и отдыхающих.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность Е.В. Терской, Л.В. Добрыдневой, Г.Л. Шинкаревой, Д.В. Власову, А.Ю. Тришину, А.Ю. Руденко, Т.В. Дубровской, Д.Г. Сычевой за участие в полевых и лабораторных работах.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Полевые исследования выполнены в рамках Крымской экспедиции Русского географического общества (РГО); аналитические исследования выполнены при поддержке проекта РФФИ № 19-05-50101. Анализ и интерпретация данных проводили в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Будущее Планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. S1. Функциональное зонирование Севастополя.

Рис. S2. Фракционный состав ТММ в почвах и дорожной пыли Севастополя.

Рис. S3. Соотношение коэффициентов вариации содержаний ТММ в почвах, дорожной пыли и их фракциях  $PM_{10}$  в Севастополе.

Рис. S4. Суммарное загрязнение почв (а), частиц  $PM_{10}$  почв (б), дорожной пыли (в) и частиц  $PM_{10}$  пыли (г) в Севастополе.

Таблица S1. Значения факторных нагрузок для концентраций ТММ в почвах, дорожной пыли и их частицах  $PM_{10}$  в Севастополе.

Таблица S2. Коэффициенты корреляции ( $r$ ) для ТММ в почвах, дорожной пыли и их фракциях  $PM_{10}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Багрова Л.А., Боков В.А., Багров Н.В.* География Крыма. Киев: Лыбидь, 2001. 302 с.
2. *Вареник А.В., Боброва С.А., Еркушов В.Ю., Катунина Е.В., Мальченко Ю.А., Переверзев О.А.* Особенности поступления биогенных и загрязняющих веществ и радионуклидов с атмосферными осадками и аэрозолями в районе г. Севастополя и Крымского побережья // Тр. гос. океанографического ин-та. 2016. № 217. С. 209–221.
3. *Власов Д.В., Кукушкина О.В., Кошелева Н.Е., Касимов Н.С.* Уровни и факторы накопления металлов и металлоидов в придорожных почвах, дорожной пыли и их фракции  $PM_{10}$  в Западном округе Москвы // Почвоведение. 2022. № 5. С. 538–555. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22050112>
4. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
5. Доклад “О состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым в 2016 году”. Ижевск: ООО “Принт-2”, 2017.
6. *Дьяков Н.Н., Мальченко Ю.А., Боброва С.А., Рябинин А.И., Липченко А.Е., Клименко Н.П., Таранов В.В.* Фоновые характеристики гранулометрического состава аэрозолей г. Севастополя // Научно-исследовательские публикации. 2016. № 3(35). С. 5–13.
7. *Евстафьева Е.В., Богданова А.М., Минкина Т.М., Сушкова С.Н., Барановская Н.В., Манджиева С.С., Антоненко Е.М.* Содержание тяжелых металлов в почвах селитебных территорий Республики Крым // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 10. С. 19–29.
8. *Игнатов Е.И., Ясенева Е.В., Ясенева И.А.* Ранжирование прибрежных городов Крыма на основе экологических индикаторов // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2015. № 5. С. 58–61.
9. *Касимов Н.С., Безбердая Л.А., Власов Д.В., Лычагин М.Ю.* Металлы, металлоиды и бенз(а)пирен в микрочастицах почв и дорожной пыли Алушты // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1524–1538. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19120062>
10. *Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М.* Геохимия ландшафтов Восточной Москвы. М.: АПР, 2016. 276 с.
11. *Климова Ю.Ю., Косовская М.А.* Техногенное загрязнение прибрежной урбанизированной территории г. Севастополя // Энергетические установки и технологии. 2016. Т. 2. № 2. С. 57–67.
12. *Кречетов П.П., Дианова Т.М.* Химия почв. Аналитические методы исследования. М.: Географический факультет МГУ, 2009. 149 с.
13. *Новикова Л.Н., Новиков Ю.А.* Геохимическая классификация ландшафтов Крыма и их техногенное загрязнение // Ученые записки Крымского федерального ун-та им. В.И. Вернадского. География. Геология. 2008. Т. 21. № 3. С. 231–237.
14. *Подгородецкий П.Д.* Крым: Природа. Симферополь: Таврия, 1988. 192 с.
15. *Половицкий И.Я., Гусев П.Г.* Почвы Крыма и повышение их плодородия. Симферополь: Таврия, 1987. 152 с.
16. *Ревич Б.А.* Мелкодисперсные взвешенные частицы в атмосферном воздухе и их воздействие на здоровье жителей мегаполисов // Проблемы экологического мониторинга и моделирование экосистем. 2018. № 3. С. 53–78.
17. *Рябинин А.И., Боброва С.А., Салтыкова Л.В., Данилова Е.А.* Поступление химических элементов с атмосферными выпадениями в приморских районах Крыма в 2004–2008 годах // Морской гидрофизический журн. 2011. № 5. С. 30–39.
18. *Рябинин А.И., Мальченко Ю.А., Боброва С.А., Смирнова Л.А.* Химический состав атмосферных выпадений и аэрозолей в биосфере г. Севастополя и ЮБК по данным многоэлементного мониторинга // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: Институт природно-технических систем, 2016. С. 16.
19. *Селезнев А.А.* Тяжелые металлы в поверхностном грязевом осадке города Екатеринбурга // Известия Уральского гос. горного ун-та. 2018. Вып. 1(49). С. 46–54.
20. *Смирнова Л.Л., Рябинин А.И.* Миграция микробиоты и химических элементов в составе аэрозолей, побережье г. Севастополя (Черное море) // Научно-исследовательские публикации. 2016. № 3(35). С. 14–18.
21. *Совга Е.Е., Пасынков А.А., Андреева О.А.* Экологическое состояние прибрежно-морских районов Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. № 25–1. С. 169–180.
22. *Сухачева Е.Ю., Ревина Я.С.* Цифровая почвенная карта Южного берега Крыма // Почвоведение. 2020. № 4. С. 389–397.
23. *Фонова С.И.* Научно-методический аппарат оценки геоэкологического риска загрязнения тяжелыми металлами в зоне автодорог первой категории. Дис. ... к. г. н. Воронеж, 2017. 135 с.
24. *Чекмарева Т.М., Сидорова М.А.* Экологическая оценка антропогенной преобразованности ландшафтов пгт. Кача Севастопольского региона Крыма // Збірник наукових праць СНУЯЕтаП. 2013. С. 107–113.
25. Численность постоянного населения г. Севастополь. Управление федеральной службы государственной статистики по Республике Крым и г. Севастополю, 2022. <https://crimea.gks.ru/storage/mediabank/11111.pdf>
26. *Шкапенко В.В., Мусич Е.Г., Кадошников В.М., Кураева И.В., Войтюк Ю.Ю.* Биогеохимические особенности донных отложений прибрежной зоны Черного моря // Вісник Дніпропетровського університету. Геологія, географія. 2017. Т. 25. № 2. С. 129–135.
27. *Щекатурина Т.Л., Яковчук Ю.Н.* Динамическое загрязнение воздушного бассейна Балаклавского района г. Севастополя // Вестник МАНЭБ. 2016. Т. 21. № 1. С. 9–13.
28. *Ясенева Е.В.* Особенности распространения загрязняющих веществ в атмосфере от стационарных источников в Севастополе // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, геогр. 2007. № 4. С. 65–68.

29. Ясенева Е.В., Ясенева И.А. Содержание тяжелых металлов в почвах Севастополя // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2019. № 2(158). С. 34–37.
30. Ясенева И.А., Переверзев П.В. Использование ГИС-технологий для геоэкологической оценки города Севастополя // Интерактивная наука. 2017. № 6(16). С. 16–18.  
<https://doi.org/10.21661/r-451285>
31. Ясенева И.А., Ясенева Е.В. Заболеваемость детей как показатель экологической обстановки в Севастополе // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2020. Т. 26. Ч. 3. С. 62–77.  
<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-3-26-62-77>
32. Acosta J.A., Faz C.A., Kalbitz K., Jansen B., Martínez-Martínez S. Heavy metal concentrations in particle size fractions from street dust of Murcia (Spain) as the basis for risk assessment // J. Environ. Monitor. 2011. V. 13. P. 3087–3096.  
<https://doi.org/10.1039/c1em10364d>
33. Acosta J.A., Faz C.A., Martínez-Martínez S., Arocena J.M. Enrichment of metals in soils subjected to different land uses in a typical Mediterranean environment (Murcia City, southeast Spain) // Appl. Geochem. 2011. V. 26. P. 405–414.  
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.01.023>
34. Ajmone-Marsan F., Biasioli M., Kralj T., Grčman H., Davidson C.M., Hursthouse A.S., Madrid L., Rodrigues S. Metals in particle-size fractions of the soils of five European cities // Environ. Poll. 2008. V. 152. P. 73–81.
35. Alves C.A., Evtyugina M., Vicente A.M.P., Vicente E.D., Nunes T.V., Silva P.M.A., Duarte M.A.C., Pio C.A., Amato F., Querol X. Chemical profiling of PM<sub>10</sub> from urban road dust // Sci. Total Environ. 2018. V. 634. P. 41–51.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.338>
36. Amato F., Alastuey A., Karanasiou A., Lucarelli F., Nava S., Calzolari G., Severi M. et al. AIRUSE–LIFE+: A harmonized PM speciation and source apportionment in five southern European cities // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16. P. 3289–3309.  
<https://doi.org/10.5194/acp-16-3289-2016>
37. Amato F., Pandolfi M., Moreno T., Furger M., Pey J., Alastuey A., Bukowiecki N., Prevot A., Baltensperger U., Querol X. Sources and variability of inhalable road dust particles in three European cities // Atmos. Environ. 2011. V. 45(37). P. 6777–6787.
38. Bencharif-Madani F., Ali-Khodja H., Kemmouche A., Terrouche A., Lokorai K., Naidja L., Bouziane M. Mass concentrations, seasonal variations, chemical compositions and element sources of PM<sub>10</sub> at an urban site in Constantine, northeast Algeria // J. Geochem. Explor. 2019. V. 206. Article ID: 106356.  
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106356>
39. Bezberdaya L., Kosheleva N., Chernitsova O., Lychagin M., Kasimov N. Pollution Level, Partition and Spatial Distribution of Benzo(a)pyrene in Urban Soils, Road Dust and Their PM<sub>10</sub> Fraction of Health-Resorts (Alushta, Yalta) and Industrial (Sebastopol) Cities of Crimea // Water. 2022. V. 14. P. 561.  
<https://doi.org/10.3390/w14040561>
40. Birke M., Rauch U., Stummeyer J. Urban geochemistry of Berlin, Germany // Mapping the chemical environment of urban areas. Oxford: Wiley-Blackwell, 2011. P. 245–268.
41. Demetriades A., Birke M. Urban geochemical mapping manual: sampling, sample preparation, laboratory analysis, quality control check, statistical processing and map plotting. Brussels: EuroGeoSurveys, 2015. 162 p.
42. Facchinelli A., Sacchi E., Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils // Environ. Poll. 2001. V. 114. P. 313–324.  
<https://doi.org/00243-8>  
[https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00243-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00243-8)
43. Glennon M.M., Harris P., Ottesen R.T., Scanlon R.P., O'Connor P.J. The Dublin SURGE Project: Geochemical baseline for heavy metals in topsoils and spatial correlation with historical industry in Dublin, Ireland // Environ. Geochem. Health. 2014. V. 36. P. 235–254.  
<https://doi.org/10.1007/s10653-013-9561-8>
44. Grigoratos T., Martini G. Brake wear particle emissions: a review // Environ. Sci. Poll. Res. 2015. V. 22. №. 4. P. 2491–2504.
45. Gunawardana C., Goonetilleke A., Egodawatta P., Dawes L., Kokot S. Source characterisation of road dust based on chemical and mineralogical composition // Chemosphere. 2012. V. 87. №. 2. P. 163–170.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.12.012>
46. Harrison R.M., Jones A.M., Gietl J., Yin J., Green D.C. Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to nonexhaust traffic particles derived from atmospheric measurements // Environ. Sci. Technol. 2012. V. 46. P. 6523–6529.  
[https://doi.org/10.1016/j.chemosphere](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.12.012)
47. Harrison R.M., Jones A.M., Lawrence R.L. Major component composition of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> from roadside and urban background sites // Atmos. Environ. 2004. V. 38. № 27. P. 4531–4538.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.05.022>
48. Hu B., Wang J., Jin B., Li Y., Shi Z. Assessment of the Potential Health Risks of Heavy Metals in Soils in a Coastal Industrial Region of the Yangtze River Delta // Environ. Sci. Pollut. Res. 2017. V. 24. P. 19816–19826.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-017-9516-1>
49. Hu X., Zhang Y., Luo J., Wang T., Lian H., Ding Z. Bioaccessibility and health risk of arsenic, mercury and other metals in urban street dusts from a mega-city, Nanjing, China // Environ. Poll. 2011. V. 159. P. 1215–1221.
50. Huang B., Yuan Z., Li D., Zheng M., Nie X., Liao Y. Effects of soil particle size on the adsorption, distribution, and migration behaviors of heavy metal(loid)s in soil: a review // Environ. Sci.: Processes & Impacts. 2020. V. 22. P. 1596–1615.
51. Hulskotte J.H.J., Roskam G.D., Denier van der Gon H.A.C. Elemental composition of current automotive braking materials and derived air emission factors // Atmos. Environ. 2014. V. 99. P. 436–445.
52. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Nabelkina K.S., Ryzhov A.V. Physicochemical properties of road dust in Moscow // Geogr., Environ., Sustain. 2019. V. 12. № 4.

- P. 96–113.  
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-55>
53. *Khademi H., Gabarron M., Abbaspour A., Martinez-Martinez S., Faz A., Acosta J.A.* Distribution of metal(loid)s in particle size fraction in urban soil and street dust: influence of population density // *Environ. Geochem. Health.* 2020. V. 42. P. 4341–4354.
  54. *Kong S., Lu B., Ji Y., Zhao X., Bai Z., Xu Y., Liu Y., Jiang H.* Risk assessment of heavy metals in road and soil dusts within PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>100</sub> fractions in Dongying city, Shandong Province, China // *Journal of environmental monitoring.* 2012. V. 14. P. 791–803.
  55. *Konstantinova E., Minkina T., Sushkova S., Konstantinov A.D. Rajput V., Sherstnev A.* Urban soil geochemistry of an intensively developing Siberian city: A case study of Tyumen, Russia // *J. Eement.* 2019. V. 239. P. 366–375.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.095>
  56. *Konstantinova E., Minkina T., Konstantinov A., Sushkova S., Antonenko E., Kurasova A., Loiko S.* Pollution status and human health risk assessment of potentially toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust of Tyumen city, Russia // *Environ. Geochem. Health.* 2022. V. 44. P. 409–432.  
<https://doi.org/10.1007/s10653-020-00692-2>
  57. *Krupnova T.G., Rakova O.V., Gavrilkina S.V., Antoshkina E.G., Baranov E.O., Yakimova O.N.* Road dust trace elements contamination, sources, dispersed composition, and human health risk in Chelyabinsk, Russia // *Chemosphere.* 2020. V. 261.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127799>
  58. *Ladonin D.V., Mikhaylova A.P.* Heavy Metals and Arsenic in Soils and Street Dust of the Southeastern Administrative District of Moscow: Long-Term Data // *Eurasian Soil Sci.* 2020. V. 53. P. 1635–1644.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229320110095>
  59. *Lanzerstorfer C.* Heavy metals in the finest size fractions of road-deposited sediments // *Environ. Pollut.* 2018. V. 239. P. 522–531.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.063>
  60. *Li G., Sun G.-X., Ren Y., Luo X.-S., Zhu Y.-G.* Urban soil and human health: a review // *European J. Soil Sci.* 2018. V. 69. P. 196–215.
  61. *Li H., Ji H., Shi C., Gao Y., Zhang Y., Xu X., Ding H., Tang L., Xing Y.* Distribution of heavy metals and metalloids in bulk and particle size fractions of soils from coal-mine brownfield and implications on human health // *Chemosphere.* 2017. V. 172. P. 505–515.
  62. *Li Z., Ma Z., van der Kuijp T.J., Yuan Z., Huang L.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment // *Sci. Total Environ.* 2014. V. 468–469. P. 843–853.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.090>
  63. *Ljung K., Torin A., Smirk M., Maley F., Cook A., Weinstein P.* Extracting Dust from Soil: A Simple Solution to a Tricky Task // *Sci. Total Environ.* 2008. V. 407. P. 589–593.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.09.007>
  64. *Luo X.-S., Yu S., Li X.-D.* Distribution, availability, and sources of trace metals in different particle size fractions of urban soils in Hong Kong: Implications for assessing the risk to human health // *Environ. Poll.* 2011. V. 159. P. 1317–1326.
  65. *Lv J., Liu Y., Zhang Z., Dai J., Dai B., Zhu Y.* Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in Soils of Ju Country (Eastern China) Using Multivariate and Geostatistical Approach // *J. Soils Sediments.* 2015. V. 15. P. 163–178.  
<https://doi.org/10.1007/s11368-014-0937-x>
  66. *Moskovchenko D., Pozhitkov R., Soromotin A., Tyurin V.* The Content and Sources of Potentially Toxic Elements in the Road Dust of Surgut (Russia) // *Atmosphere.* 2022. V. 13. P. 30.  
<https://doi.org/10.3390/atmos13010030>
  67. *Nekhoroshkov P., Peshkova A., Zinicovscaia I., Vergel K., Kravtsova A.* Assessment of the Atmospheric Deposition of Heavy Metals and Other Elements in the Mountain Crimea Using Moss Biomonitoring Technique // *Atmosphere.* 2022. V. 13. P. 573.  
<https://doi.org/10.3390/atmos13040573>
  68. *Oliver M.A., Gregory P.J.* Soil, food security and human health: a review // *Eur. J. Soil Sci.* 2015. V. 66. P. 257–276.
  69. *Padoan E., Romé C., Ajmone-Marsan F.* Bioaccessibility and size distribution of metals in road dust and roadside soils along a peri-urban transect // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 601–602. P. 89–98.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.180>
  70. *Pant P., Baker S.J., Shukla A., Maikawa C., Godri Pollitt K.J., Harrison R.M.* The PM<sub>10</sub> fraction of road dust in the UK and India: Characterization, source profiles and oxidative potential // *Sci. Total Environ.* 2015. V. 530–531. P. 445–452.
  71. *Ramírez O., Sanchez de la Campa A.M., Amato F., Moreno T., Silva L.F., de la Rosa J.D.* Physicochemical characterization and sources of the thoracic fraction of road dust in a Latin American megacity // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 652. P. 434–446.
  72. *Reimann C., de Caritat P.* Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors // *Sci. Total Environ.* 2005. V. 337. P. 91–107.
  73. *Rudnick R., Gao S.* Composition of the continental crust // *Treatise Geochem.* V. 4. 2014. P. 1–51.  
<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-095975-7.00301-6>
  74. *Samonova O., Aseyeva E.* Particle size partitioning of metals in humus horizons of two small erosional landforms in the middle Protva basin – a comparative study // *Geogr., Environ., Sustain.* 2020. V. 13. P. 260–271.  
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-116>
  75. *Seinfeld J., Pandis S.* Atmospheric chemistry and physics. John Wiley & Sons Inc., 2006. 1248 p.
  76. *Seleznev A.A., Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P.* Urban geochemical changes and pollution with potentially harmful elements in seven Russian cities // *Sci. Rep.* 2020. V. 10.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-58434-4>
  77. *Smyrnova L., Katunina E., Rjabinin A., Anninskaja I.* The impact of atmospheric precipitation (rainfalls) on the sea-surface microlayer in the Sevastopol coastal waters (Crimea, The Black Sea) // *Ecologica Montenegro.* 2017. V. 14. P. 30–38.

78. *Sutherland R.A., Tack F.M.G., Ziegler A.D.* Road-deposited sediments in an urban environment: A first look at sequentially extracted element loads in grain size fractions // *J. Hazardous Materials*. 2012. V. 225–226. P. 54–62.
79. *Thorpe A., Harrison R.M.* Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review // *Sci. Total Environ.* 2008. V. 400. №. 1–3. P. 270–282.
80. *Vlasov D., Kosheleva N., Kasimov N.* Spatial distribution and sources of potentially toxic elements in road dust and its PM<sub>10</sub> fraction of Moscow megacity // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 761. P/ 143267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143267>
81. *Vlasov D., Ramirez O., Luhar A.* Road Dust in Urban and Industrial Environments: Sources, Pollutants, Impacts, and Management // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 607. <https://doi.org/10.3390/atmos13040607>
82. *Vystavna Y., Rushenko L., Diadin D., Klymenko O., Klymenko M.* Trace metals in wine and vineyard environment in southern Ukraine // *Food Chem.* 2014. V. 146. P. 339–344.
83. *Wang X.S., Qin Y., Chen Y.K.* Heavy metals in urban roadside soils, part 1: effect of particle size fractions on heavy metals partitioning // *Environ. Geology*. 2006. №. 7. V. 50. P. 1061–1066.
84. *Wiseman C.L.S., Levesque C., Rasmussen P.E.* Characterizing the sources, concentrations and resuspension potential of metals and metalloids in the thoracic fraction of urban road dust // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 786. P. 147467. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147467>
85. *Yutong Z., Qing X., Shenggao L.* Distribution, bioavailability, and leachability of heavy metals in soil particle size fractions of urban soils (northeastern China) // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2016. V. 23. P. 14600–14607.
86. *Zhang J., Wu L., Zhang Y., Li F., Fang X., Mao H.* Elemental composition and risk assessment of heavy metals in the PM<sub>10</sub> fractions of road dust and roadside soil // *Particulology*. 2019. V. 44. P. 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.09.003>

## Heavy Metals and Metalloids in Soils, Road Dust and Their PM<sub>10</sub> Fractions in Sebastopol: Levels, Sources and Danger of Pollution

L. A. Bezberdaya<sup>1</sup>\*, N. S. Kasimov<sup>1</sup>, O. V. Chernitsova<sup>1</sup>, A. N. Tkachenko<sup>1</sup>, and M. Yu. Lychagin<sup>1</sup>

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

\**e-mail: lilia\_8888@mail.ru*

For the first time in the large industrial and recreational city of Sebastopol, accumulation levels, spatial distribution and sources of heavy metals and metalloids (HMM) in urban soils, road dust and their PM<sub>10</sub> particles (with a diameter of less than 10 microns) have been established in various functional zones and on roads of different sizes. The analysis of HMM content was carried out by ICP-MS and ICP-AES methods. The main pollutants of urban soils and road dust are Pb, Zn, Sb, Cd, Sn, Cu, Mo. The results obtained showed an uneven spatial distribution of individual TMMS within the city due to the influence of terrigenous and anthropogenic factors. In the PM<sub>10</sub> particles of soils and dust, the concentrations of almost all HMM are noticeably higher than the total contents, the proportion of Zn, Bi, Cs is more than 65% of the total content, and As, Pb, Sb, Cd, Pb, W, V, Ni, Co is about 50%. The greatest danger is posed by PM<sub>10</sub> particles, which form a greater number of anomalies with an extreme level of HMM pollution in industrial zones and courtyard driveways of residential zones.

*Keywords:* PM<sub>10</sub> particles, urban soil pollution, particle size fractions, enrichment, Urban Technosols