

ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА СОВРЕМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ НАНОСОВ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

А. А. Селезнев¹, Е. С. Душевина^{1,2}

¹ *Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

² *Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия*

Цель исследования – разработка подхода к проведению гранулометрического анализа современных поверхностных наносов городской среды. Задачи исследования:

– *отбор проб наносов на территориях городов, находящихся в разных природных климатических, географических, геологических зонах и различающихся промышленной специализацией;*

– *разделение образцов на размерные фракции последовательно путем отмучивания тонких фракций пыли размером 2–10 и 10–50 мкм и мокрого просеивания фракций мелкого и грубого песка 50–100, 100–250, 250–1000 и > 1000 мкм;*

– *определение в полученных гранулометрических фракциях 2–10, 10–50, 50–100, 100–250 и 250–1000 мкм концентраций Al и Pb методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и содержания кварца методом рентгеноструктурного анализа;*

– *валидация полученных данных гранулометрического состава проб наносов путем анализа статистических параметров содержания Al, Pb и кварца в навесках.*

Всего отобрано 157 проб наносов на селитебных территориях в восьми городах России: Владивостоке, Екатеринбурге, Мурманске, Нижнем Новгороде, Новосибирске, Ростове-на-Дону, Тюмени и Челябинске. Пробы были разделены на шесть гранулометрических фракций. Получены распределения гранулометрического состава проб осадка в городах, распределения по гранулометрическим фракциям содержания Al, Pb и кварца.

Получены различные специфические паттерны распределения Al, Pb и кварца в гранулометрических фракциях в городах. Предложенный подход позволил уверенно разделить на размерные фракции осадок на жилых территориях в городах. Охарактеризовать содержание Al, Pb и кварца в навесках можно путем оценки статистических параметров для гранулометрической фракции. Полученные закономерности распределения вещественного состава осадков по гранулометрическим фракциям сопоставимы с результатами других исследований.

Ключевые слова: *урбанизированная среда; современные поверхностные наносы; гранулометрический состав; отмучивание; просеивание; металлы; минералы.*

1. Введение

Определение гранулометрического состава компонентов окружающей среды представляет собой одну из первостепенных задач в понимании процессов миграции и накопления загрязнения. В различных гранулометрических фракциях по-разному происходит процесс накопления поллютантов. При этом мелкодисперсные фракции накапливают больше поллютантов, чем грубодисперсные [1–3].

Гранулометрический анализ проводят для объектов природного и техногенного происхождения:

- почв природных и урбанизированных зон [1, 4–8],

- донных отложений, взвешенного вещества в воде водных объектов [9–12],
- атмосферных выпадений [13–18],
- горных пород [19],
- твердого материала снега [20, 21],
- различных видов поверхностных осадков с городских территорий (дорожной пыли, отложений ливневой канализации и др.) [1–3, 14, 22],
- смывов с листьев и трав [1, 18, 23, 24].

Основные направления в исследованиях гранулометрического состава компонентов окружающей среды:

- исследование путей и механизмов миграции материала разных размерных фракций и потенциально опасных элементов в них в объектах окружающей среды [6, 12],
- определение генезиса частиц разного размера [6],
- исследование механизмов закрепления загрязнения в разных размерных фракциях, прогнозирование путей удаления поллютантов и самоочищения территорий, конструирование почвенных субстратов для рекультивации территорий [25],
- анализ состава легких респирабельных фракций атмосферных аэрозолей, пыли РМ 2,5–10, которые представляют собой транспортирующую среду для загрязнителей в урбанизированных зонах, оценка экологического риска для населения от поллютантов [14, 26–28],
- изучение биодоступности потенциально опасных элементов [29–32],
- изучение процессов, происходящих при деградации материала свалок, отходов при захоронении и складировании [33, 34].

Общепринятые классификации гранулометрического состава (Качинского, международная, американская) имеют схожие, но различающиеся диапазоны размеров частиц (например, мелкая пыль имеет диапазон 2–50 мкм и < 64 мкм в разных классификациях) [35–39]. Вследствие этого исследователи используют различные классификации при определении гранулометрического состава объектов.

Для получения навески вещества нужной размерной фракции используют следующие методы: просеивание (мокрое, сухое, ручное и механическое) [2, 40], отмучивание [39], магнитную и электростатическую сепарацию [41–43]. К методам гранулометрического анализа без физического получения материала относят лазерную гранулометрию, ареометрический метод, обработку изображений с микроскопа [39, 42, 44–46].

При просеивании используют сита из металлов и сплавов (латунь), синтетических материалов; бумажные, мембранные и тканевые фильтры. Сухое и мокрое просеивание применяется для разделения горных пород, песка, почвы, дорожной пыли. Мокрое – для материалов, которые не могут быть просеяны в сухом состоянии (материал присутствует в виде суспензии или когда необходимо просеять очень мелкий образец, например, ил или донные осадки водоемов). Ручное просеивание используется для небольших образцов. Механическое – для большого количества или просеивания больших проб и осуществляется с помощью просеивающих машин и вибросит. При мокром просеивании агрегаты разрушаются, поэтому весь материал пробы разделяется на гранулометрические фракции. При этом получаемое распределение материала пробы по гранулометрическим фракциям более достоверно в отличие от распределения, получаемого при сухом просеивании. Просеивание не подходит для анализа очень мелких или очень крупных частиц, отмечают ошибочные результаты для фракций малого размера [47, 48]. Точность результатов зависит от качества сит и правильности их использования. Возможно получение разных результатов при использовании разных наборов сит из-за закупорки ячеек, дефектов и выхода сит из строя при просеивании большого количества материала. Качество результатов гранулометрического анализа, получаемых ситовым

методом, зависит от качества образца, размера сит, метода встряхивания (ручной и механический), времени просеивания и метода калибровки сит [2, 3, 49–52].

Отмучивание не требует сложного и дорогостоящего оборудования, позволяет работать с пробами широкого диапазона размеров частиц, однако проведение процедуры требует большого количества воды [1, 9, 41]. К недостаткам можно отнести сложности с отмучиванием частиц мелких размеров (< 2 мкм) из-за влияния броуновского движения во время осаждения, а также длительное время отстаивания образцов. Подход отмучивания основан на допущении однородной плотности и сферичности всех частиц, но, как правило, объекты окружающей среды неоднородны по составу, а отдельные частицы не имеют сферической формы. Качество результатов отмучивания зависит от размера, формы и плотности частиц, вязкости и температуры среды, электростатических и адсорбционных явлений в ней [39].

Преимущества лазерной, магнитной и инфракрасной гранулометрии обусловлены возможностью анализа небольшого количества используемого материала, малым временем анализа, хорошей воспроизводимостью и точностью результатов, простой калибровкой гранулометра, измерением большого диапазона размеров частиц, возможным определением точного размера отдельных частиц, площади поверхности, количества зерен в образце. Основные недостатки перечисленных методов заключаются в том, что невозможно физическое получение материала для его дальнейшего вещественного анализа; оценка количества мелкой фракции может быть произведена некорректно; форма частиц может влиять на результат определения состава, как и минеральный состав частиц – на результат определения гранулометрического состава [44, 45, 53–56].

Анализ изображений имеет высокую точность, скорость, низкую стоимость, высокую воспроизводимостью результатов, а также автоматизирован. На основе его результатов могут быть смоделированы условия распределения частиц в исследуемом объекте. Основной недостаток метода – сложность достижения репрезентативности отдельных навесок из пробы для получения и анализа изображений, т. е. число взятых для наблюдения частиц невелико по отношению ко всей выборке. Отбор материала в навеску для цифрового анализа происходит вручную. Результат зависит от применяемого оборудования, качества изображений, размеров частиц [53, 57–59].

Комбинирование разных подходов к гранулометрическому анализу (отмучивание и просеивание, мокрое и сухое просеивание, лазерная гранулометрия, просеивание и др.) позволяет избавиться от недостатков каждого метода в отдельности [55, 60, 61]. К тому же комбинирование методов позволяет получить более достоверные данные о зерновом составе объекта. Как правило, комбинируют методы для получения разных размерных фракций материала. Так, просеивание позволяет отделить крупные фракции, но не всегда эффективно для анализа мелких частиц. В то время как ареометрический метод хорошо работает с мелкими фракциями, но может быть менее точным для крупных частиц [55]. Лазерно-дифракционный метод гранулометрического анализа иловых донных отложений дает заниженные данные о содержании песчаных фракций, поэтому их содержание в пробе определяют методом просеивания [61].

На городских территориях непрерывно происходят процессы современного седиментогенеза [62]. Поверхности, материалы, конструкции испытывают механическое разрушение. Образуются различные типы современных поверхностных отложений: дорожная пыль, отложения понижений микрорельефа, тротуарная пыль, отложения ливневой канализации [1, 12, 63]. Современные осадки – одна из основных сред для переноса и накопления загрязнения на городских территориях, неточечный источник загрязнения городской среды. Процессы переноса поллютантов и вещества необходимо учитывать для определения их воздействия на человека и обеспечения комфортной и качественной городской среды. При определении гранулометрического

состава различных типов городских отложений используется отмучивание либо просеивание.

Целью работы было обоснование эффективности применения комбинации подходов отмучивания и мокрого просеивания для определения гранулометрического состава с получением материала гранулометрических фракций современных поверхностных депонированных городских осадков.

2. Материалы и методы

2.1. Характеристика объектов опробования

В качестве объекта исследования выбраны современные поверхностные отложения (осадок) локальных понижений микрорельефа на внутривидовых территориях в жилых кварталах с многоэтажной застройкой города [63–65]. Осадок рассматривается как промежуточное депо седиментационного каскада в селитебной зоне города. Образование осадка увеличивается при нарушении технологий производства земляных работ, при разрушении газонных, грунтовых и дорожных покрытий проезжающими и паркующимися автомобилями, нарушении технологий благоустройства и содержания территорий города, а также в местах, где не зарегулирован сток атмосферных осадков [66]. Мощность отложений варьируется в пределах территории квартала и составляет в среднем 5 см. На рис. 1 показаны примеры накопления и распространения осадков.



Рис. 1. Накопление современных поверхностных осадков на внутридворовых территориях жилых кварталов с многоквартирными домами в городе (а – Владивосток, б – Нижний Новгород, в – Ростов-на-Дону, г – Новосибирск)

2.2. Характеристика обследованных городов

Опробование осадка проводилось в восьми городах России, расположенных в разных природных климатических, географических, геологических и промышленных зонах [64]. В городах происходит интенсивная застройка, развитие территорий, строительство автодорог. Краткое описание территорий обследованных городов приведено в табл. 1.

Таблица 1. Описание особенностей исследуемых городов России

Город, численность населения (млн чел.) / количество автомобилей на 1 000 человек в 2023 г.	Климат, средняя температура июля / января (°С)	Географические и геологические особенности территории	Основные отрасли промышленности
Владивосток, 0,6 / 699	Умеренно муссонный, 18,1 / –11,9	Полуостров Муравьева-Амурского, тектонический горст, сопки, холмы, долины, террасы; андезиты, риолиты, базальты, граниты, изветняки; аллювиальные отложения	Судостроение, судоремонт, машиностроение, химическая, пищевая (рыбопереработка), морской порт, электростанции на природном газе
Екатеринбург, 1,54 / 423	Умеренно континентальный, 19 / –13	Восточный склон Уральских гор, холмистые равнины вдоль реки Исети; граниты, габбро, клинопироксениты, серпентиниты; элювий, делювий, глины суглинки	Машиностроение, металлургия, металлообработка, электростанции на природном газе
Мурманск, 0,27 / 343	Атлантико-арктический умеренный, 14,3 / –10,8	Северо-восточная часть Балтийского щита, морские террасы, пологие возвышенности и долины; метаморфический комплекс, гнейсы, гранитоиды; осадочные породы: песчаные суглинки, биогенные отложения	Машиностроение, судоходство, морской порт, металлообработка, пищевая, электростанции на угле и мазуте
Нижний Новгород, 1,3 / 270	Влажный континентальный, 19,7 / –8,9	Русская платформа, Волго-Окская возвышенность; осадочные породы разного возраста, аллювиальные, элювиальные и делювиальные отложения	Машиностроение, судостроение, речное судоходство, электростанции на природном газе
Новосибирск, 1,64 / 282	Континентальный, 19,4 / –16,5	Приобское плато Западно-Сибирской равнины, берега реки Обь, остроги Салаирского кряжа; порфириты, граниты; осадочные породы морского генезиса; аллювиальные террасы	Машиностроение, металлообработка, химическая, приборостроение, гидроэнергетика, электростанции на угле
Ростов-на-Дону, 1,1 / 289	Умеренно континентальный, 23,4 / –3	Восточно-Европейская плита, Ростовский выступ, берега реки Дон, пески, глины, гравий, галька, известняки, ракушечники, алевролиты и мергели, пески	Машиностроение, речное судоходство, пищевая промышленность
Тюмень, 0,77 / 363	Умеренный континентальный, 18,8 / –15	Западно-Сибирская равнина, Тюменский прогиб, осадочные породы, аллювиальные отложения, пески	Нефтепереработка, металлообработка, машиностроение
Челябинск, 1,2 / 269	Умеренный, 19,3 / –14,1	Южный Урал (граниты), западный борт Западно-Сибирской плиты (осадочные породы)	Цветная и черная металлургия, химическая, машиностроение, угольные электростанции

2.3. Отбор проб

Отбор проб осадка проводился по двум схемам. По первой схеме на территории города по нерегулярной сети отбиралось не менее 40 проб отложений из локальных понижений микрорельефа [63–65]. Из них выбиралось случайным образом 10 проб для дальнейшего анализа. Согласно второй схеме на территории города выбиралось пять типичных жилых кварталов, располагающихся в разных районах [67]. В каждом квартале на внутривортовой территории отбирались пробы отложений локальных

понижений микрорельефа. Для проб проводился гранулометрический анализ, в гранулометрических навесках определялся элементный и минеральный состав.

Проба представляла собой сборную пробу отложений из понижений микрорельефа по 3–5 локализациям на внутривортовой территории квартала. Масса пробы составляла 1–1,5 кг. Проба отбиралась лопатой или совком.

2.4. Оценка времени осаждения частиц

При проведении отмучивания время осаждения частиц размером > 10 и > 50 мкм выбиралось по литературным данным, представленным А. Ф. Вадюниной и З. А. Корчагиной [39]. Результаты оценки времени осаждения частиц почвы, представленные в работе, показаны в табл. 2.

Таблица 2. Статистические параметры распределения времени осаждения частиц размером > 10 и > 50 мкм из литературных данных [39]

Показатель	Фракция, мкм	
	> 10	> 50
Мин.–макс.	815–1591	82–159
СА	1 142	114
СГ	1 128	113
СОткл.	183	18
Мед.	1 121	112
95 % ДИ	±42	±4

СА – среднее арифметическое, СГ – среднее геометрическое, СОткл. – стандартное отклонение, Мед. – медиана, ДИ – доверительный интервал

Высота столба взвеси (см), содержащей частицы нужного размера, рассчитывалась по формуле Стокса:

$$H = t U = t \frac{2}{9} \times \frac{D^2}{4} \times g \times \frac{d_1 - d}{\eta}, \quad (1)$$

где t – соответствует СА времени осаждения частиц в табл. 2, с; U – скорость падения частицы, см/с; D – диаметр частицы, см; g – ускорение свободного падения 981 см/с²; d_1 – плотность частицы, г/см³; d – плотность воды, г/см³; η – вязкость воды при данной температуре, г/(см·с) [39].

При расчете было принято:

- форма всех частиц сферическая;
- нормальные условия проведения отмучивания в лаборатории;
- вязкость $\eta = 0,01006$ г/(см·с) соответствует вязкости дистиллированной воды при температуре 20 °С, плотность составляет 0,998230 г/см³ [39];
- частицы имеют одинаковую плотность 2,55 г/см³;
- высота столба жидкости 10 см.

Для проведения отмучивания в стакане диаметром 10 см была получена высота столба взвеси не более 10 см, что примерно соответствует объему взвеси 700 мл.

2.5. Подготовка и гранулометрическое разделение проб

На этапе подготовки из отложений удалялись крупные корни, обломки горных пород и посторонние включения. Пробы высушивались до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при температуре 59 °С. Высушенная проба измельчалась пестиком с резиновым наконечником и перемешивалась, затем просеивалась через сито с размером ячеек 3 мм. Из каждой пробы методом квартования отбиралась представительная навеска массой 100–300 г для гранулометрического анализа.

Для проведения фракционирования пробы использовались:

- стаканы лабораторные объемом 1 000 мл,
- стеклянная палочка,
- сита лабораторные с размером ячеек: 100, 250 и 1 000 мкм,
- пестик с резиновым наконечником,
- лотки пластиковые,
- емкости для накопления суспензий,
- дистиллированная вода комнатной температуры,
- прибор вакуумного фильтрования, состоящий из колб Бунзена с воронками Бюхнера, соединенных параллельно,
- бумажный фильтр «синяя лента» с размером пор 2 мкм (ГОСТ 12026–76),
- бумажный фильтр «красная лента» с размером пор 8 мкм (ГОСТ 12026–76),
- весы лабораторные.

Гранулометрический анализ проводился пошагово.

Шаг 1 – равные порции навески высыпались в стаканы, заливались водой. Смесь отстаивалась в течение 2 ч для полного перемешивания материала с водой.

Шаг 2 – получение фракции 2–10 мкм. Материал в стаканах взмучивался стеклянной палочкой. После осаждения частиц размером > 10 мкм в течение 20 мин столб суспензии высотой 10 см (примерно 700 мл), содержащий фракцию < 10 мкм и воду, сливался из стаканов в емкость. Остаток в стаканах заливался водой до 1 л и снова взмучивался. Такая процедура отмучивания повторялась многократно до достижения прозрачной воды в стаканах. Накопленная суспензия с фракцией < 10 мкм фильтровалась через фильтр «синяя лента». Фильтр с твердым материалом высушивался при комнатной температуре на пластиковом лотке.

Шаг 3 – получение фракции 10–50 мкм. Материал с остатком в стаканах после шага 2 (частицы > 10 мкм) заливался водой и взмучивался. После осаждения частиц размером > 50 мкм в течение 2 мин столб суспензии с фракцией 10–50 мкм сливался в емкость. Остаток в стаканах заливался водой. Процедура отмучивания также повторялась многократно до прозрачной воды в стаканах. Накопленный объем воды с фракцией 10–50 мкм фильтровался через фильтр «красная лента». Фильтр с твердым материалом также высушивался при комнатной температуре.

Шаг 4 – получение фракции 50–100 мкм. Остаток навески после шагов 2 и 3 просеивался на сите с размером ячеек 100 мкм с добавлением дистиллированной воды. Агрегаты дополнительно истирались вручную пестиком с резиновым наконечником. Полученный материал фракции 50–100 мкм высушивался при комнатной температуре.

Шаг 5 – получение фракции 100–250 мкм. Остаток навески после выполнения шагов 2–4 просеивался на сите с размером ячеек 250 мкм с добавлением дистиллированной воды. Агрегаты дотирались пестиком с резиновым наконечником. Материал фракции 100–250 мкм высушивался при комнатной температуре.

Шаг 6 – получение фракций 250–1 000 и > 1 000 мкм. Остаток пробы просеивался на сите с размером ячеек 1 000 мкм и с добавлением дистиллированной воды. Агрегаты дополнительно дотирались пестиком с резиновым наконечником. Полученный после просеивания материал фракций 250–1 000 и > 1000 мкм высушивался при комнатной температуре.

Воздушно-сухой материал гранулометрических фракций взвешивался на аналитических весах с погрешностью до сотых долей грамма. Гранулометрический состав пробы вычислялся как:

$$X = \frac{m_n}{M} \times 100, \% \quad (2)$$

где X – доля фракции в навеске; M – масса навески, г; m_n – масса фракции n , г.

2.6. Определение вещественного состава гранулометрических навесок

Элементный состав навесок определялся методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре ELAN 9000 фирмы Perkin Elmer (США) согласно Методике выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. Анализ проводился в Химико-аналитическом центре ИПЭ УрО РАН. Минеральный состав определялся на дифрактометре XRD-7000 фирмы Shimadzu (Япония) с использованием программного обеспечения Siroquant. Состав отдельных минеральных групп уточнялся с использованием дериватографа Diamond TG/DTA фирмы Perkin Elmer (США). Определение минерального состава проводилось в Центре коллективного пользования «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН.

2.7. Валидация подхода

Для проверки работоспособности подхода (валидации) и его пригодности получать данные о состоянии объектов окружающей среды (верификации):

- исследовались статистические параметры распределения массовой доли гранулометрических фракций осадка в разных городах;
- исследовались статистические параметры распределения содержания Al, Pb и кварца по гранулометрическим фракциям в осадке в разных городах;
- в части достоверности разделения материала на гранулометрические фракции выборки полученных значений содержания Al, Pb и кварца в гранулометрических фракциях в осадке в городах сравнивались попарно согласно критерию Манна – Уитни;
- полученные распределения массовой доли гранулометрических фракций, содержания Al, Pb и кварца, сравнивались с данными о составе почв, дорожной пыли на городских территориях как объектов близких по составу и свойствам к исследуемому осадку из локальных понижений микрорельефа.

Свинец считается одним из наиболее распространенных поллютантов в городской среде. Его содержание значительно выше, чем природное (в том числе кларк). Основным источником загрязнения свинцом городских территорий считается автомобильный транспорт и выбросы предприятий. Алюминий – наиболее распространенный металл в земной коре. Кварц, самый распространенный минерал в земной коре, имеет высокую твердость и наименее подвержен выветриванию [68].

3. Результаты

Пробы осадка отбирались в период 2018–2022 гг. Число проанализированных проб представлено в табл. 3.

Таблица 3. Число проб осадка, в которых проведен вещественный анализ

Город	Число проб	
	Схема 1	Схема 2
Владивосток	10	9
Екатеринбург	10	9
Мурманск	10	14
Нижний Новгород	10	15
Новосибирск	10	11
Ростов-на-Дону	10	12
Тюмень	–	15
Челябинск	–	12

3.1. Гранулометрический состав осадка

В табл. 4 и на рис. 2 показаны статистические параметры распределения гранулометрического состава проб осадка в городах. Гранулометрический состав отложений различается на территориях разных городов. Распределение материала осадка по гранулометрическим фракциям на территории города имеет неравномерный характер. В осадке преобладают средне- и крупнопесчаные фракции размером > 100 мкм.

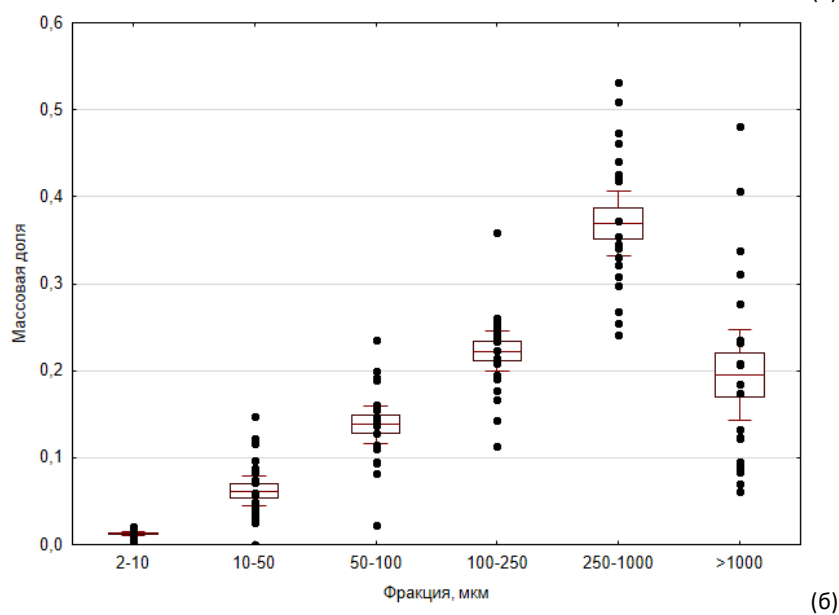
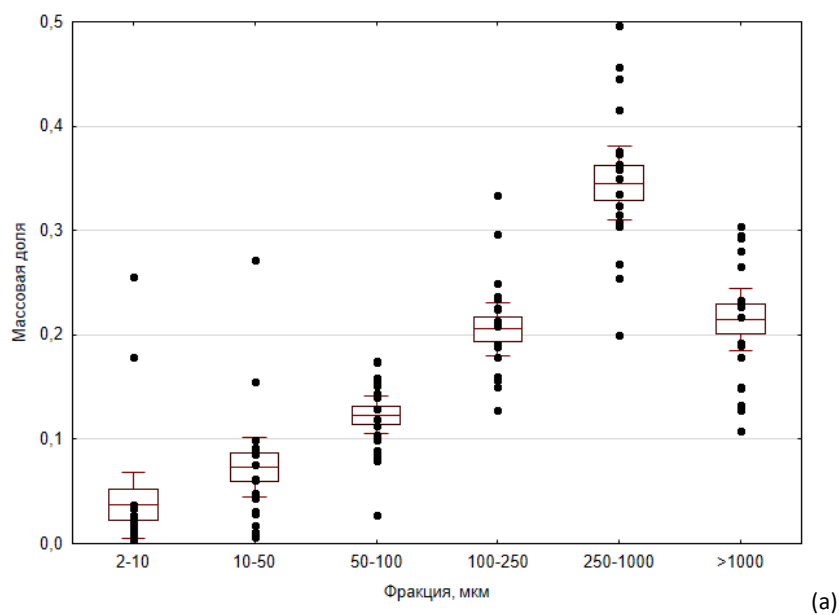
Таблица 4. Статистические параметры распределения гранулометрического состава проб осадка в городах

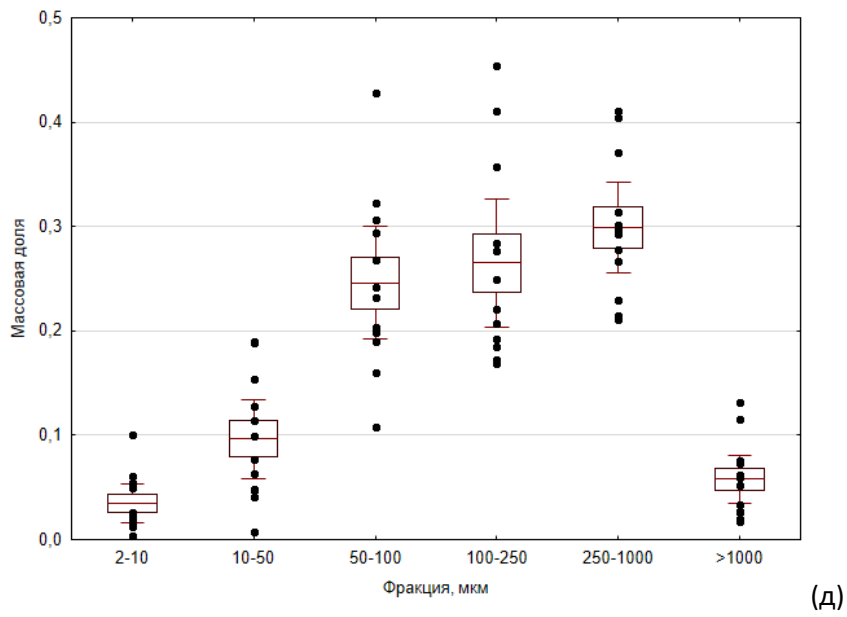
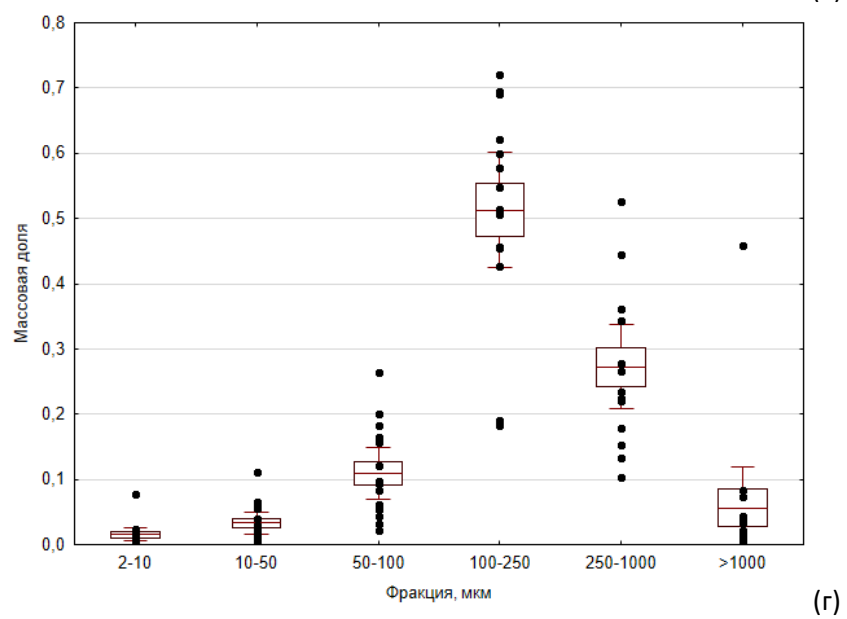
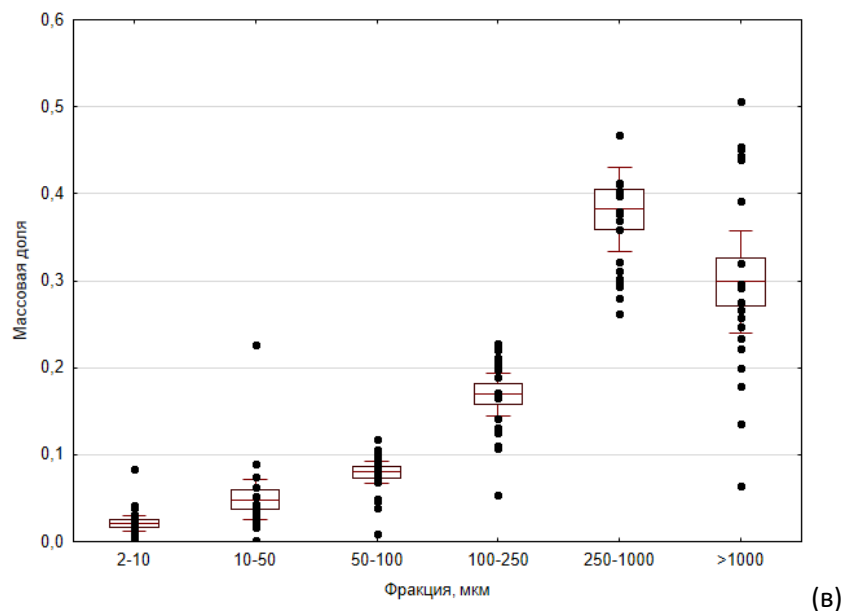
Фракция, мкм	N	СА	СГ	Мед.	СОкл.	КВ, %
Екатеринбург						
2–10	19	0,04	0,02	0,01	0,07	176
10–50	19	0,07	0,05	0,06	0,06	82
50–100	19	0,12	0,12	0,13	0,04	31
100–250	19	0,21	0,20	0,21	0,05	25
250–1 000	19	0,35	0,34	0,34	0,07	21
> 1 000	19	0,22	0,21	0,23	0,06	29
Новосибирск						
2–10	21	0,01	0,01	0,01	0,01	42
10–50	21	0,06	0,04	0,05	0,04	59
50–100	21	0,14	0,13	0,14	0,05	34
100–250	21	0,22	0,22	0,24	0,05	23
250–1 000	21	0,37	0,36	0,35	0,08	22
> 1 000	21	0,20	0,17	0,17	0,12	59
Владивосток						
2–10	19	0,02	0,02	0,02	0,02	88
10–50	19	0,05	0,03	0,04	0,05	99
50–100	19	0,08	0,07	0,09	0,03	34
100–250	19	0,17	0,16	0,19	0,05	30
250–1 000	19	0,38	0,37	0,38	0,10	26
> 1 000	19	0,30	0,27	0,28	0,12	40
Тюмень						
2–10	15	0,02	0,01	0,01	0,02	116
10–50	15	0,03	0,02	0,02	0,03	88
50–100	15	0,11	0,09	0,09	0,07	65
100–250	15	0,51	0,48	0,52	0,16	31
250–1 000	15	0,27	0,25	0,27	0,12	43
> 1 000	15	0,06	0,02	0,02	0,11	202
Челябинск						
2–10	12	0,04	0,02	0,02	0,03	82
10–50	12	0,10	0,08	0,09	0,06	62
50–100	12	0,25	0,23	0,24	0,09	35
100–250	12	0,27	0,25	0,24	0,10	36
250–1 000	12	0,30	0,29	0,29	0,07	23
> 1 000	12	0,06	0,05	0,06	0,04	63
Мурманск						
2–10	24	0,05	0,04	0,04	0,05	88
10–50	24	0,04	0,04	0,04	0,02	51
50–100	24	0,11	0,10	0,10	0,04	35
100–250	24	0,25	0,24	0,24	0,07	27
250–1 000	24	0,48	0,47	0,47	0,09	18
> 1 000	24	0,07	0,06	0,05	0,07	87
Ростов-на-Дону						
2–10	22	0,12	0,12	0,12	0,04	33
10–50	22	0,08	0,05	0,05	0,08	99
50–100	22	0,16	0,14	0,12	0,08	53
100–250	22	0,34	0,31	0,34	0,10	31
250–1 000	22	0,24	0,23	0,24	0,07	27
> 1 000	22	0,06	0,05	0,05	0,04	71
Нижний Новгород						
2–10	25	0,02	0,02	0,02	0,02	86
10–50	25	0,06	0,05	0,05	0,03	51
50–100	25	0,22	0,20	0,22	0,08	37
100–250	25	0,31	0,30	0,31	0,09	28

Окончание табл. 4

250–1 000	25	0,36	0,35	0,36	0,09	26
> 1 000	25	0,03	0,02	0,02	0,02	59

КВ – коэффициент вариации





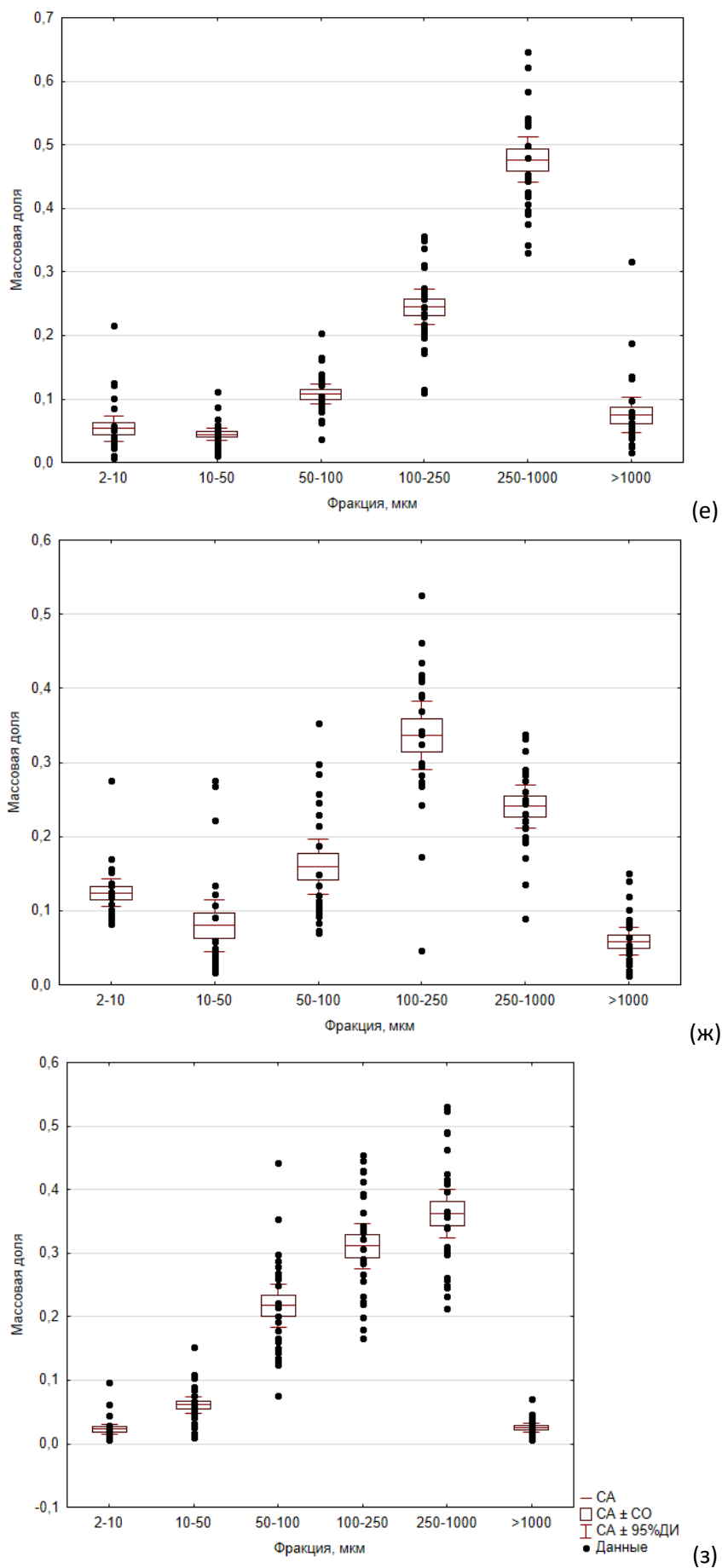


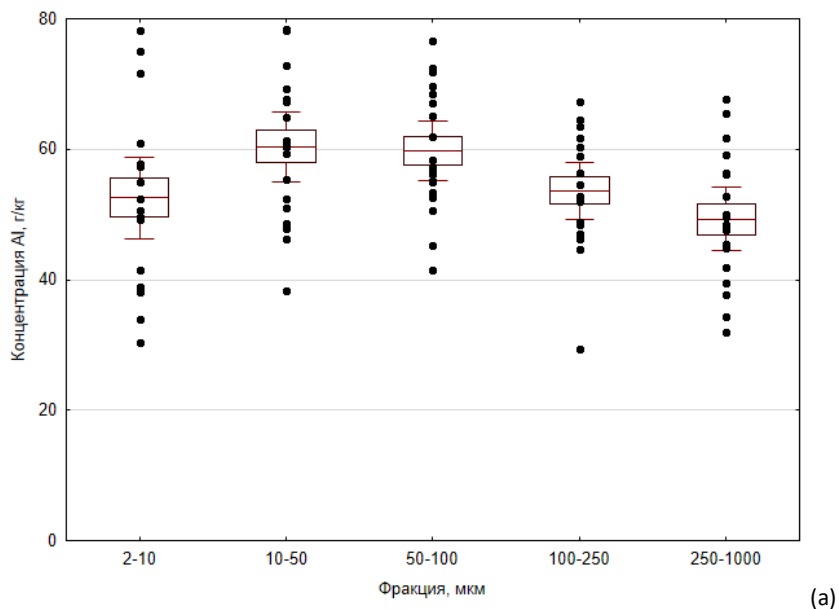
Рис. 2. Гранулометрический состав осадка в городах: (а) Екатеринбург, (б) Новосибирск, (в) Владивосток, (г) Тюмень, (д) Челябинск, (е) Мурманск, (ж) Ростов-на-Дону, (з) Нижний Новгород. СО – стандартная ошибка

3.2. Содержание Al, Pb и кварца в гранулометрических фракциях осадка

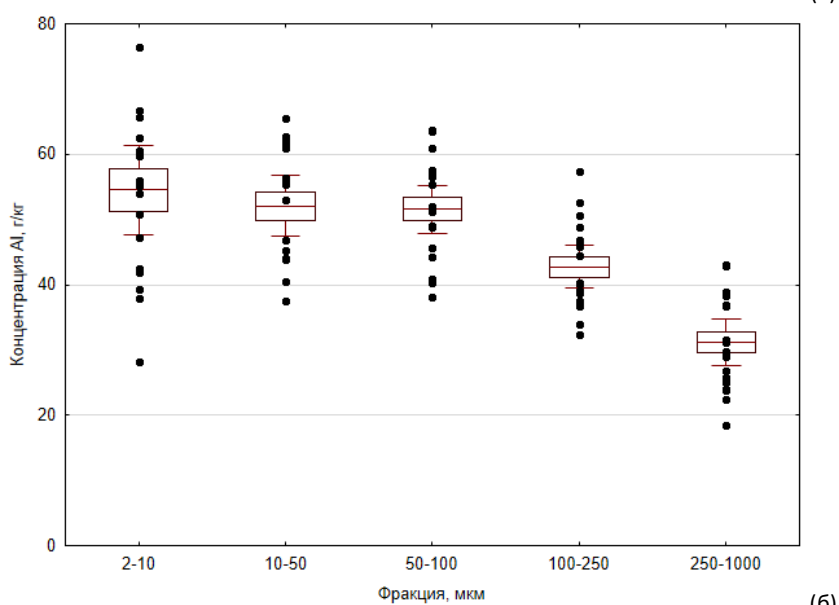
В табл. 5 и на рис. 3 показаны статистические параметры распределения концентрации Al в гранулометрических фракциях в осадке в городах. Получены различные паттерны распределения Al в гранулометрических фракциях в городах. Наибольшее содержание Al приходится на фракции 2–100 мкм [68]. Содержание Al уменьшается с увеличением размера фракции.

Таблица 5. Статистические параметры распределения концентрации Al в гранулометрических фракциях в осадке в городах

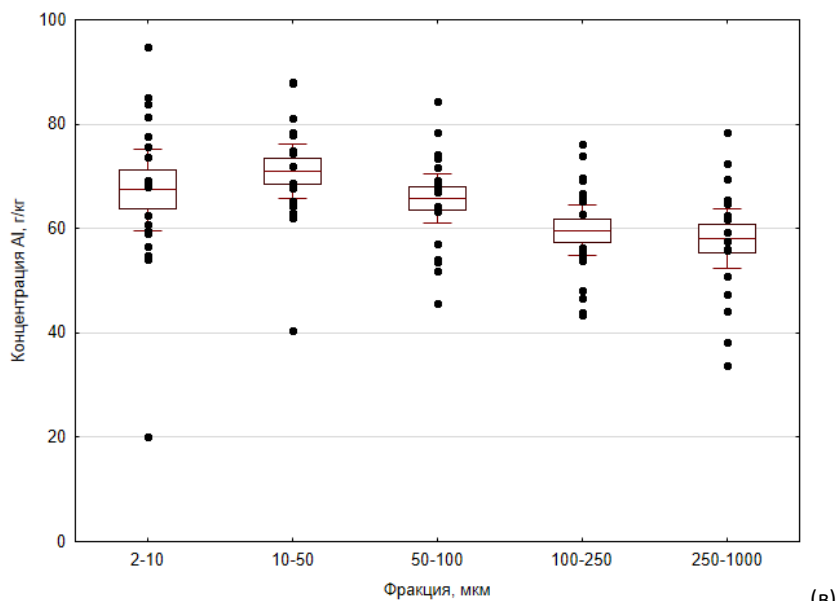
Фракция, мкм	N	СА	СГ	Мед.	СОкл.	КВ, %
Екатеринбург						
2–10	19	53	51	51	13	25
10–50	19	60	59	61	11	18
50–100	19	60	59	57	10	16
100–250	19	54	53	53	9	17
250–1 000	19	49	48	48	10	20
Новосибирск						
2–10	20	55	53	55	13	24
10–50	20	53	52	55	9	17
50–100	21	52	52	52	8	15
100–250	21	43	43	43	7	15
250–1 000	21	32	31	30	8	24
Владивосток						
2–10	19	67	65	69	16	24
10–50	19	71	70	72	11	15
50–100	19	66	65	67	10	15
100–250	19	60	59	56	10	17
250–1 000	18	58	57	61	12	20
Тюмень						
2–10	15	30	28	27	14	45
10–50	15	31	30	29	11	35
50–100	14	33	32	33	8	24
100–250	15	19	19	19	6	29
250–1 000	15	17	16	15	6	36
Челябинск						
2–10	12	69	68	67	9	13
10–50	12	62	62	61	6	10
50–100	12	61	61	61	5	8
100–250	12	40	39	42	9	23
250–1 000	12	47	46	48	6	13
Мурманск						
2–10	24	59	58	56	14	23
10–50	23	55	54	52	11	20
50–100	23	63	62	62	10	16
100–250	21	58	58	60	7	11
250–1 000	23	59	59	59	5	9
Ростов-на-Дону						
2–10	18	33	27	27	22	65
10–50	20	43	42	41	9	21
50–100	22	36	34	34	11	30
100–250	22	8	8	8	3	38
250–1 000	21	9	7	7	6	68
Нижний Новгород						
2–10	22	27	24	25	13	48
10–50	25	40	39	42	8	20
50–100	25	34	33	33	7	21
100–250	25	9	9	9	1	16
250–1 000	25	5	5	5	1	15



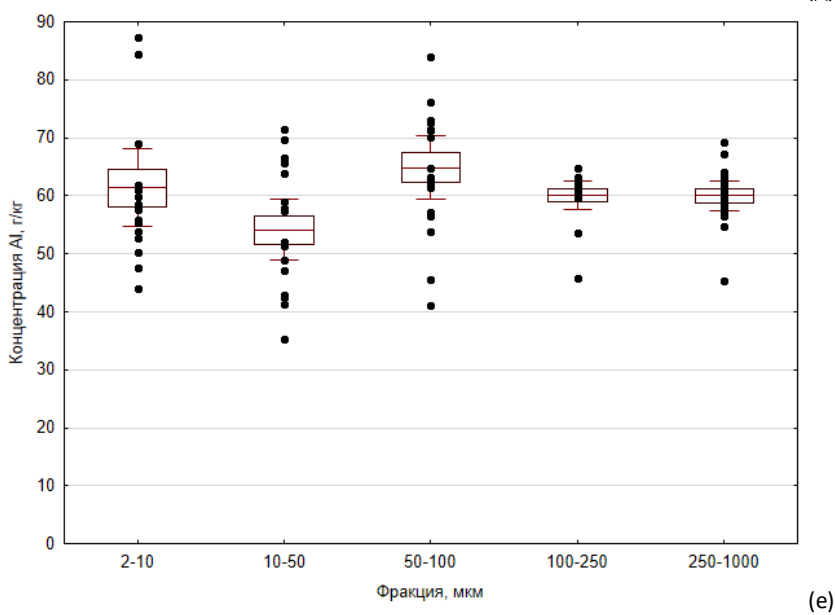
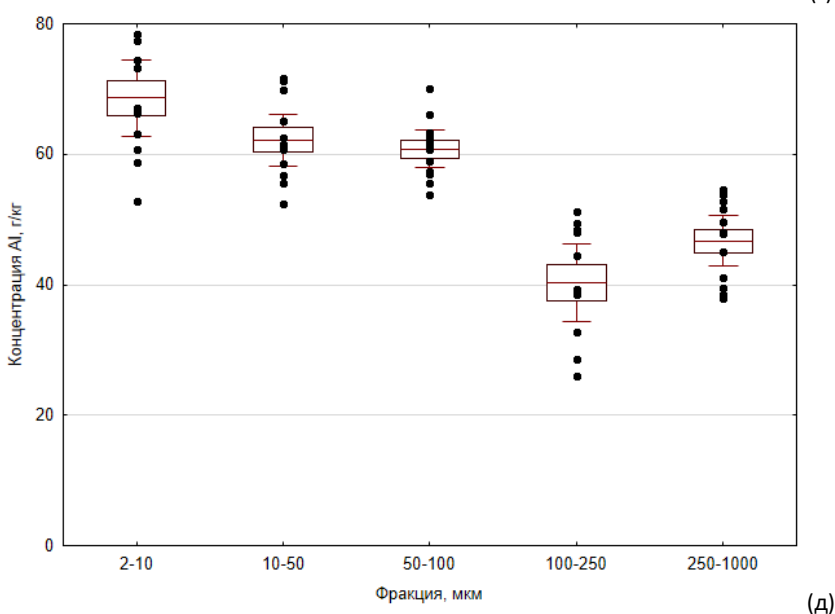
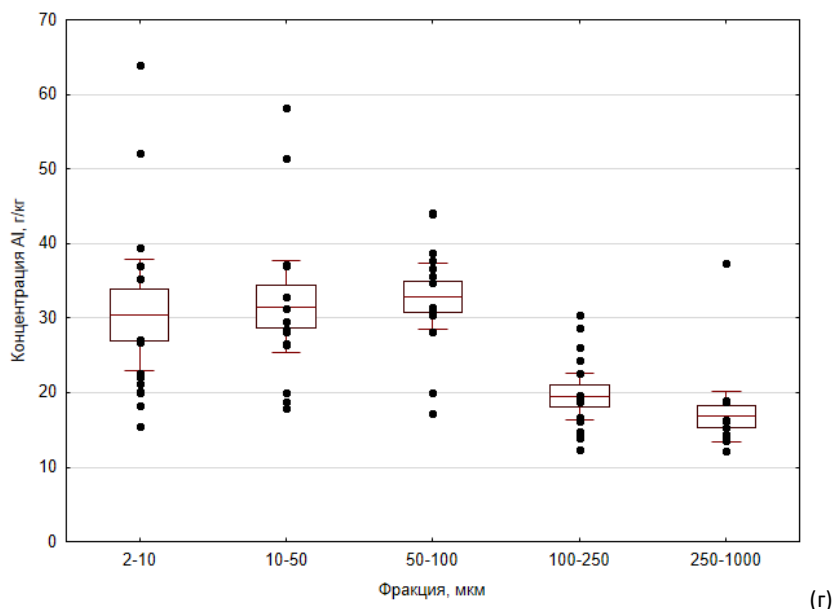
(a)



(б)



(B)



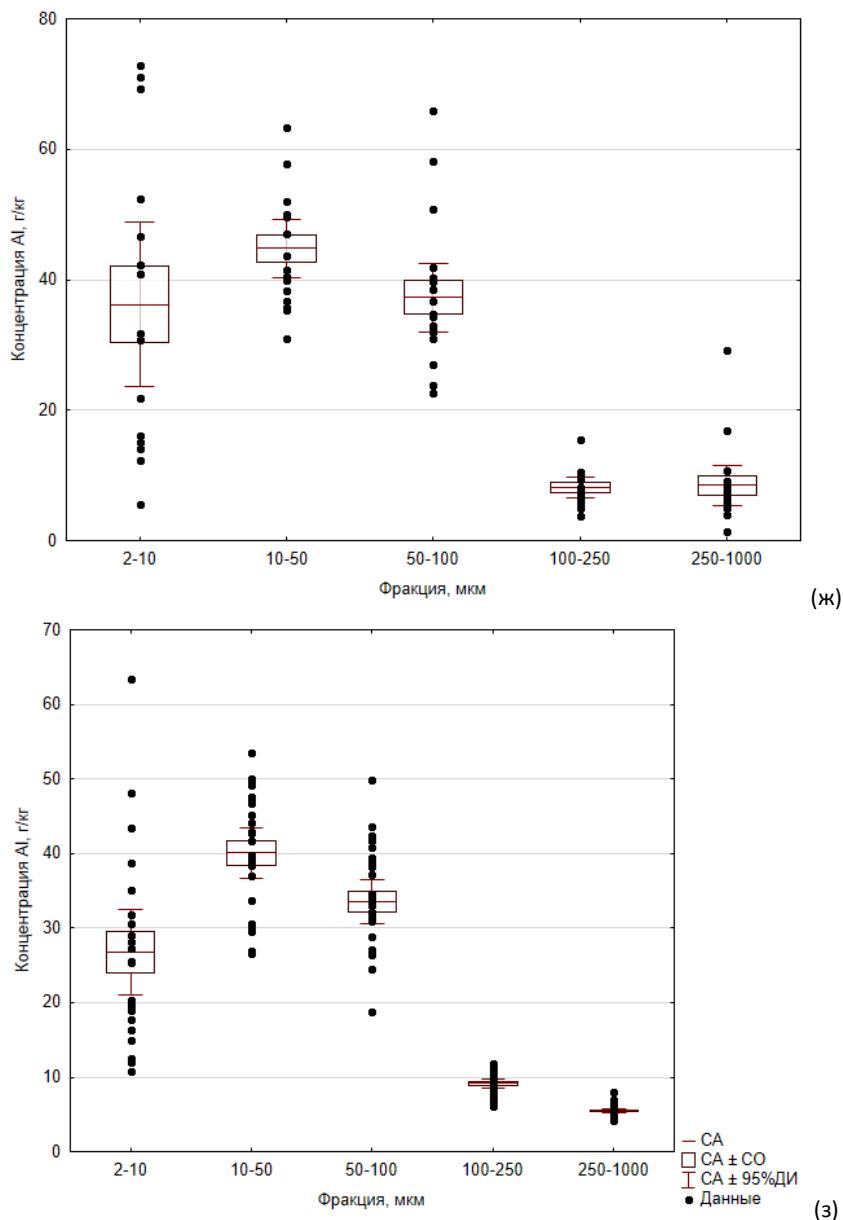


Рис. 3. Содержание Al в гранулометрических фракциях в осадке в городах: (а) Екатеринбург, (б) Новосибирск, (в) Владивосток, (г) Тюмень, (д) Челябинск, (е) Мурманск, (ж) Ростов-на-Дону, (з) Нижний Новгород. CO – стандартная ошибка

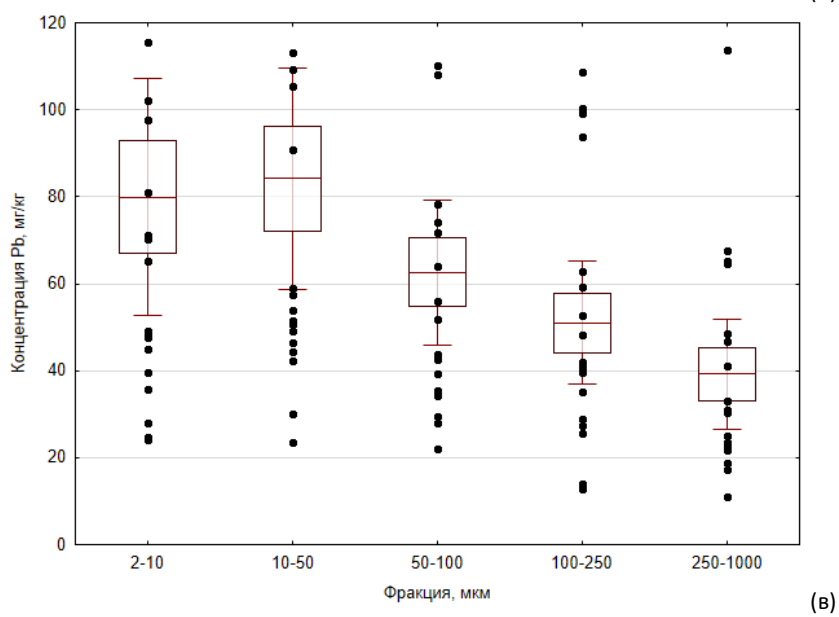
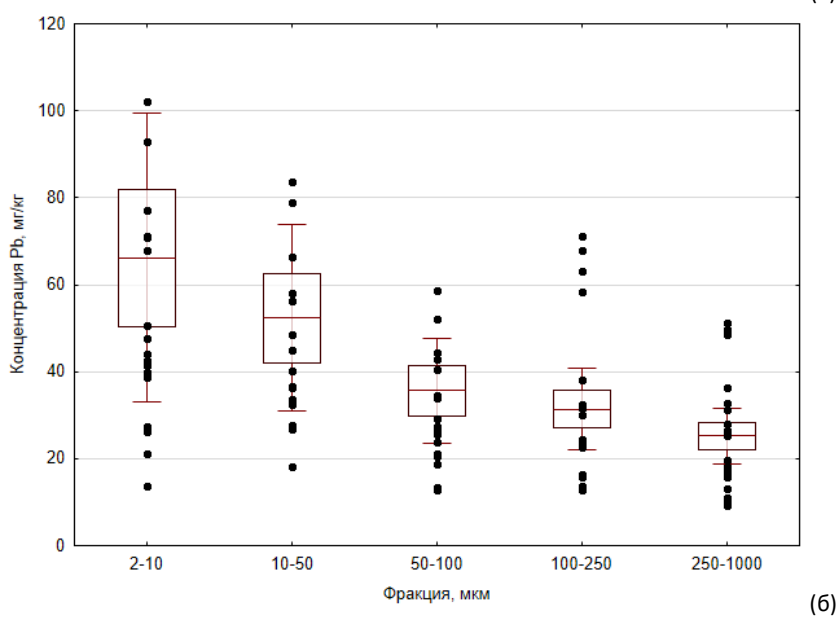
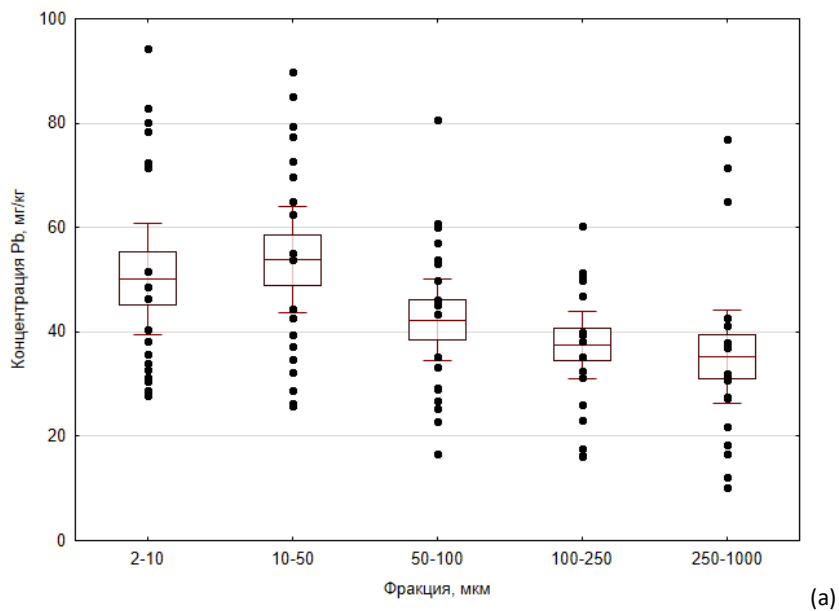
В табл. 6 и на рис. 4 показано распределение концентрации Pb по гранулометрическим фракциям. Концентрация Pb увеличивается с уменьшением размера фракции [68].

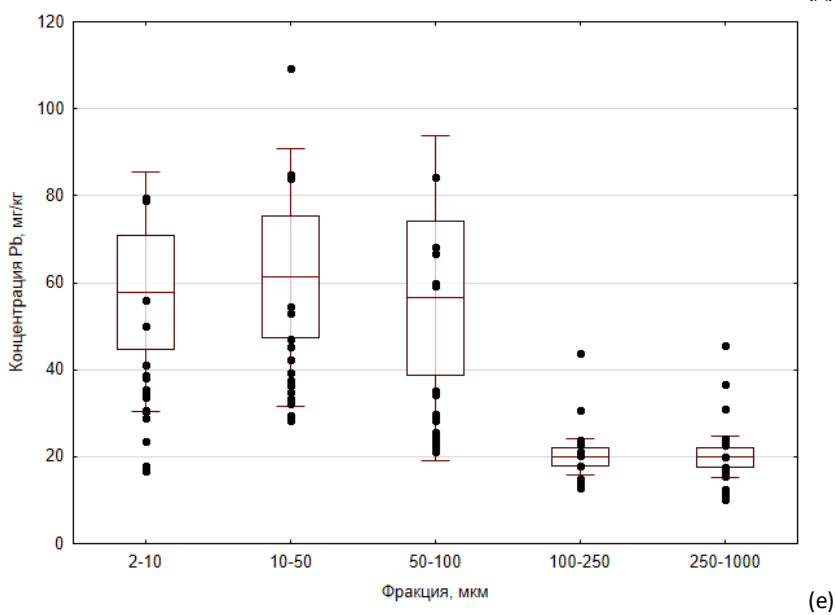
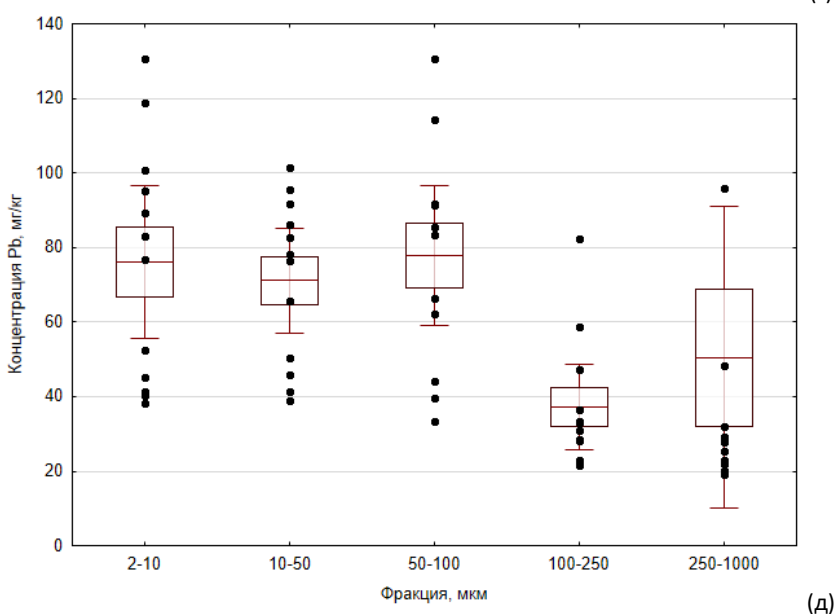
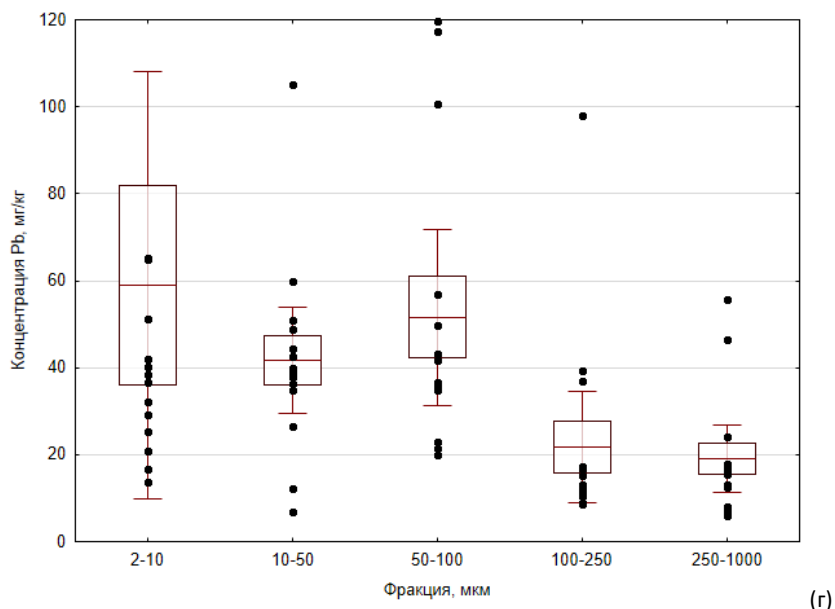
Таблица 6. Статистические параметры распределения концентрации Pb в гранулометрических фракциях в осадке в городах

Фракция, мкм	N	СА	СГ	Мед.	СОкл.	КВ, %
Екатеринбург						
2–10	19	50	46	40	22	44
10–50	19	54	50	54	21	39
50–100	19	42	39	43	16	39
100–250	19	38	35	38	13	36
250–1 000	19	35	31	31	19	53
Новосибирск						
2–10	20	64	50	43	64	100
10–50	20	51	42	39	41	81
50–100	21	35	30	27	24	68
100–250	21	31	26	24	19	61
250–1 000	21	26	22	20	14	55

Окончание табл. 6

Владивосток						
2–10	19	80	65	65	56	71
10–50	19	84	71	58	53	63
50–100	19	63	55	52	35	55
100–250	19	51	43	41	29	58
250–1 000	18	39	33	31	25	65
Тюмень						
2–10	15	59	39	37	89	151
10–50	15	42	36	40	22	53
50–100	14	52	43	39	35	68
100–250	15	22	16	13	23	106
250–1 000	15	19	16	16	14	73
Челябинск						
2–10	12	76	70	80	32	42
10–50	12	71	68	77	22	31
50–100	12	78	72	84	30	38
100–250	12	37	34	32	18	48
250–1 000	12	51	35	27	64	126
Мурманск						
2–10	24	55	42	35	54	97
10–50	23	60	49	42	54	90
50–100	23	55	41	34	68	122
100–250	21	20	19	18	7	37
250–1 000	23	20	18	17	9	45
Ростов-на-Дону						
2–10	18	33	29	26	19	57
10–50	20	49	44	39	25	50
50–100	22	42	37	34	24	58
100–250	22	16	13	13	11	69
250–1 000	21	17	14	16	9	53
Нижний Новгород						
2–10	22	39	33	31	27	70
10–50	25	58	49	47	42	72
50–100	25	46	38	41	37	80
100–250	25	13	10	9	13	96
250–1 000	25	16	10	10	22	139





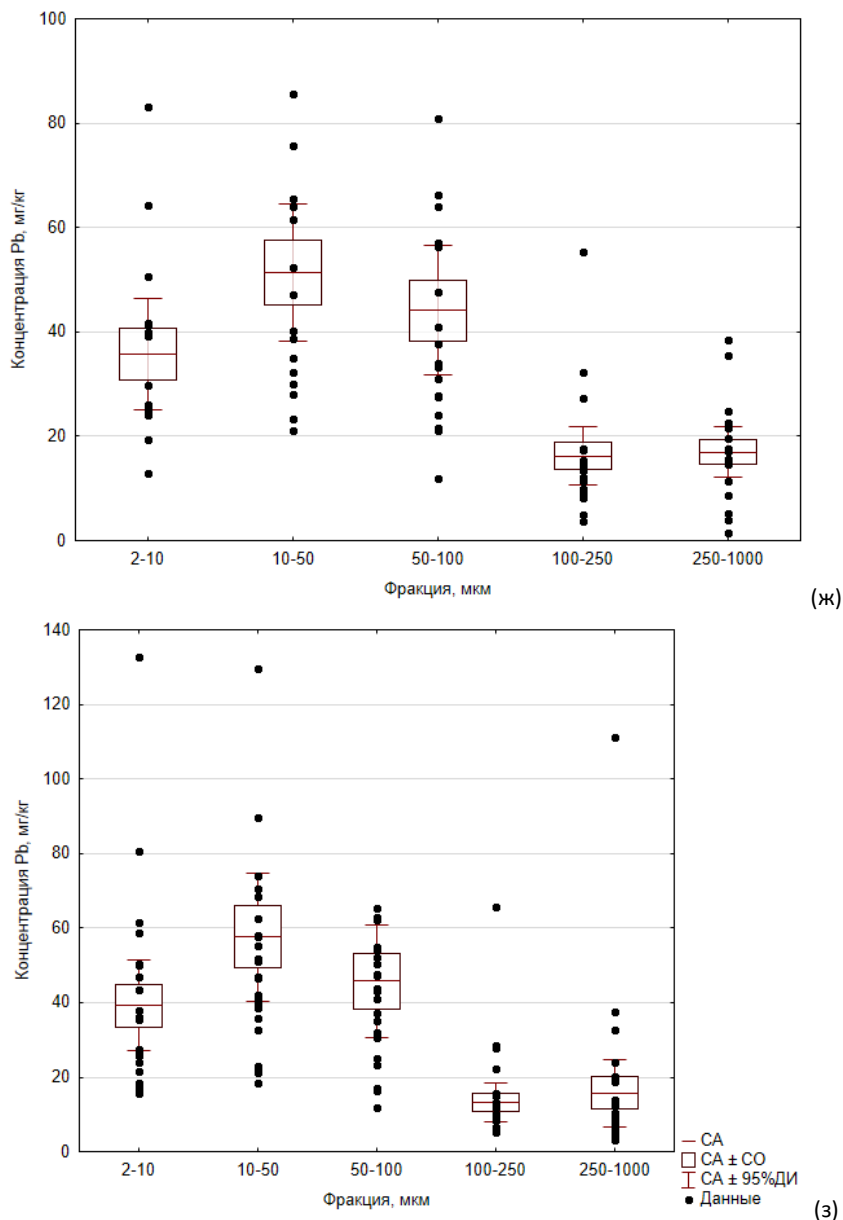


Рис. 4. Содержание Pb в гранулометрических фракциях в осадке в городах: (а) Екатеринбург, (б) Новосибирск, (в) Владивосток, (г) Тюмень, (д) Челябинск, (е) Мурманск, (ж) Ростов-на-Дону, (з) Нижний Новгород. CO – стандартная ошибка

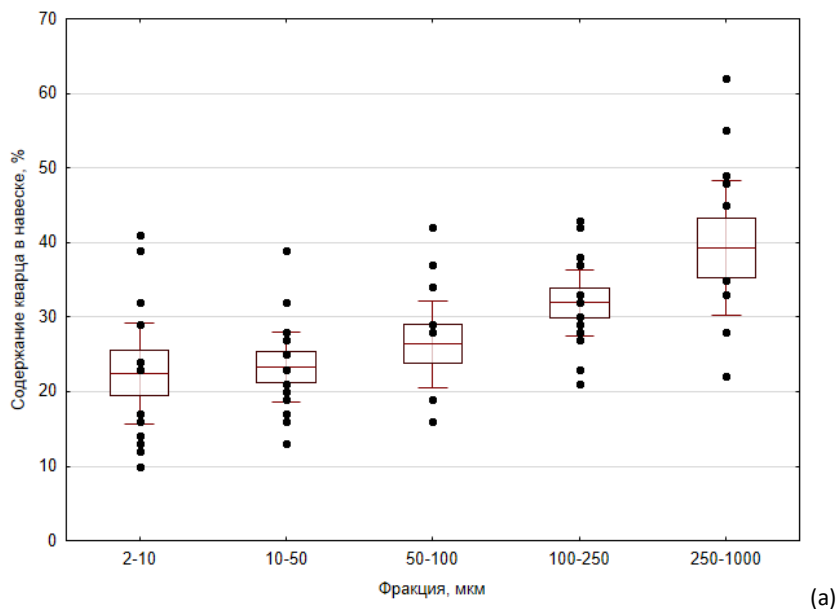
В табл. 7 и на рис. 5 показано распределение содержания кварца в гранулометрических фракциях в осадке.

Таблица 7. Статистические параметры распределения содержания кварца в гранулометрических фракциях в осадке в городах

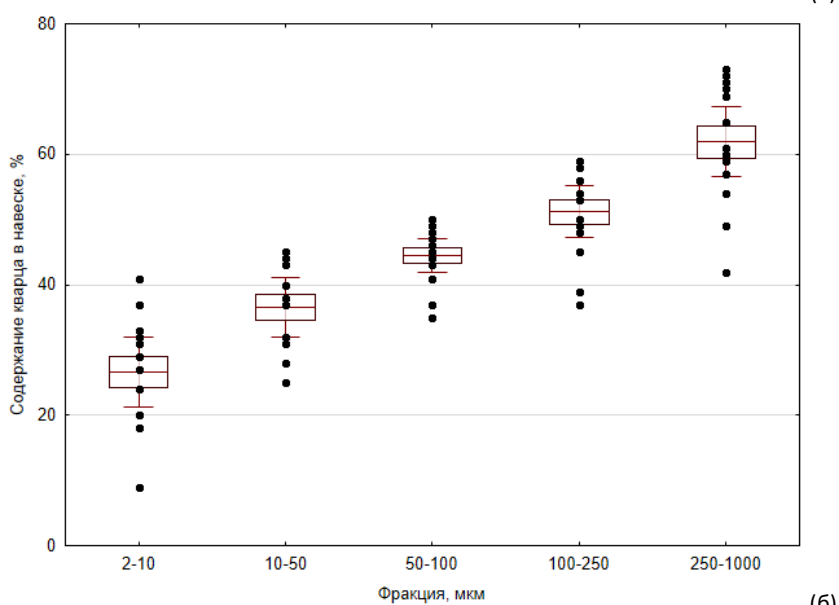
Фракция, мкм	N	СА	СГ	Мед.	СОткл.	КВ, %
Екатеринбург						
2–10	12	23	20	20	11	47
10–50	12	23	22	22	7	32
50–100	11	26	25	28	9	33
100–250	12	32	31	31	7	22
250–1 000	11	39	37	35	13	34
Новосибирск						
2–10	14	26	24	27	9	34
10–50	14	36	35	38	8	22
50–100	15	44	43	45	5	12
100–250	15	51	50	53	7	13
250–1 000	15	61	60	61	9	15

Окончание табл. 7

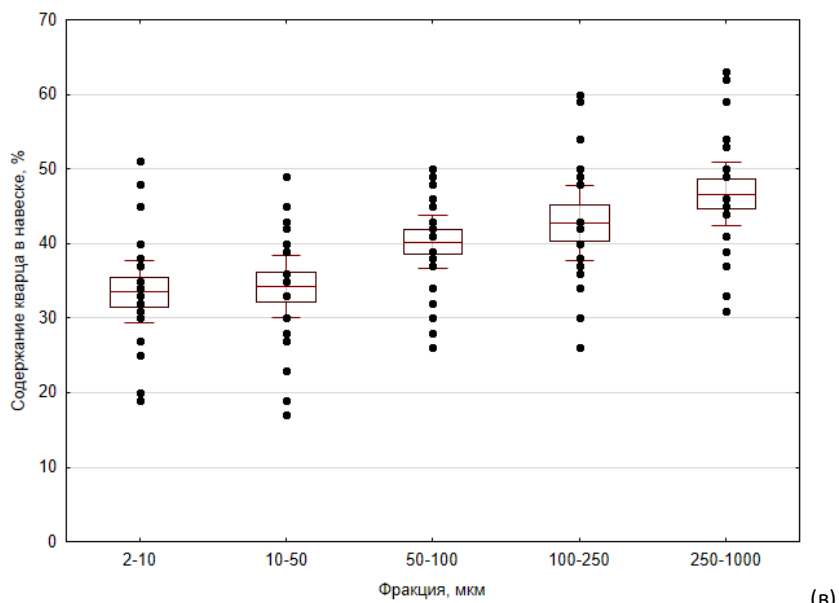
Владивосток						
2–10	19	34	32	33	9	26
10–50	19	34	33	35	9	25
50–100	19	40	40	41	7	19
100–250	19	43	42	40	10	24
250–1 000	19	47	46	45	9	19
Тюмень						
2–10	15	45	43	46	11	25
10–50	14	31	30	30	8	26
50–100	9	42	41	42	8	20
100–250	15	66	64	71	14	22
250–1 000	15	63	60	66	17	28
Челябинск						
2–10	11	29	28	32	9	29
10–50	11	30	29	29	8	26
50–100	12	31	30	29	8	27
100–250	12	60	60	59	9	15
250–1 000	12	53	53	52	10	18
Мурманск						
2–10	24	29	27	31	8	29
10–50	21	22	21	22	6	25
50–100	23	26	25	28	8	30
100–250	24	34	34	34	5	15
250–1 000	24	39	39	39	4	11
Ростов-на-Дону						
2–10	17	50	48	49	15	29
10–50	19	47	46	44	8	18
50–100	22	56	56	55	8	14
100–250	21	83	83	83	8	9
250–1 000	22	79	78	81	11	14
Нижний Новгород						
2–10	17	49	48	45	10	21
10–50	25	42	41	42	8	19
50–100	25	58	57	58	8	13
100–250	25	85	84	85	5	6
250–1 000	24	87	87	87	5	6



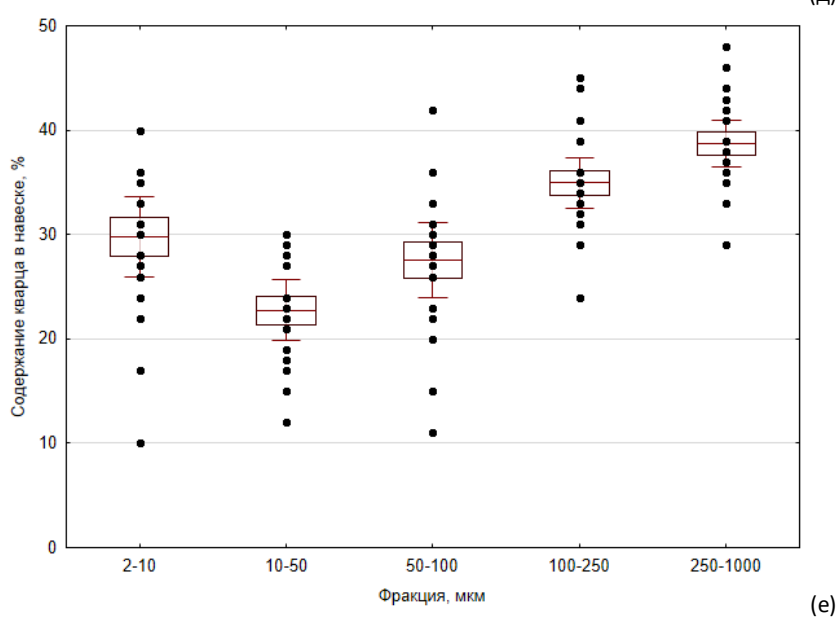
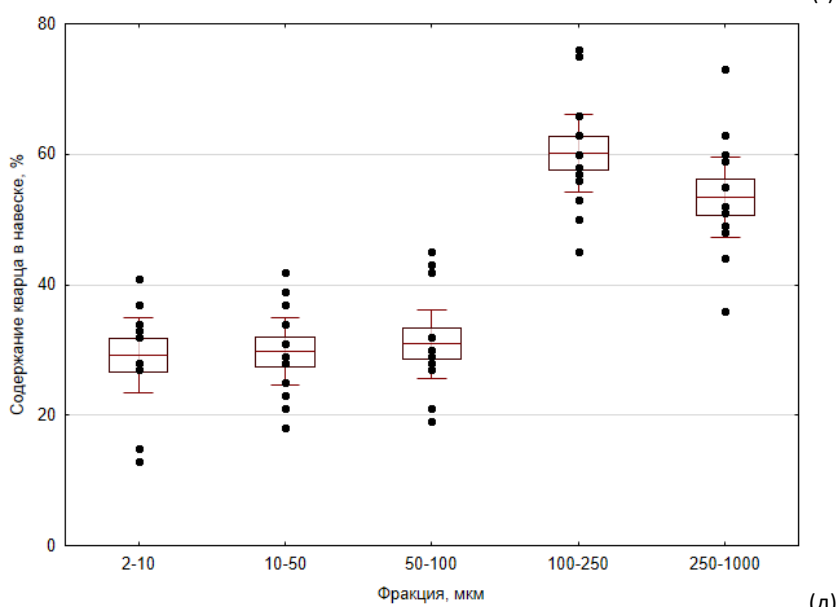
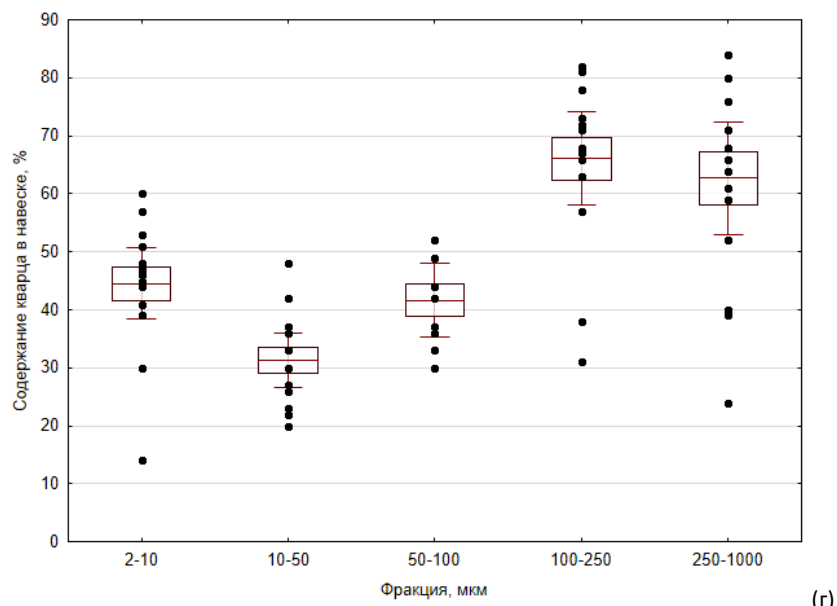
(a)



(б)



(B)



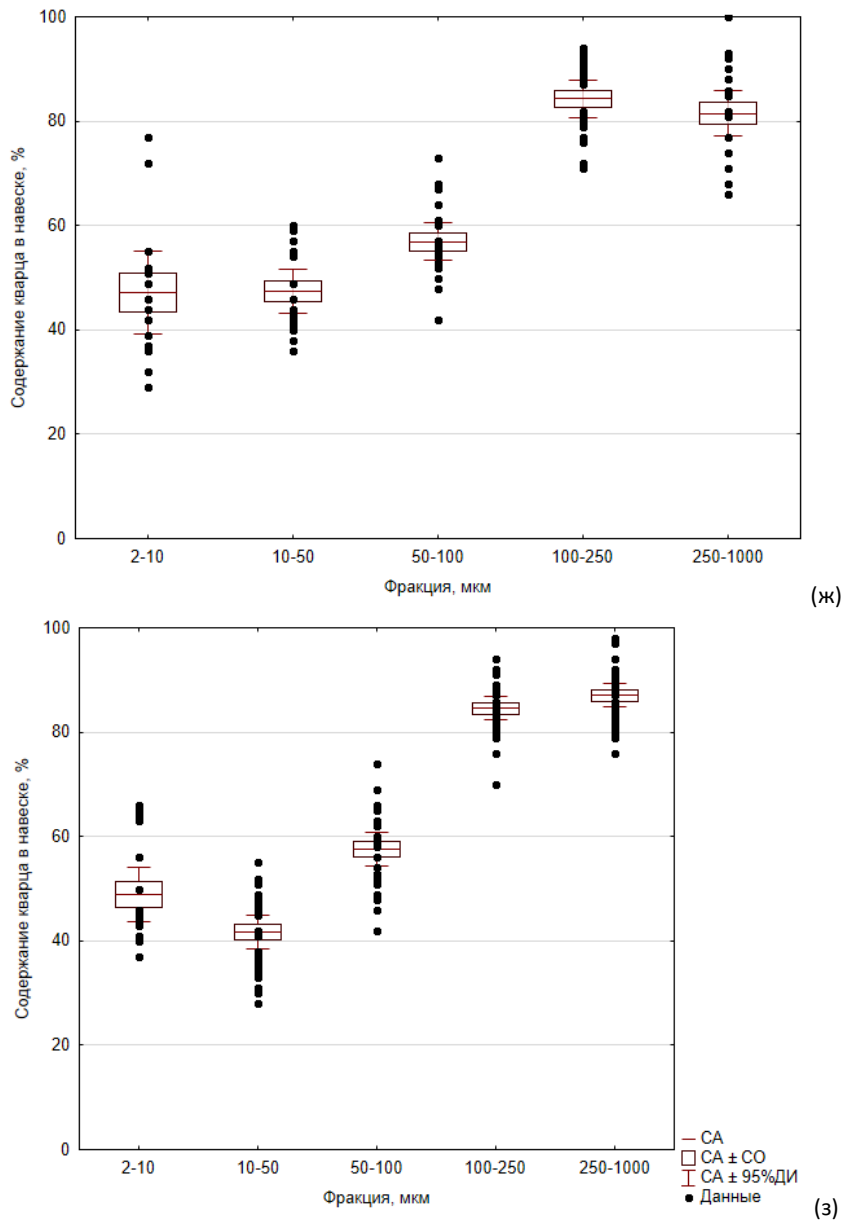


Рис. 5. Содержание кварца в гранулометрических фракциях в осадке в городах: (а) Екатеринбург, (б) Новосибирск, (в) Владивосток, (г) Тюмень, (д) Челябинск, (е) Мурманск, (ж) Ростов-на-Дону, (з) Нижний Новгород. СО – стандартная ошибка

Разделение проб по предлагаемому методу позволяет получить специфические паттерны содержания кварца в гранулометрических навесках осадка. В исследуемых городах заметно увеличение кварца во фракциях 100–250 и 250–1000 мкм по сравнению с фракцией 2–10 мкм. При этом могут выделяться города с более высоким содержанием минерала. Наибольшие концентрации наблюдаются в Нижнем Новгороде и Ростове-на-Дону.

4. Обсуждение

4.1. Формирование осадка

Во всех городах на жилых территориях присутствуют современные осадки. Состав осадков отражает геохимические характеристики территории жилого квартала от момента формирования ландшафта до момента отбора образца [63–65, 67]. При формировании осадка на внутривортовой территории реализуется бассейновый принцип. Двор представляет собой локальный седиментационный бассейн; твердые осадки собираются в депо – понижениях микрорельефа. Жилая зона города может

быть представлена в виде множества локальных бассейнов, каждый из которых представляет собой жилой квартал, в каждом из которых происходят современные седиментационные процессы. Множество сборных проб осадка с жилой территории города характеризует ее экологическое и геохимическое состояние. Жилая территория города состоит из районов (которые состоят в свою очередь из микрорайонов) разных лет застройки, разделенных между собой лесопарковыми и парковыми зонами, промышленными территориями, реками, транспортными магистралями (железными и автодорогами) и другими объектами. Рассматривая город в целом, сеть отбора проб осадка имеет нерегулярный вид, в то время как в отдельном жилом районе реализуется регулярная сеть отбора. При этом в каждом жилом районе отбирается 3–8 проб [69]. Сеть из 40 проб на территории города может быть охарактеризована как оптимальная для проведения геохимического исследования [70]. При проведении исследований по двум схемам вещественный состав выбранной случайным образом группы равномерно распределенных по территории города проб может характеризовать вещественный состав проб на территории города в целом.

Селитебные территории городов, располагающихся в разных природных климатических географических, геологических и экономических зонах России, были обследованы по единой методике. Жилые территории городов с многоквартирными домами имеют одинаковую планировочную структуру. Интенсивная урбанизация и развитие территорий в обследованных городах пришлись на вторую половину XX в.

Пробы проходили единую процедуру подготовки к гранулометрическому анализу: использование пестика с резиновым наконечником исключало разрушение минеральных, органических и техногенных компонентов осадка; просеивание пробы через сито с размером ячеек 3 мм исключало из анализа крупные частицы: обломки горных пород, крупные обломки твердых коммунальных отходов, растительные фрагменты (корни, листья, ветки), металлические фрагменты и др. Выбор представительной навески массой 100–300 г обусловлен необходимостью получить материал для определения в нем минерального и элементного состава [39]. Процедура фракционного разделения современных осадков аналогична комбинации отмучивания и просеивания, применяемой другими исследователями для городских почв [71].

4.2. Гранулометрический состав и содержание Al, Pb и кварца в гранулометрических фракциях осадка

Материал осадка, отобранный по единой методике в городах в разных природных географических, климатических, геологических, промышленных зонах, раздели на гранулометрические фракции. Каждая полученная гранулометрическая фракция характеризуется своими уникальными статистическими параметрами (средним, медианным содержанием, дисперсией, размером и др.). По средним содержаниям гранулометрической фракции в осадке может быть построен уникальный паттерн гранулометрического состава осадка в городе. Полученные различные паттерны распределения доли гранулометрической фракции в осадке в общем соответствуют паттернам, получаемым в других работах для объектов городской среды, схожих по генезису рассматриваемым осадкам: дорожная пыль и городские почвы [66, 71]. Содержание гранулометрических фракций в осадке может как отличаться, так и быть равным. Достаточно широкий разброс полученных значений доли гранулометрической фракции осадка (табл. 4 и рис. 2), высокая вариативность полученных результатов гранулометрического анализа ($KV > 20\%$) на территории города может быть обусловлена:

- различием подходов к благоустройству и содержанию жилых кварталов на территории города (в одном районе уборка лучше, в другом хуже),
- разницей проб в жилых кварталах разного возраста постройки (старые ландшафты больше подвержены эрозии и выветриванию),

- количеством автомобилей в жилых районах (автомобили при парковке на газонах разрушают их, а в каких-то районах парковка на газоне запрещена),
- различием состава поверхностей жилых территорий, где происходит осадкообразование (в одних дворах преобладают газоны, в других – асфальт и тротуарная плитка).

Поскольку осадок с селитебной территории представляет собой комплексную среду, смесь – из частиц органического и минерального происхождения, то при отмучивании более легкие частицы органического происхождения, но крупного размера могут попасть в более мелкие фракции (< 50 мкм). В общем неоднородность гранулометрического состава осадка связана с особенностями комплекса процессов современного седиментогенеза на городской территории, учет которых труден и зачастую невозможен. Учет таких факторов воздействия на ландшафты требует проведения отдельных исследований. Полученные размеры выборок недостаточны для подтверждения статистической значимости различий между количеством (долями) отдельных крупных (> 100 мкм) и мелких (2–100 мкм) гранулометрических фракций осадка во всех обследованных городах, хотя на отдельных диаграммах (рис. 3) прослеживаются тенденции разделения отложений по гранулометрическому составу. Принимая во внимание число отобранных и фракционированных проб осадка в городах, полученные результаты в своем роде уникальны в мировой практике геохимических исследований городских территорий.

Полученные распределения по гранулометрическому составу осадка содержания Al, Pb и кварца также характеризуются статистическими параметрами (средним, медианным содержанием, дисперсией, диапазоном и др.). При этом для большинства гранулометрических фракций характерно, что среднее арифметическое, среднее геометрическое и медианное содержание Al принимают близкие значения. Такая же тенденция наблюдается для содержания кварца. Для свинца распределение концентрации в гранулометрической фракции имеет высокую вариативность. Попарное сравнение выборок значений содержания Al, Pb и кварца в гранулометрических фракциях в осадке, согласно критерию Манна – Уитни, показало как наличие статистически значимых различий между ними, так и их отсутствие для отдельных городов. При этом удалось достичь физического разделения материала осадка на гранулометрические навески разного зернового состава. Охарактеризовать состав навесок можно путем оценки статистических параметров для гранулометрической фракции. Использование критерия Манна – Уитни обусловлено малым размером полученных выборок. В данном случае это дополнительный инструмент анализа, хотя на таких выборках мы можем предполагать вид распределения содержания Al, Pb и кварца в той или иной гранулометрической фракции.

Получены следующие паттерны для элементов в осадке, аналогичные литературным данным [68, 71–74]:

- преобладание содержания Al и Pb в мелких фракциях;
- преобладание кварца в песчаных фракциях.

4.3. Источники неопределенности получаемых результатов

Предложенная комбинация отмучивания и просеивания позволяет разделить образец осадка на ряд размерных фракций, использует взаимодополняющие подходы, направленные на разделение материала разных размеров.

Источники неопределенности получаемых результатов:

- достижение прозрачности воды в стаканах при проведении отмучивания (шаги 2 и 3) зависит от восприятия оператора и освещенности помещения лаборатории. Пробы различного вещественного состава имеют различную прозрачность. Преобладание глинистых минералов и легкорастворимых веществ (противогололедные материалы и химикаты для уборки дворов, уличные шампуни и

др.) в пробе требует большего количества дистиллированной воды для отмучивания, прозрачность воды трудно достижима;

- количество органического вещества в пробе. Органическое вещество имеет меньшую плотность по сравнению с минеральным, поэтому органические частицы (остатки растений, листьев, хвоя, панцири насекомых и др.) крупного размера легко всплывают на поверхность вместе с мелкими фракциями осадка;

- случайные ошибки оператора при проведении отмучивания, в том числе сливание суспензии большего объема (с нужной гранулометрической фракцией могли быть слиты частицы крупного размера) и неточное выдерживание времени осаждения частиц в стаканах (мог быть слит меньший объем суспензии);

- при фильтровании часть материала мелких фракций могла проходить через участки замятого фильтра на воронках Бюхнера в фильтрат. К тому же у самого фильтра есть погрешность фильтрации (размер пор варьируется при некотором среднем заявленном номинальном значении);

- условия влажности помещения лаборатории, в котором происходила сушка фильтров, могли повлиять на результат взвешивания мелких фракций с фильтром;

- пористый материал бумажных фильтров накапливает влагу и становится тяжелее;

- лабораторные сита имеют класс точности и погрешность размера ячеек;

- работа оператора пестиком с резиновым наконечником при истирании крупных агрегатов на металлических ситах могла иметь разные приложенные усилия (в конечном счете сита выходили из строя), при этом через ячейки сит могли проходить более крупные частицы (потенциально происходит смешивание разных зерновых фракций);

- погрешность взвешивания аналитических весов;

- условия проведения процедуры отмучивания мелких фракций: допущение сферической формы частиц; нормальные условия в лаборатории; принятие вязкости дистиллированной воды при нормальных условиях. При этом работы по отмучиванию проводились в теплый и холодный сезоны, температура в помещении лаборатории могла варьироваться. Частицы не имели сферической формы, плотность частиц различалась в зависимости от их происхождения (минеральное вещество, техногенные включения, органические частицы). Условия проведения отмучивания идеализированы.

5. Выводы

Предложенный подход позволил уверенно разделить на размерные фракции осадок с жилых территорий городов. Подход основан на комбинации методов отмучивания мелких фракций и мокрого просеивания крупных. Универсальность использования подхода продемонстрирована для городов, располагающихся в разных природных климатических, географических и геологических зонах на территориях России, различающихся экономической специализацией. Полученные результаты вещественного состава гранулометрических фракций позволяют получить специфические паттерны распределения поллютантов и других веществ в объектах окружающей среды на городских территориях и в значительной степени дополняют представления о закономерностях миграции и накопления вещества в городских ландшафтах. Подход был валидирован и верифицирован путем анализа статистических параметров содержания типичных веществ природного и антропогенного происхождения на городских территориях (Al, Pb и кварца). Полученные закономерности распределения вещественного состава осадков по гранулометрическим фракциям сопоставимы с результатами других исследований.

6. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-17-20036) и Правительства Свердловской области (проект № 24-17-20036).

7. Список литературы

1. Уровни и факторы накопления металлов и металлоидов в придорожных почвах, дорожной пыли и их фракции PM10 в Западном округе Москвы / Д. В. Власов, О. В. Кукушкина, Н. Е. Кошелева, Н. С. Касимов // Почвоведение. – 2022. – № 5. – С. 538–555. – DOI 10.31857/S0032180X22050112. – EDN ISCVPM.
2. Granulometric distribution of metals in road-deposited sediments by using different sieving methods / L. Gelhardt, B. Kuch, U. Dittmer, A. Welker // Environmental Advances. – 2021. – Vol. 5. – P. 100094. – DOI 10.1016/j.envadv.2021.100094. – EDN YOOYQJ.
3. *Gunawardana, C.* Role of particle size and composition in metal adsorption by solids deposited on urban road surfaces / C. Gunawardana, P. Egodawatta, A. Goonetilleke // Environ. Pollut. – 2014. – Vol. 184. – P. 44–53. – DOI 10.1016/j.envpol.2013.08.010.
4. *Kettler, T. A.* Simplified Method for Soil Particle-Size Determination to Accompany Soil-Quality Analyses / T. A. Kettler, J. W. Doran, T. L. Gilbert // Soil Science Society of America Journal. – 2001. – Vol. 65. – P. 849–852. – DOI 10.2136/sssaj2001.653849x.
5. *Cambardella, C. A.* Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence / C. A. Cambardella, E. T. Elliott // Soil Science Society of America Journal. – 1992. – Vol. 56. – P. 777–783. – DOI 10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x.
6. *Świercz, A.* Accumulation of heavy metals in the urban soils of the city of Skarżysko-Kamienna (Poland) with regard to land use / A. Świercz, E. Zajecka // Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. – 2018. – Vol. 13. – No 1. – P. 249–266. – DOI 10.26471/cjees/2018/013/022.
7. *Wu, J.* Urban Ecology and Sustainability: The State-of-the-Science and Future Directions / J. Wu // Landscape and Urban Planning. – 2014. – Vol. 125. – P. 209–221. – DOI 10.1016/j.landurbplan.2014.01.018.
8. Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России / Т. В. Прокофьева, М. И. Герасимова, О. С. Безуглова [и др.] // Почвоведение. – 2014. – № 10. – С. 1155–1164. – DOI 10.7868/S0032180X14100104. – EDN SNWNIZ.
9. *Агаркова-Лях, И. В.* Адаптация метода гранулометрического анализа для изучения микропластикового загрязнения отложений прибрежной зоны моря / И. В. Агаркова-Лях, Е. Н. Сибирцова // Принципы экологии. – 2019. – № 3. – С. 155–162. – DOI 10.15393/j1.art.2019.8622.
10. *Guzmán, R.* Granulometric characterization of sediments in the anastomosed system of the Apure river Venezuela / R. Guzmán, M. Bezada, I. Rodríguez-Santalla // Journal of South American Earth Sciences. – 2021. – Vol. 109. – P. 103274. – DOI 10.1016/j.jsames.2021.103274.
11. *Wu, J.* The effect of settlement on wastewater carbon source availability based on respirometric and granulometric analysis / J. Wu, C. He // Chemical Engineering Journal. – 2012. – Vol. 189–190. – P. 250–255. – DOI 10.1016/j.cej.2012.02.066.
12. *Selbig, W. R.* From streets to streams: assessing the toxicity potential of urban sediment by particle size / W. R. Selbig, R. Bannerman, S. R. Corsi // Sci. Total Environ. – 2013. – Vol. 444. – P. 381–391. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2012.11.094.
13. Гранулометрический анализ атмосферных взвесей экологически благополучного и неблагополучного районов Владивостока / В. И. Янькова, Т. А. Гвозденко, К. С. Голохваст [и др.] // Здоровье. Медицинская экология. Наука. – 2014. – № 2 (56). – С. 62–66. – EDN SIELJT.
14. *Vu, T. V.* Review: particle number size distributions from seven major sources and implications for source apportionment studies / T. V. Vu, J. M. Delgado-Saborit, R. M. Harrison // Atmos. Environ. – 2015. – Vol. 122. – P. 114–132. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2015.09.027.

15. Heavy metal atmospheric deposition study in Moscow region, Russia / K. Vergel, I. Zinicovscaia, N. Yushin, M. V. Frontasyeva // Bull. Environ. Contam. Toxicol. – 2019. – Vol. 103. – P. 435–440. – DOI 10.1007/s00128-019-02672-4.
16. Partitioning and solubilities of metals and metalloids in spring rains in Moscow megacity / D. Vlasov, N. Kasimov, I. Eremina [et al.] // Atmospheric Pollution Research. – 2021. – Vol. 12(1). – P. 255–271. – DOI 10.1016/j.apr.2020.09.012.
17. Временные вариации состава атмосферного аэрозоля в Москве весной 2020 года / Д. П. Губанова, А. А. Виноградова, М. А. Иорданский, А. И. Скороход // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 57. – № 3. – С. 334–348. – DOI 10.31857/S0002351521030056. – EDN ZQJRLH.
18. Гранулометрический состав осевшего аэрозольного вещества и соотношение фенольных соединений в хвое разного возраста / М. П. Тентюков, В. И. Михайлов, Д. А. Тимушев [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 34, № 02. – С. 122–128. – DOI 10.15372/AOO20210207.
19. Granulometric analysis and heavy mineral studies of the sandstone facies exposed near Igbile, southwestern Nigeria / P. R. Ikhane, A. I. Akintola, S. I. Bankole [et al.] // International Research Journal of Geology and Mining (IRJGM). – 2013. – Vol. 3(4). – P. 158–178.
20. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: Partitioning and deposition rates in Western Moscow / D. Vlasov, J. Vasil'chuk, N. Kosheleva, N. Kasimov // Atmosphere. – 2020. – Vol. 11. – 907. – DOI 10.3390/atmos11090907.
21. Многолетний мониторинг снежного покрова в условиях природных и урбанизированных ландшафтов Москвы и Подмосковья / Л. Г. Богатырев, Н. И. Жилин, В. П. Самсонова [и др.] // Вестник Московского университета. – Серия 5. География. – 2018. – № 2. – С. 85–96.
22. *Rienda, I. C.* Road dust resuspension: A review / I. C. Rienda, C. A. Alves // Atmos. Res. – 2021. – Vol. 261. – 105740. – DOI 10.1016/j.atmosres.2021.105740.
23. Методика выделения гранулометрических фракций почв и пыли методом центрифугирования / Л. А. Безбердая, П. Р. Енчилик, Н. Е. Кошелева [и др.] // Инженерная экология: Доклады Международного симпозиума РНТОРЭС им. А. С. Попова, Москва, 2023 г. – Москва, 2023. – С. 178–182. – EDN NWOBMJ.
24. Particulate Matter deposition on *Quercus ilex* leaves in an industrial city of central Italy / G. Sgrigna, A. Sæbø, S. Gawronski [et al.] // Environ. Pollut. – 2015. – Vol. 197. – P. 187–194. – DOI 10.1016/j.envpol.2014.11.030.
25. *Васильев, С. Б.* Теоретические и практические аспекты рекультивации техногенных ландшафтов / С. Б. Васильев, А. Р. Родин // Вестник Московского государственного университета леса. – Лесной вестник. – 2016. – Т. 20, № 1. – С. 118–122. – EDN VNUGYZ.
26. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 / A. J. Cohen, M. Brauer, R. Burnett [et al.] // Lancet. – 2017. – Vol. 389(10082). – P. 1907–1918. – DOI 10.1016/S0140-6736(17)30505-6.
27. The Lancet Commission on pollution and health / P. J. Landrigan, R. Fuller, N. J. R. Acosta [et al.] // Lancet. – 2018. – Vol. 391(10119). – P. 462–512. – DOI 10.1016/S0140-6736(17)32345-0. – Erratum in: Lancet. 2018. – 391(10119). – P. 430. – DOI 10.1016/S0140-6736(17)32817-9.
28. *Просвирякова, И. А.* Гигиеническая оценка содержания твердых частиц PM10 и PM2.5 в атмосферном воздухе и риска для здоровья жителей в зоне влияния выбросов стационарных источников промышленных предприятий / И. А. Просвирякова, Л. М. Шевчук // Анализ риска здоровью. – 2018. – № 2. – С. 14–22. – DOI 10.21668/health.risk/2018.2.02.
29. *Катола, В. М.* Пыль: источники образования, ее общая характеристика, пылевые заболевания (краткий обзор) / В. М. Катола, В. Е. Комогорцева // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. – 2018. – № 67. – С. 111–116. – DOI 10.12737/article_5a9f2eaf492cf9.67393066.
30. *Романовская, А. Ю.* Аэрозольная пыль почвенного происхождения в атмосфере: источники, количество, свойства (обзор) / А. Ю. Романовская, И. Ю. Савин // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2021. – № 109. – С. 36–95. – DOI 10.19047/0136-1694-2021-109-36-95.

31. Экоотоксичность городской пыли: существующие практики и перспективы применения биотестирования (обзор) / О. В. Николаева, С. А. Кулачкова, А. А. Астайкина [и др.] // Вестник Московского университета. – Серия 17. Почвоведение. – 2022. – № 3. – С. 3–19. – EDN TVRANF.
32. Адушкин, В. В. Мелкодисперсные частицы в природных и техногенных геосистемах / В. В. Адушкин, С. И. Попель // Физика Земли. – 2012. – № 3. – С. 81–92. – EDN OWENXN.
33. *Sotnezov, A. Morphological Composition of Solid Municipal Waste / A. Sotnezov, V. Zaytsev, N. P. Tarasova // Safety in Technosphere. – 2015. – №. 4. – P. 10–15. – DOI 10.12737/14429.*
34. Алхимова, О. Д. Отходы как фактор деградации окружающей среды / О. Д. Алхимова, С. В. Миськееич // Изучение, сохранение и восстановление естественных ландшафтов. Материалы IV Международной научно-практической конференции «Изучение, сохранение и восстановление естественных ландшафтов» (Волгоград, 15–19 сентября 2014 года). – Волгоград: ООО «Волгоградское научное издательство», 2014. – С. 296–301. – EDN VNARML.
35. ISO 14688-1:2017 standard «Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 1: Identification and description». Edition 2. International Organization for Standardization (ISO), 2017.
36. *Williams, S.J. Surficial sediment character of the Louisiana offshore Continental Shelf region: a GIS Compilation / S. J. Williams, M. A. Arsenault, B. J. Buczkowski [et al.] // U.S. Geological Survey Open-File Report 2006-1195. – 2006. – <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1195/index.htm>.*
37. От понятия элементарной почвенной частицы к гранулометрическому и микроагрегатному анализам (обзор) / А. В. Юдина, Д. С. Фомин, А. Д. Котельникова, Е. Ю. Милановский // Почвоведение. – 2018. – № 11. – С. 1340–1362. – DOI 10.1134/S0032180X18110096. – EDN PILSPH.
38. *Шеин, Е. В. Гранулометрический состав почв: проблемы исследования, интерпретации результатов и классификаций / Е. В. Шеин // Почвоведение. – 2009. – № 3. – С. 309–317. – EDN JWNNST.*
39. *Вадюнина, А. Ф. Методы исследования физических свойств почв / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. – М. : Агропромиздат, 1986. – 415 с. – EDN DYLNHL.*
40. *Setume, B. The Basic Principles of Sieve Analysis / B. Setume. – 2014. – https://www.academia.edu/98942379/The_Basic_Principles_of_Sieve_Analysis.*
41. *Beavers, A. H. Elutriator for Fractionating Silt / A. H. Beavers, R. L. Jones // Soil Science Society of America Journal. – 1966. Vol. 30. – P. 126–126. – <https://doi.org/10.2136/sssaj1966.03615995003000010040x>.*
42. *Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. А. Коузов; изд-е 3, перераб. – Л. : Химия, 1987. – 264 с.*
43. Методические указания по дробному гранулометрическому анализу седиментационным способом (с применением гидравлического седиментатора ГС-1). – Л. : ВНИГРИ, 1989. – 181 с.
44. *Comparison of particle-size analyzing laboratory methods / C. Centeri, G. Jakab, S. Szabo [et al.] // Environmental engineering and management journal. – 2015. – Vol. 14. – P. 1125–1135. – DOI 10.30638/eemj.2015.123.*
45. *Comparison of grain-size analysis methods for sand-dominated fluvial sediments / M. Cheetham, A. Keene, R. Bush [et al.] // Sedimentology. – 2008. – Vol. 55. – P. 1905–1913. – DOI 10.1111/j.1365-3091.2008.00972.x.*
46. *Faé, G. S. Making soil particle size analysis by laser diffraction compatible with standard soil texture determination methods / G. S. Faé, F. Montes, E. Bazilevskaya [et al.] // Soil Science Society of America Journal. – 2019. – Vol. 83. – 1244–1252. – DOI 10.2136/sssaj2018.10.0385.*
47. *Шеин, Е. В. Современные методы и приборная база мониторинга окружающей среды: лекции / Е. В. Шеин. – М. : Лекции ученых МГУ, 2016. – 62 с.*
48. *Comparison of Various Particle Size Distribution Measurement Methods: Role of Particle Shape Descriptors / M. Roostaei, M. Soroush, S. A. Hosseini [et al.] // SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control. – 2020. – DOI 10.2118/199335-MS.*
49. Sieve analysis of fine and coarse aggregates. – Texas, USA: TxDOT Tex-200-F. Construction division, 2016. – 10 p. – <https://aandastone.com/wp-content/uploads/2019/04/bit200.pdf>.

50. *Carpenter, F. G.* Methods of sieve analysis with particular reference to Bone Char / F. G. Carpenter, V. R. Deitz // *Journal of Research of the National Bureau of Standards.* – 1950. – Vol. 45. – No 4. – P. 328–336.
51. Sieve Analysis. Taking a close look at quality. Expert guidance on particle size analysis. – RETSCH GmbH Haan. – 2015. <https://www.retsch.com/files/8785/expert-guide-sieving.pdf>.
52. *Román-Sierra, J.* Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain-size analysis of beach and dune sands / J. Roman-Sierra, J. Muñoz-pérez, M. Navarro-Pons // *Sedimentology.* – 2013. – Vol. 60. – P. 1484–1497. – DOI 10.1111/sed.12040.
53. *Kumara, G. H.* Image analysis techniques on evaluation of particle size distribution of gravel / G. H. Kumara, K. Hayano, K. Ogiwara // *International Journal of Geomate.* – 2012. – Vol. 3. – P. 290–297. – DOI 10.21660/2012.5.1261.
54. *Rancourt, D.* Magnetic granulometry from equilibrium magnetization measurements: Mineral magnetometry of superparamagnetic particles and application to synthetic ferrihydrites / D. Rancourt, F. González-Lucena, P. Thibault // *American Mineralogist.* – 2004. – Vol. 89. – Iss. 7. – P. 987–997. – DOI 10.2138/am-2004-0709.
55. *Wen, B.* Comparative Study of Particle Size Analyses by Sieve-Hydrometer and Laser Diffraction Methods / B. Wen, A. Aydin, N. S. Duzgoren-Aydin // *Geotechnical Testing Journal.* – 2002. – Vol. 25. – Issue 4. – P. 434–442. – DOI 10.1520/GTJ11289J.
56. Comparison of infrared spectroscopy and laser granulometry as alternative methods to estimate soil aggregate stability in Mediterranean badlands / A. Erktan, C. Legout, S. De Danieli [et al.] // *Geoderma.* – 2016. – Vol. 271. – P. 225–233. – DOI 10.1016/j.geoderma.2016.02.025.
57. Shall we abandon sedimentation methods for particle size analysis in soils? / M. Bittelli, M. C. Andrenelli, G. Simonetti [et al.] // *Soil and Tillage Research.* – 2019. – Vol. 185. – P. 36–46. – DOI 10.1016/j.still.2018.08.018.
58. *Li, M.* Comparison of particle size distributions measured using different techniques / M. Li, D. Wilkinson, K. Patchigolla // *Particulate Science and Technology.* – 2005. – Vol. 23(3). – P. 265–284. – DOI 10.1080/02726350590955912.
59. Sieveless particle size distribution analysis of particulate materials through computer vision / C. Igathinathane, L. O. Pordesimo, E. P. Columbus [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture.* – 2009. – Vol. 66(2). – P. 147–158. – DOI 10.1016/j.compag.2009.01.005.
60. Comparison of granulometric methods and sampling strategies used in marine habitat classification and Ecological Status assessment / J. Forde, P. C. Collins, A. Patterson, R. Kennedy // *Marine pollution bulletin.* – 2012. – Vol. 64(5). – P. 1018–1028. – DOI 10.1016/j.marpolbul.2012.01.036.
61. *Shulkin, V. M.* Particle-Size Analysis of Modern Bottom Sediments by the Laser Diffraction and Sieve Methods / V. M. Shulkin, A. Y. Strukov // *Russian Journal of Pacific Geology.* – 2020. – Vol. 14. – P. 378–386. – DOI 10.1134/S1819714020040053.
62. *Taylor, K. G.* Sediments in urban river basins: A review of sediment–contaminant dynamics in an environmental system conditioned by human activities / K. G. Taylor, P. N. Owens // *J. Soils Sediments.* – 2009. – Vol. 9, No 4. – P. 281–303. DOI 10.1007/s11368-009-0103-z.
63. Обоснование экологической геоиндикаторной роли современных поверхностных пылегрязевых отложений городской среды / А. А. Селезнев, И. В. Ярмошенко, А. В. Шевченко, Г. П. Малиновский // *Метеорология и гидрология.* – 2023. – № 5. – С. 107–122. – DOI 10.52002/0130-2906-2023-5-107-122. – EDN TKBTBK.
64. *Seleznev, A. A.* Urban geochemical changes and pollution with potentially harmful elements in seven Russian cities / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko, G. P. Malinovsky // *Scientific Reports.* – 2020. – Vol. 10. – P. 1668. – DOI 10.1038/s41598-020-58434-4.
65. *Seleznev, A. A.* ¹³⁷Cs in puddle sediments as timescale tracer in urban environment / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko, A. P. Sergeev // *Journal of Environmental Radioactivity.* – 2015. – Vol. 142. – P. 9–13. DOI 10.1016/j.jenvrad.2015.01.001.
66. *Breault, R. F.* Residential street-dirt accumulation rates and chemical composition, and removal efficiencies by mechanical- and vacuum-type sweepers. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5184 / R. F. Breault, K. P. Smith, J. R. Sorenson. – New Bedford, Massachusetts, 2003–04, 2005. – 27 p.
67. landscape study of sediment formation and transport in the urban environment / I. Yarmoshenko, G. Malinovsky, E. Baglaeva, A. Seleznev // *Atmosphere.* – 2020. – Vol. 11. – No 12. – P. 1320. – DOI 10.3390/atmos11121320.

68. Sparks, D. L. Environmental soil chemistry. Third Edition / D. L. Sparks, B. Singh, M. G. Siebecker. – Elsevier, 2022. 466 p. – DOI 10.1016/C2022-0-03090-7.
69. Seleznev, A. A. Study of urban puddle sediments for understanding heavy metal pollution in an urban environment / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko // Environmental Technology & Innovation. – 2014. – Vol. 1–2. – P. 1–7. – DOI 10.1016/j.eti.2014.08.001.
70. Gy, P. Part IV: 50 years of sampling – a personal history / P. Gy // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. – 2004. – Vol. 74(1). – P. 49–60. – DOI 10.1016/j.chemolab.2004.05.014.
71. Yutong, Z. Distribution, bioavailability, and leachability of heavy metals in soil particle size fractions of urban soils (northeastern China) / Z. Yutong, X. Qing, L. Shenggao // Environ Sci Pollut Res. – 2016. – 23(14). – P. 14600–14607. – DOI 10.1007/s11356-016-6652-y.
72. Шванов, В. Н. Песчаные породы и методы их изучения: (распространение, структуры, текстуры) / В. Н. Шванов. – Ленинград : Недра, 1969. – 248 с.
73. Herngren, L. Analysis of heavy metals in road deposited sediments / L. Herngren, A. Goonetilleke, G. A. Ayoko // Anal. Chim. Acta. – 2006. – Vol. 571(2). – P. 270–278. – DOI 10.1016/j.aca.2006.04.064.
74. Pollutant transport analysis and source apportionment of the entire non-point source pollution process in separate sewer systems / Y. Ma, S. Hao, H. Zhao [et al.] // Chemosphere. – 2018. – Vol. 211. – P. 557–565. – DOI 10.1016/j.chemosphere.2018.07.184.

Сведения об авторах:

Селезнев Андриан Анатольевич, к. г.-м. н., старший научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 20. Эл. почта: sandrian@rambler.ru.

Душевина Елизавета Сергеевна, инженер Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

AN APPROACH FOR DETERMINING THE PARTICLE SIZE COMPOSITION OF CONTEMPORARY SURFACE-DEPOSITED SEDIMENTS OF AN URBAN ENVIRONMENT

A. A. Seleznev¹, E.S. Dushevina^{1,2}

¹ *Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia*

² *Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia*

The aim of the study was to develop an approach to the particle size analysis of contemporary surface sediments of the urban environment. The following tasks were undertaken:

- sampling of the sediment in urban areas located in different natural climatic, geographical, and geological zones and differing in industrial specialisation;*
- separation of samples into size fractions by sequentially washing out fine dust fractions 2–10 and 10–50 μm and wet sieving of fine and coarse sand fractions 50–100, 100–250, 250–1000 and $> 1000 \mu\text{m}$;*
- the determination of Al and Pb concentrations in the obtained granulometric fractions 2-10, 10-50, 50-100, 100-250 and 250-1000 μm using inductively coupled plasma mass spectrometry and the quartz content using X-ray diffraction analysis;*
- validation of the obtained data on the granulometric composition of sediment samples by analysing the statistical parameters of Al, Pb and quartz content in the samples.*

A total of 157 sediment samples were collected in residential areas in eight Russian cities: Vladivostok, Yekaterinburg, Murmansk, Nizhny Novgorod, Novosibirsk, Rostov-on-Don, Tyumen, and Chelyabinsk. The samples were divided into six granulometric fractions. The granulometric composition of sediment samples in cities and the distribution of Al, Pb, and quartz content by granulometric fractions were obtained. Various specific patterns of distribution of Al, Pb and quartz in granulometric fractions in cities were obtained. The proposed approach made it possible to reliably divide sediments in residential areas in cities into size fractions. The content of Al, Pb and quartz in samples can be characterised by evaluating the statistical parameters for the granulometric fraction. The obtained regularities in the distribution of the material composition of sediments by granulometric fractions are comparable with the results of other studies.

Key words: urban environment; contemporary surface-deposited sediments; particle-size composition; decantation; sieving; metals; minerals.

References

1. Levels and Factors of the Accumulation of Metals and Metalloids in Roadside Soils, Road Dust and Their PM10 Fraction in the Western Okrug of Moscow / D. V. Vlasov, O. V. Kukushkina, N. E. Kosheleva, N. S. Kasimov // *Soil Sciences*. – 2022. – No 5. – P. 538–555. – DOI 10.31857/S0032180X22050112. – EDN ISCVPM. (In Russian).
2. Granulometric distribution of metals in road-deposited sediments by using different sieving methods / L. Gelhardt, B. Kuch, U. Dittmer, A. Welker // *Environmental Advances*. – 2021. – Vol. 5. – P. 100094. – DOI 10.1016/j.envadv.2021.100094. – EDN YOOYQJ.
3. *Gunawardana, C.* Role of particle size and composition in metal adsorption by solids deposited on urban road surfaces / C. Gunawardana, P. Egodawatta, A. Goonetilleke // *Environ. Pollut.* – 2014. – Vol. 184. – P. 44–53. – DOI 10.1016/j.envpol.2013.08.010.
4. *Kettler, T. A.* Simplified Method for Soil Particle-Size Determination to Accompany Soil-Quality Analyses / T. A. Kettler, J. W. Doran, T. L. Gilbert // *Soil Science Society of America Journal*. – 2001. – Vol. 65. – P. 849–852. – DOI 10.2136/sssaj2001.653849x.
5. *Cambardella, C. A.* Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence / C. A. Cambardella, E. T. Elliott // *Soil Science Society of America Journal*. – 1992. – Vol. 56. – P. 777–783. – DOI 10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x.

6. Świercz, A. Accumulation of heavy metals in the urban soils of the city of Skarzysko-Kamienna (Poland) with regard to land use / A Świercz, E. Zajecka // Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. – 2018. – Vol. 13. – No 1. – P. 249–266. – DOI 10.26471/cjees/2018/013/022.
7. Wu, J. Urban Ecology and Sustainability: The State-of-the-Science and Future Directions / J. Wu // Landscape and Urban Planning. – 2014. – No 125. – P. 209–221. – DOI 10.1016/j.landurbplan.2014.01.018.
8. Integration of soils and pedosimilar formations of urban areas into the classification of soils in Russia / T. V. Prokofieva, M. I. Gerasimova, O. S. Bezuglova [et al.] // Soil Science. – 2014. – No 10. – P. 1155–1164. – DOI 10.7868/S0032180X14100104. – EDN SNWNIZ. (In Russian)
9. Agarkova-Lyakh, I. V. Adaptation of a method of the granulometric analysis for studying of microplastic pollution of deposits of a coastal zone of the sea / I. V. Agarkova-Lyakh, E. N. Sibirtsova // Principles of the Ecology. – 2019. – No 3. – P. 155–162. – DOI 10.15393/j1.art.2019.8622. (In Russian)
10. Guzmán, R. Granulometric characterization of sediments in the anastomosed system of the Apure river Venezuela / R. Guzmán, M. Bezada, I. Rodríguez-Santalla // Journal of South American Earth Sciences. – 2021. – Vol. 109. – 103274. – DOI 10.1016/j.jsames.2021.103274.
11. Wu, J. The effect of settlement on wastewater carbon source availability based on respirometric and granulometric analysis / J. Wu, C. He // Chemical Engineering Journal. – 2012. – Vol. 189–190. – P. 250–255. – DOI 10.1016/j.cej.2012.02.066.
12. Selbig, W. R. From streets to streams: assessing the toxicity potential of urban sediment by particle size / W. R. Selbig, R. Bannerman, S. R. Corsi // Sci. Total Environ. – 2013. – Vol. 444. – P. 381–391. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2012.11.094.
13. Granulometric analysis of atmospheric particles from environmentally favorable and problematic areas of Vladivostok / V. I. Yankova, T. A. Gvozdenko, K. S. Golokhvast [et al.] // Health. Medical ecology. Science. – 2014. – No 2 (56). – P. 62–66. – EDN SIELJT. (In Russian)
14. Vu, T. V. Review: particle number size distributions from seven major sources and implications for source apportionment studies / T. V. Vu, J. M. Delgado-Saborit, R. M. Harrison // Atmos. Environ. – 2015. – Vol. 122. – P. 114–132. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2015.09.027.
15. Heavy metal atmospheric deposition study in Moscow region, Russia / K. Vergel, I. Zinicovscaia, N. Yushin, M. V. Frontasyeva // Bull. Environ. Contam. Toxicol. – 2019. – Vol. 103. – P. 435–440. – DOI 10.1007/s00128-019-02672-4.
16. Partitioning and solubilities of metals and metalloids in spring rains in Moscow megacity / D. Vlasov, N. Kasimov, I. Eremina [et al.] // Atmospheric Pollution Research. – 2021. – Vol. 12(1). – P. 255–271. – DOI 10.1016/j.apr.2020.09.012.
17. Temporal Variations in Composition of Atmospheric Aerosol in Moscow in the Spring of 2020 / Gubanov D. P., Vinogradova A. A., Iordanskii M. A., Skorokhod A. I. // Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and ocean. – 2021. – Vol. 57. – No 3. – P. 334–348. – DOI 10.31857/S0002351521030056. – EDN ZQJRLH. (In Russian)
18. Granulometric composition of settled aerosol substance and ratio of phenolic compounds in needles of different age / M. P. Tentukov, V. I. Mikhailov, D. A. Timushev [et al.] // Optics of atmosphere and ocean. – 2021. – Vol. 34. – No 02. – P. 122–128. – DOI 10.15372/AOO20210207. (In Russian)
19. Ikhane, P. R. Granulometric analysis and heavy mineral studies of the sandstone facies exposed near Igbile, southwestern Nigeria / P. R. Ikhane, A. I. Akintola, S. I. Bankole [et al.] // International Research Journal of Geology and Mining (IRJGM). – 2013. – Vol. 3(4). – P. 158–178.
20. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: Partitioning and deposition rates in Western Moscow / D. Vlasov, J. Vasil'chuk, N. Kosheleva, N. Kasimov // Atmosphere. – 2020. – Vol. 11. – 907. – DOI 10.3390/atmos11090907.
21. Long-term monitoring of snow cover within natural and urbanized landscapes of the Moscow region / L. G. Bogatyrev, N. I. Zhilin, V. P. [et al.] // Vestnik Moskovskogo universiteta. – Seriya 5, Geografiya. – 2018. – No 2. – P. 85–96. (In Russian)
22. Rienda, I. C. Road dust resuspension: A review / I. C. Rienda, C. A. Alves // Atmos. Res. – 2021. – Vol. 261. – 105740. – DOI 10.1016/j.atmosres.2021.105740.
23. Methodology for the separation of soil and dust particle size fractions by the centrifugation method / L. A. Bezberdaya, P. R. Enchilik, N. E. Kosheleva [et al.] // Engineering Ecology: Proceedings of the International Symposium named after A.S. Popov, Moscow, 2023. – Moscow, 2023. – P. 178–182. – EDN NWOBMJ. (In Russian)

24. Particulate Matter deposition on *Quercus ilex* leaves in an industrial city of central Italy / G. Sgrigna, A. Sæbø, S. Gawronski [et al.] // *Environ. Pollut.* – 2015. – Vol. 197. – P. 187–194. – DOI 10.1016/j.envpol.2014.11.030.
25. *Vasilyev, S. B.* Theoretical and practical aspects of recultivation of technogenic landscapes / S. B. Vasilyev, A. R. Rodin // *Lesnoy Vestnik / Forestry Bulletin.* – 2016. – Vol. 20(1). – P. 118–122. – EDN VNUGYZ. (In Russian)
26. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 / A. J. Cohen, M. Brauer, R. Burnett [et al.] // *Lancet.* – 2017. – Vol. 389(10082). – P. 1907–1918. – DOI 10.1016/S0140-6736(17)30505-6.
27. The Lancet Commission on pollution and health / P. J. Landrigan, R. Fuller, N. J. R. Acosta [et al.] // *Lancet.* – 2018. – Vol. 391(10119). – P. 462–512. – DOI 10.1016/S0140-6736(17)32345-0. – Erratum in: *Lancet.* 2018. – Vol. 391(10119). – P. 430. – DOI 10.1016/S0140-6736(17)32817-9.
28. *Prosviryakova, I. A.* Hygienic assessment of PM10 and PM2.5 contents in the atmosphere and population health risk in zones influenced by emissions from stationary sources located at industrial enterprises / I. A. Prosviryakova, L. M. Shevchuk // *Health Risk Analysis.* – 2018. – No 2. – P. 14–22. – DOI 10.21668/health.risk/2018.2.02.eng. (In Russian).
29. *Katola, V. M.* Dust: sources of formation, its general characteristics and dust diseases (brief review) / V. M. Katola, V. E. Komogorceva // *Bulletin physiology and pathology of respiration.* – 2018. – No 67. – P. 111–116. – DOI 10.12737/article_5a9f2eaf492cf9.67393066. (In Russian)
30. *Romanovskaya, A. Yu.* Soil dust aerosol in the atmosphere: sources, quantities, properties (overview). / A. Yu. Romanovskaya, I. Yu. Savin // *Dokuchaev Soil Bulletin.* – 2021. – No 109. – P. 36–95. – DOI 10.19047/0136-1694-2021-109-36-95. (In Russian)
31. Ecotoxicity of urban dust: existing practices and perspectives for the bioassay application (review) / O. V. Nikolaeva, S. A. Kulachkova, A. A. Astaikina [et al.] // *Moscow University Soil Studies Bulletin.* – 2022. – No 3. – P. 3–19. – EDN TVRANF. (In Russian)
32. *Adushkin, V. V.* Fine particles in natural and technogenic geosystems / V. V. Adushkin, S. I. Popel // *Physics of the Earth.* – 2012. – No 3. – P. 81–92. – EDN OWENXN. (In Russian)
33. *Sotnezov, A.* Morphological Composition of Solid Municipal Waste / A. Sotnezov, V. Zaytsev, N. P. Tarasova // *Safety in Technosphere.* – 2015. – Vol. 4. – P. 10–15. – DOI 10.12737/14429.
34. *Alkhimova, O. D.* Waste as a factor of environmental degradation / O. D. Alkhimova, S. V. Miskeich // *Study, conservation and restoration of natural landscapes. Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference 'Study, Conservation and Restoration of Natural Landscapes' (Volgograd, 15–19 September 2014).* – Volgograd: Volgograd Scientific Publishing House Ltd., 2014. – P. 296–301. – EDN VNARML. (In Russian)
35. ISO 14688-1:2017 standard «Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 1: Identification and description». Edition 2. International Organization for Standardization (ISO), 2017.
36. *Williams, S. J.* Surficial sediment character of the Louisiana offshore Continental Shelf region: a GIS Compilation / S. J. Williams, M. A. Arsenault, B. J. Buczkowski [et al.] // *U.S. Geological Survey Open-File Report 2006-1195.* – 2006. – <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1195/index.htm>.
37. From the Notion of Elementary Soil Particle to the Particle-Size and Microaggregate-Size Distribution Analyses: A Review / A. V. Yudina, D. S. Fomin, A. D. Kotelnikova, E. Yu. Milanovskii // *Eurasian Soil Science.* – 2018. – Vol 51(11). – P. 1240–1262. – DOI 10.1134/S0032180X18110096. – EDN PILSPH. (In Russian)
38. *Shein, E. V.* Granulometric composition of soils: issues in study, interpretation of results, and classification / E. V. Shein // *Soil Science.* – 2009. – No 3. – P. 309–317. – EDN JWNNST. (In Russian)
39. *Vadyunina, A. F.* Methods to study the physical properties of soils / A. F. Vadyunina, Z. A. Korchagina. – Moscow: Agropromizdat, 1986. – 415 p. – EDN DYLLHL. (In Russian)
40. *Setume, B.* The Basic Principles of Sieve Analysis / B. Setume. – 2014. – https://www.academia.edu/98942379/The_Basic_Principles_of_Sieve_Analysis.
41. *Beavers, A. H.* Elutriator for Fractionating Silt / A. H. Beavers, R. L. Jones // *Soil Science Society of America Journal.* – 1966. Vol. 30. – P. 126–126. – <https://doi.org/10.2136/sssaj1966.03615995003000010040x>.
42. *Kouzov, P. A.* Fundamentals of analysis of the particle size distribution of industrial dusts and crushed materials / P. A. Kouzov. – 3rd ed., rev. – L.: Chemistry, 1987. – 264 p. (In Russian).
43. Methodological guidelines for fractional granulometric analysis using the sedimentation method (employing the GS-1 hydraulic sedimentator). – L.: VNIGRI, 1989. – 181 p. (In Russian).

44. Comparison of particle-size analyzing laboratory methods / C. Centeri, G. Jakab, S. Szabo [et al.] // *Environmental engineering and management journal*. – 2015. – Vol. 14. – P. 1125–1135. – DOI 10.30638/eemj.2015.123.
45. Comparison of grain-size analysis methods for sand-dominated fluvial sediments / M. Cheetham, A. Keene, R. Bush [et al.] // *Sedimentology*. – 2008. – Vol. 55. – P. 1905–1913. – DOI 10.1111/j.1365-3091.2008.00972.x.
46. Faé, G. S. Making soil particle size analysis by laser diffraction compatible with standard soil texture determination methods / G. S. Faé, F. Montes, E. Bazilevskaya [et al.] // *Soil Science Society of America Journal*. – 2019. – Vol. 83. – P. 1244–1252. – DOI 10.2136/sssaj2018.10.0385.
47. Shein, E. V. Contemporary methods and instrument base for environmental monitoring. Lectures by scientists of Moscow State University / E. V. Shein. – Moscow, Moscow State University, 2016. – 62 p. (In Russian).
48. Comparison of Various Particle Size Distribution Measurement Methods: Role of Particle Shape Descriptors / M. Roostaei, M. Soroush, S. A. Hosseini [et al.] // *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control*. – 2020. – DOI 10.2118/199335-MS.
49. Sieve analysis of fine and coarse aggregates. – Texas, USA: TxDOT Tex-200-F. Construction division, 2016. – 10 p. – <https://aandastone.com/wp-content/uploads/2019/04/bit200.pdf>.
50. Carpenter, F. G. Methods of sieve analysis with particular reference to Bone Char / F. G. Carpenter, V. R. Deitz // *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. – 1950. – Vol. 45. – No 4. – P. 328–336.
51. Sieve Analysis. Taking a close look at quality. Expert guidance on particle size analysis. – RETSCH GmbH Haan. – 2015. <https://www.retsch.com/files/8785/expert-guide-sieving.pdf>.
52. Román-Sierra, J. Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain-size analysis of beach and dune sands / J. Roman-Sierra, J. Muñoz-pérez, M. Navarro-Pons // *Sedimentology*. – 2013. – Vol. 60. – P. 1484–1497. – DOI 10.1111/sed.12040.
53. Kumara, G. H. Image analysis techniques on evaluation of particle size distribution of gravel / G. H. Kumara, K. Hayano, K. Ogiwara // *International Journal of Geomate*. – 2012. – Vol. 3. – P. 290–297. – DOI 10.21660/2012.5.1261.
54. Rancourt, D. Magnetic granulometry from equilibrium magnetization measurements: Mineral magnetometry of superparamagnetic particles and application to synthetic ferrihydrites / D. Rancourt, F. González-Lucena, P. Thibault // *American Mineralogist*. – 2004. – Vol. 89. – Iss. 7. – P. 987–997. – DOI 10.2138/am-2004-0709.
55. Wen, B. Comparative Study of Particle Size Analyses by Sieve-Hydrometer and Laser Diffraction Methods / B. Wen, A. Aydin, N. S. Duzgoren-Aydin // *Geotechnical Testing Journal*. – 2002. – Vol. 25. – Issue 4. – P. 434–442. – DOI 10.1520/GTJ11289J.
56. Comparison of infrared spectroscopy and laser granulometry as alternative methods to estimate soil aggregate stability in Mediterranean badlands / A. Erktan, C. Legout, S. De Danieli [et al.] // *Geoderma*. – 2016. – Vol. 271. – P. 225–233. – DOI 10.1016/j.geoderma.2016.02.025.
57. Shall we abandon sedimentation methods for particle size analysis in soils? / M. Bittelli, M. C. Andrenelli, G. Simonetti [et al.] // *Soil and Tillage Research*. – 2019. – Vol. 185. – P. 36–46. – DOI 10.1016/j.still.2018.08.018.
58. Li, M. Comparison of particle size distributions measured using different techniques / M. Li, D. Wilkinson, K. Patchigolla // *Particulate Science and Technology*. – 2005. – Vol. 23(3). – P. 265–284. – DOI 10.1080/02726350590955912.
59. Sieveless particle size distribution analysis of particulate materials through computer vision / C. Igathinathane, L. O. Pordesimo, E. P. Columbus [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2009. – Vol. 66(2). – P. 147–158. – DOI 10.1016/j.compag.2009.01.005.
60. Comparison of granulometric methods and sampling strategies used in marine habitat classification and Ecological Status assessment / J. Forde, P. C. Collins, A. Patterson, R. Kennedy // *Marine pollution bulletin*. – 2012. – Vol. 64(5). – P. 1018–1028. – DOI 10.1016/j.marpolbul.2012.01.036.
61. Shulkin, V. M. Particle-Size Analysis of Modern Bottom Sediments by the Laser Diffraction and Sieve Methods / V. M. Shulkin, A. Y. Strukov // *Russian Journal of Pacific Geology*. – 2020. – Vol. 14. – P. 378–386. – DOI 10.1134/S1819714020040053.
62. Taylor, K. G. Sediments in urban river basins: A review of sediment–contaminant dynamics in an environmental system conditioned by human activities / K. G. Taylor, P. N. Owens // *J. Soils Sediments*. – 2009. – Vol. 9. – No 4. – P. 281–303. DOI 10.1007/s11368-009-0103-z.

63. Rationale for the Ecological Geoindicator Role of Contemporary Surface Sediments of Dust and Dirt in Urban Environment / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko, A. V. Shevchenko [et al.] // Russ. Meteorol. Hydrol. – 2023. – No 5. – P. 107–122. – DOI 10.52002/0130-2906-2023-5-107-122. – EDN TKBTBK. (In Russian)
64. Seleznev, A. A. Urban geochemical changes and pollution with potentially harmful elements in seven Russian cities / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko, G. P. Malinovsky // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – P. 1668. – DOI 10.1038/s41598-020-58434-4.
65. Seleznev, A. A. ¹³⁷Cs in puddle sediments as timescale tracer in urban environment / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko, A. P. Sergeev // Journal of Environmental Radioactivity. – 2015. – Vol. 142. – P. 9–13. DOI 10.1016/j.jenvrad.2015.01.001.
66. Breault, R. F. Residential street-dirt accumulation rates and chemical composition, and removal efficiencies by mechanical- and vacuum-type sweepers. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5184 / R. F. Breault, K. P. Smith, J. R. Sorenson. – New Bedford, Massachusetts, 2003–04, 2005. – 27 p.
67. landscape study of sediment formation and transport in the urban environment / I. Yarmoshenko, G. Malinovsky, E. Baglaeva, A. Seleznev // Atmosphere. – 2020. – Vol. 11. – No 12. – P. 1320. – DOI 10.3390/atmos11121320.
68. Sparks, D. L. Environmental soil chemistry. Third Edition / D. L. Sparks, B. Singh, M. G. Siebecker. – Elsevier, 2022. 466 p. – DOI 10.1016/C2022-0-03090-7.
69. Seleznev, A. A. Study of urban puddle sediments for understanding heavy metal pollution in an urban environment / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko // Environmental Technology & Innovation. – 2014. – Vol. 1–2. – P. 1–7. – DOI 10.1016/j.eti.2014.08.001.
70. Gy, P. Part IV: 50 years of sampling – a personal history / P. Gy // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. – 2004. – Vol. 74(1). – P. 49–60. – DOI 10.1016/j.chemolab.2004.05.014.
71. Yutong, Z. Distribution, bioavailability, and leachability of heavy metals in soil particle size fractions of urban soils (northeastern China) / Z. Yutong, X. Qing, L. Shenggao // Environ Sci Pollut Res. – 2016. – 23(14). – P. 14600–14607. – DOI 10.1007/s11356-016-6652-y.
72. Shvanov, V. N. Sandy rocks and methods of their study: (Distribution, structures, textures) / V. N. Shvanov. – Leningrad: Nedra, 1969. – 248 p. (In Russian)
73. Hergren, L. Analysis of heavy metals in road deposited sediments / L. Hergren, A. Goonetilleke, G. A. Ayoko // Anal. Chim. Acta. – 2006. – Vol. 571(2). – P. 270–278. – DOI 10.1016/j.aca.2006.04.064.
74. Pollutant transport analysis and source apportionment of the entire non-point source pollution process in separate sewer systems / Y. Ma, S. Hao, H. Zhao [et al.] // Chemosphere. – 2018. – Vol. 211. – P. 557–565. – DOI 10.1016/j.chemosphere.2018.07.184.