

Определение окатанности песчаных кварцевых зерен в поверхностно-депонированных отложениях урбанизированной среды (на примере г. Мурманска)

Глухов В.С.^{1,2}, Панкрушина Е.А.^{2,3}, Рянская А. Д.³, Селезнев А.А.^{1,2}, Малиновский Г.П.¹, Ярмошенко И.В.¹

¹ Институт промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, glukhov.v.s.work@gmail.com

² Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

³ Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты анализа окатанности частиц кварца, отобранных из гранулометрической фракции 250–1000 мкм проб современных поверхностно депонированных отложений (СПДО) г. Мурманска. Цель исследования заключалась в разработке метода расчета окатанности частиц кварца СПДО для решения геоэкологических задач по оценке связи окатанности частиц и концентрации пыли, тяжелых металлов и металлоидов в рассматриваемых седиментах. Для анализа окатанности была разработана методика, включающая в себя: анализ шлихов, идентификацию минералов методом рамановской спектроскопии, определение параметров формы зерен методом оптической микроскопии и расчет процентной доли окатанности (О) и класса окатанности (Ω) частицы. Полученные параметры окатанности О и Ω были сверены с таблицей И. С. Ухова, которая содержит следующие классы: резко угловатые зерна (О в диапазоне 0–4.6 % соответствует Ω=1 класс), угловатые зерна (4.6–9.9 %, Ω=2 класс), полуугловатые зерна (9.9–21.4 %, Ω=3 класс), полуокруглые зерна (21.4–45.9 %, Ω=4 класс), округлые зерна (45.9–100 %, Ω=5 класс). Выполнена оценка окатанности 403 кварцевых частиц, отобранных из фракций 250–1000 мкм 10 проб осадка СПДО г. Мурманска. По результатам анализа 300 частиц (74 %) относится к 4 классу окатанности, который преобладает во всех пробах. 100 частиц 5-го (максимального) класса окатанности составляют 25 % от общего количества и их доля в пробах варьируется от 15 до 39 %. Всего 3 частицы (1%) относятся к 3 классу окатанности. В пробах песчаной фракции при увеличении доли зерен 5-го класса окатанности в пылевой фракции наблюдается увеличение доли типоморфных металлов и техногенных микроэлементов (Pb, Cu, Zn). Разработанная методика позволила определить характеристики окатанности кварца в пробах различного происхождения.

Ключевые слова: окатанность, шлиховой анализ, кварц, загрязнение, поллютант, поверхностно депонированные отложения, городская среда.

Determination of roundness of sandy quartz grains in surface-deposited sediments in the urban environment (by the example of Murmansk)

Glukhov V.S.^{1,2}, Pankrushina E.A.^{2,3}, Seleznev A.A.^{1,2}, Malinovsky G.P.¹, Yarmoshenko I.V.¹

¹ Institute of Industrial Ecology UB RAS, Ekaterinburg, glukhov.v.s.work@gmail.com

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

³ Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry. A.N. Zavaritskii Institute of Geology and Geochemistry Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Ekaterinburg

Abstract. This paper represents the results of roundness analysis of quartz grains of 250–1000 μm size fraction of contemporary urban surface-deposited sediment (CSDS) samples from Murmansk, Russia. The aim of the study was to develop a method for evaluating the roundness of quartz grains in CSDS to study geo-ecological problems on relationship between roundness class and dust, heavy metal and metalloid concentrations in the sediments. The methodology developed for the roundness analysis includes: heavy minerals concentrate analysis, identification of minerals with Raman spectroscopy, determination of grain micromorphology parameters by optical microscopy and calculation of grain roundness portion (O) and roundness class (Ω). The resulting roundness parameters O and Ω were checked according to the table of I.S. Ukhov, which contain the classes as follow: sharply angular grains (O between 0–4.6 % corresponds to Ω = 1 class), angular grains (4.6–9.9 %, Ω = 2), semi-angular grains (9.9–21.4 %, Ω = 3), semi-rounded grains (21.4–45.9 %, Ω = 4), rounded grains (45.9–100 %, Ω = 5). In the course

of work the roundness of 403 quartz particles taken from 250–1000 μm fractions of 10 Murmansk CSDS samples were evaluated. The results show that 300 particles (74 %) belong to the 4th class of roundness which predominates in all samples. 100 particles of the 5th (maximum) roundness class represent 25 % of the total amount and their share in the samples varies from 15 to 39 %. Only 3 particles (1%) belong to the 3rd class of roundness. It was found that in the sand fraction samples, with an increase in the proportion of grains of the 5th class pellicularity in the dust fraction, there is an increase in the proportion of typomorphic metals and technogenic trace elements (Pb, Cu, Zn). The developed technique of the analysis of grey schlichs by roundness of quartz particles allowed defining characteristics of samples roundness of different origin.

Keywords: roundness, heavy minerals concentrate analysis, quartz roundness assessment, pollution, surface-deposited sediments, urban environment.

Введение

Анализ морфологии природных и техногенных минеральных частиц городских твердых наносов (седиментов) имеет значение для понимания процессов седиментогенеза, протекающего на современных урбанизированных территориях.

Одной из морфологических особенностей при диагностике условий переноса и силы транспортирующей среды является окатанность – степень изменения морфологии частицы при ее стремлении приблизиться к гладкой шаровидной или эллипсоидальной форме (Ухов, 2013). Также окатанность служит индикатором расстояния переноса частиц между различными средами и ландшафтными зонами и говорит о физико-географических условиях (Преображенский и др., 1954; Алексеев, 2001).

Под воздействием атмосферных осадков между ландшафтными зонами урбанизированной среды происходит миграция частиц поверхностно депонированных отложений по селитебной катене. При переносе геометрия частицы меняется под влиянием агрессивных сред ее локализации (Шило, 2002). Изменение геометрии частицы приводит к появлению пылевой фракции размерностью от < 2 до 100 мкм.

В аридных условиях часть пыли, при воздействии разнохарактерных внешних сил, переходит в состояние взвеси. Воздушная пылевая взвесь в городах оказывает негативное воздействие на эстетическую составляющую архитектурных сооружений города, сокращает время эксплуатации технических средств и средств передвижения, ухудшает внешний вид и состояние одежды, а также отрицательно влияет на физическое и ментальное здоровье граждан (Yarmoshenko et al., 2020; Seleznev et al., 2020). Подобная пыль имеет свойство накапливать в себе бактерии, вирусы и тяжелые металлы и металлоиды (ТММ), так как является продуктом более крупных частиц и их поверхности, на которой и осаждаются перечисленные загрязнители (поллютанты) (Касимов и др., 2016).

Устранение перечисленных негативных аспектов, связанных с пылевой фракцией в городе, обусловило актуальность разработки метода оценки окатанности частиц современных поверхностно депонированных отложений (СПДО), которые могут применяться в эколого-геохимических исследованиях в городской среде. В качестве объекта исследования выбраны частицы кварца, которые повсеместно присутствуют в грунтах и СПДО в урбанизированном ландшафте. Районом исследования был выбран г. Мурманск. В ходе исследования решался следующий ряд задач: получить навески проб СПДО гранулометрической фракции 250-1000 мкм; отобрать из полученных навесок частицы кварца; создать базу данных параметров отобранных частиц; определить процент и классы окатанности отобранных частиц; сравнить полученные показатели с данными элементного и минерального состава.

Материалы и методы

Рассматриваемые образцы СПДО были отобраны в теплое время года на 6 площадках внутренних и внешних дворовых зон селитебных районов территории города в 2019 г. Аналогичная схема отбора проб использована в экологогеохимических исследованиях в других городах и описана в работе (Seleznev et al., 2020).

Пробы прошли пробоподготовку и деление на шесть гранулометрических фракций (2–10, 10–50, 50–100, 100–250, 250–1000, > 1000 мкм). В ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН полученные гранулометрические фракции прошли минеральный анализ методом РФА и элементный анализ методом ICP-MS. Геологическое строение и минеральный состав материнских горных пород территории обуславливают полученный минеральный состав проб (ср. арифметическое по 5 гранулометрическим навескам): плагиоклаз 38 %, кварц 28 %, гидрослюда 6 %, калиевый полевой шпат 9 %, биотит 8 %, амфибол 6 %, хлорит 2 %, пирит 1 %, доломит 1 %, кальцит 1 % (ВСЕГЕИ, 2007, лист R-36). Результаты минерального анализа продемонстрированы в таблице 1.

Таблица 1. Минеральный состав гранулометрических фракций (мкм)

Table 1. Mineral composition of granulometric fractions (μm)

Минерал	Фракция гранулометрической навески и ее минеральный состав со средне арифметическими значениями в (%)				
	2–10	10–50	50–100	100–250	250–1000
Кварц	26	19	24	36	36
Доломит	0	0	2	0	2
Кальцит	0	0	1	0	0
Плагиоклаз	28	37	40	41	45
КПШ	8	9	11	9	9
Хлорит	4	5	4	0	0
Гидрослюда	18	13	0	0	0
Амфибол	4	5	6	9	4
Биотит	10	10	10	5	4
Пирит	2	2	2	0	0

Для работы с навесками была разработана методика, включающая в себя квартование, шлиховой анализ, рамановскую спектроскопию, оптическую микроскопию, математический метод определения формы зерен породы.

Из шлиха методом квартования (Ботвикин и др., 1966) отбирались навески массой 4–6 г. Из полученных навесок методом оптической микроскопии и шлихового анализа (Угрюмов, 1996) отбирались зерна кварца, которые объемно-весовым методом были выделены в четыре тонкие полоски длиной до 10 мм и шириной до 1 мм с фиксацией на промаркированном прямоугольном фрагменте скотча. Каждой частице были присвоены уникальные координаты ($x = \text{№ частицы в линии}$, $y = \text{№ линии}$) и код. Контроль идентификации минералов был произведен методом рамановской спектроскопии (Лебедева, 2012) на приборе LABRAM HR 800 EVOLUTION в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН. Используя программное обеспечение видеокамеры оптического микроскопа METALLOGRAPHIC MICROSCOPE XJP-H100, у частиц были определены: длина, ширина, периметр и площадь поверхности частицы, площадь минимально описанного и максимально вписанного эллипса частицы (включая значения минимальных и максимальных их дуг). Используя методику определения класса окатанности И.С. Ухова (2013) был произведен расчет поправочного коэффициента, процентной доли окатанности частицы (O) и класса окатанности (Ω):

$$O = \frac{S^2_{\text{впис.элл.}}}{S_{\text{опис.элл.}} \cdot S_{\text{част}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $S^2_{\text{впис. элл.}}$ – площадь максимально вписанного эллипса,

$S^2_{\text{опис. элл.}}$ – площадь минимально описанного эллипса,

$S_{\text{част.}}$ – площадь контура частицы,

$$\Omega = \log_{2.15} O. \quad (2)$$

Полученные значения процента и класса окатанности были сверены на соответствие со значениями из таблицы классов окатанности И.С. Ухова: резко угловатые зерна (0–4.6 % = 1 Ω), угловатые зерна (4.6–9.9 % = 2 Ω), полуугловатые зерна (9.9–21.4 % = 3 Ω), полуокруглые зерна (21.4–45.9 % = 4 Ω), округлые зерна (45.9–100.0 % = 5 Ω).

Результаты и обсуждение

Разработан метод оценки окатанности частиц кварца в поверхностно депонированных отложениях урбанизированной среды.

Методом квартования из 10 проб поверхностного осадка, отобранного в г. Мурманске, со средней массой 85.83 г, отобрано 10 навесок со средней массой 4.82 г. Методом шлихового анализа из навесок было отобрано 403 частицы (40 линий со средней длиной 0.97 мм, 7–12 частицы в линии). С использованием рамановской спектроскопии все они идентифицированы как кварцевые. Результаты оценки окатанности 403 частиц кварца из фракции 250–1000 мкм в 10 пробах поверхностно депонированных отложений, отобранных в городе Мурманск представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты исследования 403 частиц кварца, отобранных из гранулометрической фракции 250–1000 мкм 10 навесок СПДО в г. Мурманске, по разработанной методике анализа серых шлихов по окатанности частиц кварца

Table 2. Results of examination of 403 quartz particles sampled from the 250–1000 μm grain size fraction of 10 samples of CSDS in Murmansk using the developed technique of analysis of gray schlichs by fineness of quartz particles

№ пробы	Характеристика	Класс окатанности (Ω)					
		3		4		5	
	Тип покрытия	Кол-во частиц	Доля (%)	Кол-во частиц	Доля (%)	Кол-во частиц	Доля (%)
MUR_1_626-0	осадок	1	3	23	66	11	31
MUR_10_609-0	осадок	0	0	35	85	6	15
MUR_11_620-0	осадок	0	0	26	70	11	30
MUR_14_603-0	осадок	1	3	31	78	8	20
MUR_17_633-0	осадок	0	0	34	83	7	17
MUR_19_610	осадок	0	0	28	72	11	28
MUR_23_630-0	осадок	0	0	37	84	7	16
MUR_24_614-0	осадок	1	3	28	76	8	22
MUR_25_634-0	осадок	0	0	31	69	14	31
MUR_5_624-0	осадок	0	0	27	61	17	39
Итого по г. Мурманску		3	1	300	74	100	25

Как видно из таблицы, из 403 частиц к 3 классу окатанности (рис. 1 а) относится всего 1 % частиц (3 частицы). Большинство частиц – 74 % (300 частиц), принадлежит к 4 классу окатанности (рис. 1 б), данный класс окатанности преобладает во всех пробах. Частицы 5-го (максимального) класса окатанности (рис. 1 с) составляют 25 %, при этом доля частиц 5 класса в пробах варьируется от 15 до 39 %. Примеры частиц представлены на рисунке 1.

По типу дворовых зон преобладает: 3 класс окатанности – внешний газон, внутренний газон, внешняя парковка; 4 и 5 класс окатанности – внешний тротуар, внутренний газон, внешний газон, внутренний проезд, детская площадка, внешняя парковка.

На рисунке 2 представлено распределение числа частиц по окатанности (О). Из рисунка видно, что распределение близко к симметричному, нормальному.

Предварительный анализ связи окатанности частиц с различными геохимическими характеристиками СПДО показал, следующее. Доля частиц разного класса окатанности в пробах связана с ландшафтными условиями образования осадка. В двух группах выражена пропорциональная зависимость доли кварца в пылевой части пробы (2–100 мкм) от доли частиц 5 класса окатанности в пробе (рис. 3, 4). Группа 1 включает пробы, отобранные на участках с большой долей нарушен-

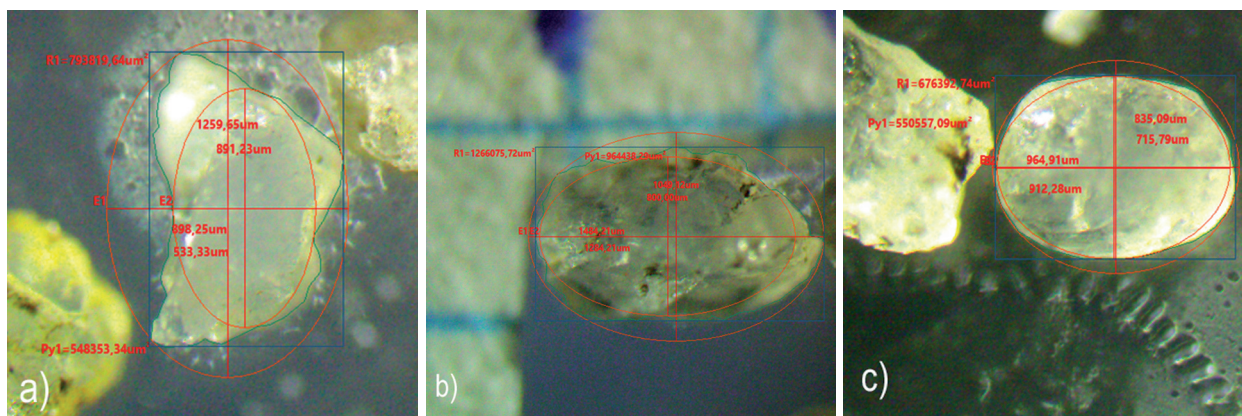


Рис. 1. Примеры частицы кварца 3–5 класс окатанности: а) – 3 класс, б) – 4 класс, с) – 5 класс.

Fig. 1: Examples of quartz particles of 3–5 classes: a) – class 3, b) – class 4, c) – class 5.

ных поверхности (более 50 % площади); группа 2 – пробы, отобранные на участках с низкой долей нарушенных поверхности (менее 50 %).

Высокая степень нарушенности поверхностей может указывать на повышенное антропогенное воздействие на данном участке, например, вследствие воздействия автотранспорта или земляных, ремонтно-строительных работ. Как показано рисунке 5 наблюдается тенденция повышения загрязнения медью проб на участках с высоким антропогенным воздействием (группа 1).

Предположительно высокий класс окатанности частиц кварца на участках с низкой долей нарушенных поверхностей связан с низкой интенсивностью привноса нового материала и переокатыванию старого, о чем свидетельствует повышение содержания кварца в пылевой фракции с повышением доли частиц 5 класса окатанности в пробе (рис. 3–7).

В пробах песчаной фракции, при увеличении доли зерен 5 класса окатанности в пылевой фракции, наблюдается увеличение доли типоморфных металлов и техногенных микроэлементов (Pb, Cu, Zn) (рис. 8, 9).

В целом по результатам анализа связи между характеристиками окатанности частиц кварца и геохимическим параметрами проб отложений можно сделать вывод о том, что окатанность является одним из информативных индикаторов процессов эколого-геохимической трансформации городских ландшафтов.



Рис. 2. Гистограмма распределения частиц по окатанности.

Fig. 2. Histogram of the particle roundness distribution.

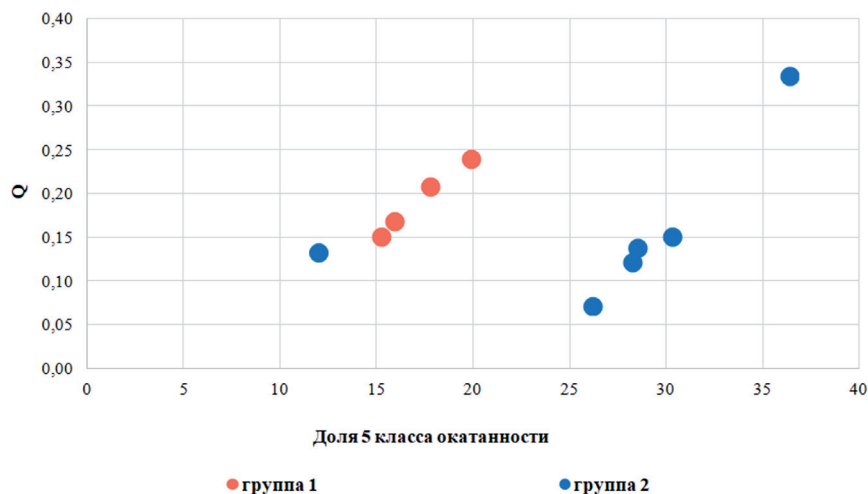


Рис. 3. Зависимость доли кварца в пылевой фракции (Q) от доли частиц 5 класса окатанности в пробах.
 Fig. 3. Dependence of the fraction of quartz in the dust on the fraction of particles of 5 class roundness in the samples.

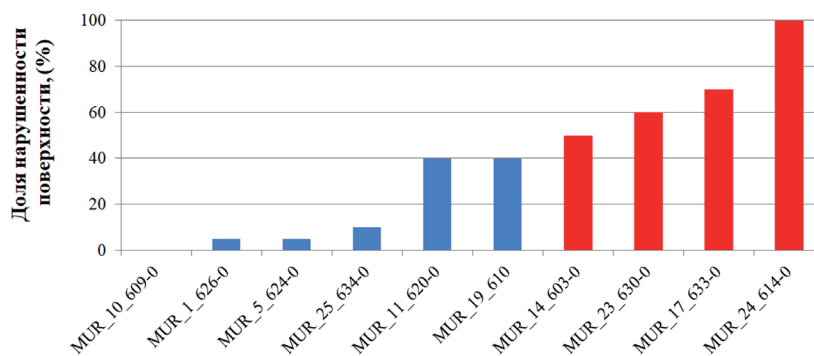


Рис. 4. Доля частиц 5 класс окатанности в пробах СПДО. Столбцы красного цвета – пробы, отобранные на участках с большой долей нарушенной поверхности более 50 %. Столбцы синего цвета пробы, отобранные на участках с низкой долей нарушенной поверхности менее 50 %.
 Fig. 4. Proportion of 5 class particles in CSDS samples. Red bars are samples taken at sites with high fraction of disturbed surface, greater than 50 %. Blue bars are samples taken at sites with low fraction of disturbed surface, less than 50 %.

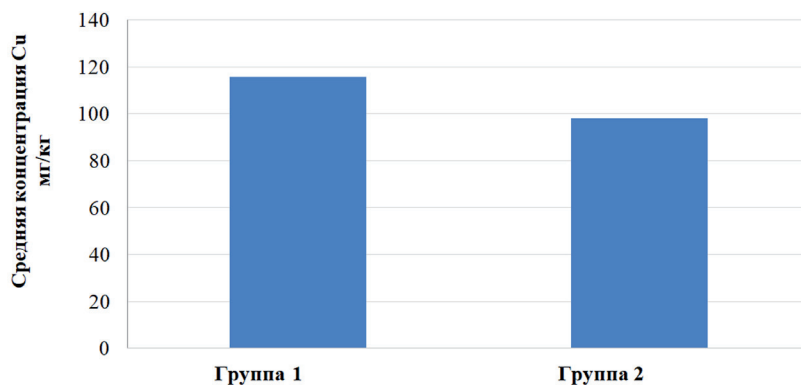


Рис. 5. Средняя концентрация Cu во фракции 50–100 мкм в зависимости от группы в соответствии с долей нарушенной поверхности.
 Fig. 5. Average Cu concentration in the 50–100 μm fraction as a function of the group according to the fraction of surface disturbed.

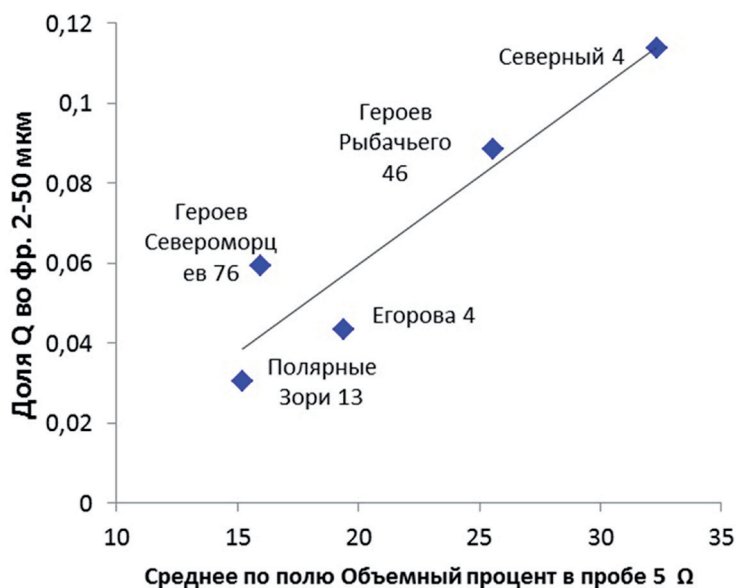


Рис. 6. Зависимость доли кварца в пылевой фракции (2–50 мкм) от окатанности частиц кварца (усреднение по экспериментальным площадкам в г. Мурманске).
Fig. 6. Dependence of quartz fraction in dust fraction (2–50 μm) on roundness of quartz particles (averaged over experimental sites in Murmansk).

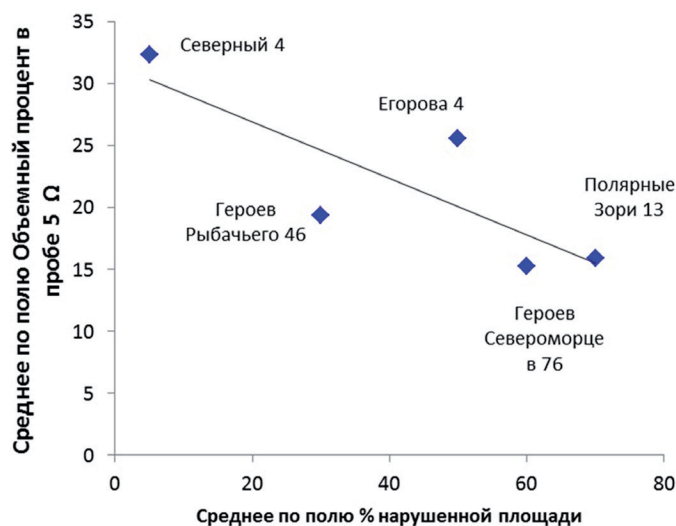


Рис. 7. Зависимость окатанности частиц кварца от доли нарушенной территории на площадке (усреднение по экспериментальным площадкам в г. Мурманске).
Fig. 7. Dependence of quartz particle pellicularity on the proportion of disturbed area at the site (averaged over the experimental sites in Murmansk).

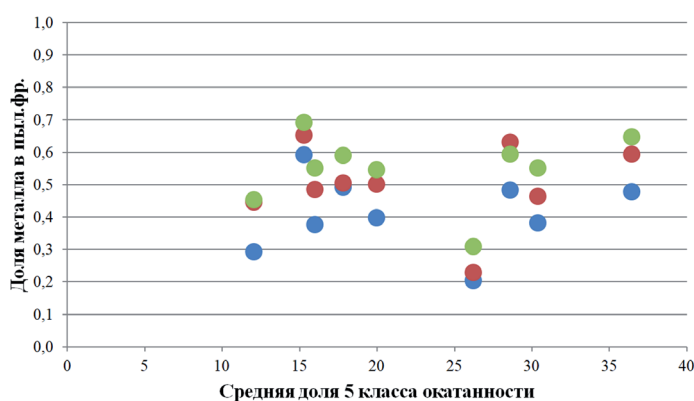


Рис. 8. Зависимость доли концентрации техногенных микроэлементов (Pb, Cu, Zn) в пылевой фракции от доли частиц 5 класса окатанности в пробах.
Fig. 8. Dependence of the proportion of concentration of anthropogenic trace elements (Pb, Cu, Zn) in the dust fraction on the proportion of particles of roundness class 5 in the samples.

Заключение

Разработан метод оценки окатанности частиц кварца в поверхностно депонированных отложениях урбанизированной среды. Метод основан на квартовании, шлиховом анализе, рамановской

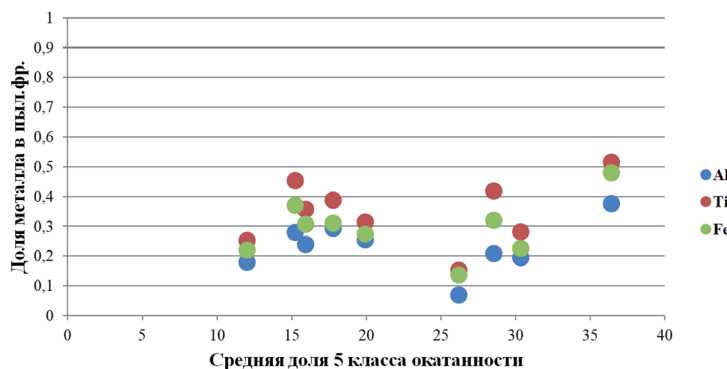


Рис. 9. Зависимость доли концентрации типоморфных металлов в пылевой фракции от доли частиц 5 класса окатанности в пробах.

Fig. 9. Dependence of the proportion of the concentration of typomorphic metals in dust fraction on the proportion of particles of roundness class 5 in the samples.

спектроскопии, оптической микроскопии и математическом методе определения формы зерен породы. Разработанная методика позволила определить характеристики окатанности кварца в пробах различного происхождения. Природные и техногенные процессы в городской среде приводят к увеличению окатанности частиц кварца в поверхностных городских отложениях. Вследствие влияния окружающей среды на процесс окатывания доля частиц кварца более высокого класса окатанности увеличивается со временем, так как часть обломков кварца переходит в пылевую гранулометрическую фракцию. Доля частиц высокого класса окатанности и доля кварца в пылевой фракции могут рассматриваться, как косвенные характеристики возраста образцов отложений или интегрального воздействия факторов среды на образец.

Работа выполняется при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 18-77-10024-П. Исследования методом комбинационного рассеяния выполнены в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН. Дооснащение ЦКП проведено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 075-15-2021-680).

Литература

1. Алексеев В.П. Литология: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГТГУ, 2001. 249 с.
2. Ботвинкин О.К., Клюковский Г.И., Мануйлов Л.А. Лабораторный практикум по общей технологии силикатов и техническому анализу строительных материалов. Москва: Стройиздат, 1966. 401 с.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение) Серия: Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист R-(35), 36. Мурманск. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2007. 281 с. + вкл. (МПР России, ФГУП «МАГЭ», ФГУП «ВНИИОкеангеология», ФГУП «ВСЕГЕИ»).
4. Касимов Н.С., Власов Д. В., Кошелева Н. Е., Никифорова Е. М., Геохимия ландшафтов Восточной Москвы. М.: АПР, 2016. 276 с.
5. Лебедева С.М., Кориневский В.Г. Рамановская спектроскопия как экспрессный метод диагностики минералов // Минералы: строение, свойства, методы исследования. 2012. № 4. С. 172–174. – EDN YMPGSC.
6. Преображенский И.А. Минералы осадочных пород (применительно к изучению нефтеносных отложений) / ред. И.А. Преображенский, С.Г. Саркисян. Москва: Гостоптехиздат, 1954. 463 с.
7. Угрюмов А.Н. Геология и разведка полезных ископаемых. Шлиховой метод поисков. Ч. 2 Методика минералогического анализа шлихов. Уральская госуд. горно-геол. академия. Каф. поисков и разведки МПИ. Екатеринбург: Изд. УГТГА, 1996. 28 с.
8. Ухов И.С. Новая методика определения окатанности песчаных кварцевых зерен // Ярославский педагогический вестник. 2013. Т. III (Естественные науки). № 4. С. 284–289.
9. Шило Н.А. Учение о россыпях: Теория россыпеобразующих рудных формаций и россыпей. Изд. 2-е, перераб. и доп. Владивосток: Дальнаука, 2002. 576 с. ISBN 5-80040200-5.
10. Seleznev A.A., Yarmoshenko I.V. & Malinovsky G.P. Urban geochemical changes and pollution with potentially harmful elements in seven Russian cities. 2020. V. 10. No. 1. P. 1668. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58434-4>.
11. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Baglaeva E., Seleznev A. A Landscape Study of Sediment Formation and Transport in the Urban Environment. Atmosphere. 2020. V. 11. No. 12. P. 1320. <https://doi.org/10.3390/atmos11121320>.