

ПЫЛЕГРЯЗЕВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ КАК ИНДИКАТОР ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИИ АРКТИЧЕСКОГО ГОРОДА

И. В. Ярмошенко, А. В. Шевченко, В. С. Глухов, Г. П. Малиновский, А. А. Селезнев

Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (Екатеринбург, Россия)

Статья поступила в редакцию 3 мая 2024 г.

Для цитирования

Ярмошенко И. В., Шевченко А. В., Глухов В. С. и др. Пылегрязевые отложения как индикатор эколого-геохимического состояния территории арктического города // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 449—461. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-449-461.

Поверхностные пылегрязевые отложения рассмотрены в качестве индикатора эколого-геохимического состояния Мурманска. Определены закономерности, связывающие минералогический, химический и гранулометрический состав отложений в единую систему; охарактеризованы экологически значимые аспекты современного седиментогенеза в городе. Показано, что загрязнение и гранулометрическая дифференциация отложений обуславливают повышенное накопление отдельных тяжелых металлов в пылегрязевом осадке. Формирование накоплений осадка в понижениях рельефа становится источником поступления мелкодисперсных частиц в атмосферу.

Ключевые слова: арктические города, Мурманск, геоэкологический мониторинг, эрозионные процессы, поверхностное загрязнение, осадконакопление, тяжелые металлы.

Введение

Социально-экономическое развитие Арктической зоны России в значительной степени происходит в направлении урбанизации. В настоящее время почти 90% населения региона проживает в городах [1]. Функционирование урбанизированной среды в Арктике имеет свои особенности из-за наличия ряда специфических природных, антропогенных и социально-экономических факторов. Градообразующими видами деятельности являются добыча и транспортировка минеральных и биологических ресурсов. С учетом такой направленности экономики проблемы загрязнения окружающей среды характерны для большинства городов и поселков [2].

В последние годы в исследованиях экологического состояния городской среды большое внимание уделяется процессам современного седиментогенеза [3—6]. Городская среда подвергается постоянно интенсивному воздействию факторов природного и антропогенного характера, вызывающих эрозию

и деградацию почв и покрытий, в результате чего образуется рыхлый, несцементированный, твердый материал. Этот материал переносится поверхностным стоком и автотранспортом, проходит ступени каскада связанных микрозон и инфраструктурных объектов городской среды [7], формируя отложения в виде пылегрязевого осадка (наносов) на каждой из них.

С накоплением несцементированных пылегрязевых отложений связан ряд негативных эффектов. Подъем в воздух мелкодисперсной фракции ветром и при движении транспорта увеличивает концентрацию взвешенных частиц. В пылевых фракциях городских отложений концентрируются загрязняющие вещества, в частности, тяжелые металлы. Взвешенные частицы в воздухе являются одним из основных экологических факторов, отрицательно влияющих на здоровье человека [8]. Накопление твердого пылегрязевого осадка также приводит к переуплотнению городских почв, снижению их фертильности, заилению ливневой канализации, увеличению затрат на обслуживание городских пространств и негативному восприятию

Проблемы регионов

города гражданами. Седиментационный материал урбанизированной среды загрязняет природные объекты за пределами города [4; 9].

В ряде работ показано, что пылегрязевые отложения являются индикатором современного экологического состояния города [3; 5; 7; 10].

Проблема седиментогенеза, образования пылегрязевых отложений и их экологической, в частности индикаторной роли в арктических городах фактически не изучена. Для восполнения этого пробела в настоящей работе пылегрязевые отложения исследованы на примере Мурманска. Были отобраны пробы пылегрязевых отложений и других компонентов урбанизированной среды и проанализированы следующие индикаторы экологического состояния:

- типоморфная и антропогенная ассоциации металлов;
- распределение материала по гранулометрическим фракциям;
- распределение антропогенных металлов по гранулометрическим фракциям;
- минералогический состав пылегрязевых отложений;
- распределение минералогического состава по гранулометрическим фракциям;
- распределение типоморфных и антропогенных металлов по минеральным ассоциациям.

Материалы и методы

География исследования

Мурманск был основан в 1916 г. на берегу Кольского залива в качестве транспортного узла, связывающего стратегические морские и сухопутные транспортные пути. Основными инфраструктурными объектами города с момента основания являются морской порт и железная дорога. В Мурманской области и других регионах российской Арктики расположен ряд объектов горнодобывающей промышленности и цветной металлургии, развитие которых в значительной степени связано с Мурманским портом, где происходит перевалка угля, руды, концентрата, щебня. Важные отрасли экономики Мурманска — рыболовство и рыбопереработка. В настоящее время он является крупнейшим городом Арктической зоны.

Основными источниками поступления загрязняющих веществ в Мурманске являются выбросы пыли, образующейся при перегрузке угля и минерального сырья в морском порту [11], а также выбросы Мурманской ТЭЦ, работающей на топочном мазуте [12—14].

Мурманск расположен в атлантико-арктической зоне умеренного климата. Средняя температура января составляет $-10,8^{\circ}\text{C}$, июля — $14,3^{\circ}\text{C}$. В геологическом отношении территория Мурманска относится к северо-восточной части Балтийского щита Восточно-Европейской платформы (центральная часть Териберско-Вороньинского сегмента Мурманского домена). Рельеф Мурманска характеризуется существенными перепадами высот.

Объект исследования

В качестве основного объекта исследования были выбраны пылегрязевые отложения пониженных участков микрорельефа в районах многоэтажной жилой застройки. Отбор проб пылегрязевого осадка производился во внутривдворовой части жилого квартала на участках парковок, детских площадок, газонов и внутривдворовых проездов. Пробы отложений отбирались по двум схемам. В рамках первой схемы случайным образом в разных частях города выбирались пять жилых кварталов, застроенных в разные периоды. Для реализации второй схемы на территории города по нерегулярной сети отбиралось не менее 40 проб отложений.

Кроме проб пылегрязевых отложений отбирались пробы грунта (выбирались участки с урбаноземом на газонах, детских и спортивных площадках), дорожной пыли (ДП) и снегогрязевой пульпы (СГП). В настоящем исследовании грунт рассматривался как долгосрочная депонирующая среда. Пыль на дорогах образуется в результате воздействия автотранспорта и содержит продукты абразии дорожного полотна, истирания частей автомобилей, просыпи сыпучих материалов и т. п. Вещественный и химический состав ДП отражает поступление загрязнения от автотранспорта. Материал СГП образуется в результате перемешивания снега и пылегрязевого осадка под действием движения автотранспорта и пешеходов [15]. Предполагается, что вещественный и химический состав СГП связан с современным поступлением загрязнения. Пробы грунта и СГП отбирались на участках вблизи мест отбора проб поверхностного осадка по первой схеме. Для отбора грунта (верхние 5 см) выбирались участки с антропогенно преобразованным поверхностным горизонтом. Пробы ДП отбирались на примыкающих к кварталам участках улиц.

Пробы пылегрязевых отложений, грунта и ДП отбирались в августе 2019 г., пробы СГП — в марте 2021 г.

Характеристики селитебных ландшафтов кварталов многоквартирных домов

Ранее в рамках изучения условий образования пылегрязевого осадка в российских городах было проведено обследование селитебных ландшафтов, в том числе в Мурманске [16]. Были определены и описаны характеристики типичного ландшафта кварталов многоквартирных домов, с которыми связаны образование и сток наносов в седиментационном каскаде. Для Мурманска были получены следующие характеристики:

- распределение площади по основным функциональным зонам: дорога — 18%, зона автотранспорта во дворах — 25%, тротуары — 10%, зеленая зона — 47%;
- распределение площади дворов по основным функциональным зонам: зона автотранспорта — 38%, доля зеленой и пешеходной зон — 62%;
- число автомобилей на 100 м² дворов — 1,1;

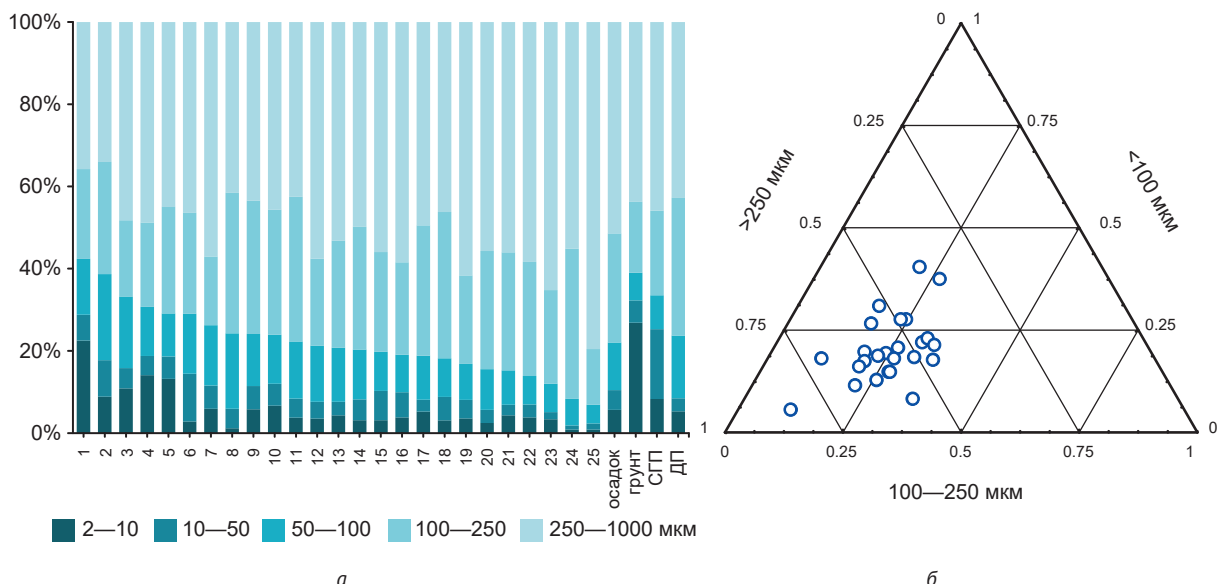


Рис. 1. Гранулометрический состав проб пылегрязевого осадка (столбцы 1–25), средний гранулометрический состав проб осадка, грунта, СГП и ДП (а); треугольная диаграмма гранулометрического состава проб осадка (б)
 Fig. 1. Particle size distribution of USDS, urban soil, snow-dirt sludge (SDS) and road dust sediment (RDS) samples (a); triangular diagram of USDS granulometric composition (b)

- доля парковочных мест на неорганизованных участках во дворах — 39%;
- доля площади с нарушенным покрытием (кроме дорог и зданий) — 24%;
- доля площади газонов с низким (менее 50%) проективным покрытием травами — 47%;
- доля сегментов ландшафта с неудовлетворительным техническим состоянием покрытий (по площади) — 80%;
- доля сегментов, на которых проводятся земляные работы без контроля образования грязевого осадка, — 12%;
- связанность сегментов (вероятность стока или механического транспорта наносов с соседнего участка) — 55%.

По сравнению с другими обследованными городами в Мурманске наблюдается высокая доля площадей с нарушенной поверхностью, неудовлетворительным техническим состоянием, высокая доля автомобилей, паркующихся на газонах и детских площадках. Неудовлетворительное качество газонов характеризует превалирование дикорастущих трав и низкое проективное покрытие травами. Высокая связанность сегментов ландшафта в основном обусловлена особенностями рельефа, наличием перепада высот, в том числе в пределах жилых кварталов.

Методы анализа

Подготовка проб осуществлялась в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84 «Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа». Из образцов убирались посторонние компоненты, образцы высушивались и измельчались, и из каждого методом квартования

отбиралась представительная проба массой не менее 100 г.

Гранулометрический анализ проб проводился путем отмучивания и мокрого просеивания. Проба разделялась на шесть гранулометрических навесок: 2—10, 10—50, 50—100, 100—250, 250—1000 и более 1000 мкм. Полученные навески взвешивались, вычислялась массовая доля каждой фракции в образце. Для элементного и минерального анализа использовались навески с размером частиц менее 1000 мкм. Элементный анализ проб и гранулометрических навесок включал определение валовых концентраций металлов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой согласно «Методике выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98» на масс-спектрометре ELAN 9000 (Perkin Elmer). Минералогический состав гранулометрических навесок определялся методами рентгенофазового (дифрактометр XRD-7000) и термического анализа (дериватограф Diamond TG/DTA) в Центре коллективного пользования «Геоаналитик» Института геологии и геохимии Уральского отделения РАН.

Более подробно методы пробоотбора, гранулометрического, химического и минерального анализа представлены в [10].

Результаты

Распределение материала компонентов окружающей среды по гранулометрическим фракциям

На рис. 1а представлен вклад пяти размерных фракций в состав 25 проб пылегрязевого осадка и средний гранулометрический состав каждого из объектов исследования. Пробы ранжированы по

Таблица 1. Средние и относительные концентрации металлов в пробах осадка, грунта, СГП и ДП
Table 1. Average and relative concentrations of metals in samples of USDS, urban soil, SDS and RDS

Me	СА, мг/кг	Me : Fe				
		Осадок	Грунт	СГП	ДП	К. к.
Al	61 600 (0,14)	2	2,4	2,1	2	2,8
Fe	30 300 (0,17)	1	1	1	1	1
Ti	2 090 (0,15)	0,07	0,10	0,08	0,08	0,11
Mn	488 (0,19)	0,016	0,018	0,015	0,017	0,018
V	80 (0,39)	0,0026	0,0046	0,0041	0,0024	0,0030
Th	4,2 (0,20)	0,00014	0,00017	0,00018	0,00020	0,00029
U	0,65 (0,19)	0,000021	0,000027	0,000025	0,000026	0,00010

Примечания. 1. В скобках приведены значения коэффициента вариации. 2. К. к. — кларк концентрации. 3. СА — среднее арифметическое.

Notes. 1. In parentheses coefficient of variation. 2. К. к. — concentration clarke. 3. CA — arithmetic mean.

суммарному вкладу пылевых фракций 2—100 мкм. Из рис. 1а видно, что в пробах осадка суммарный вклад пылевой фракции варьируется от 6% до 41%. В среднем доля пылевых фракций в осадке составляет около 20%. В пробах грунта по сравнению с другими объектами наблюдается наибольшая доля фракции 2—10 мкм. Наибольшая доля крупных размерных фракций (более 100 мкм) наблюдается в пробах осадка и ДП. На рис. 1б представлена треугольная диаграмма, которая показывает вариабельность гранулометрического состава по трем размерным фракциям.

Типоморфная ассоциация металлов

Средние содержания основных типоморфных металлов в осадке представлены в табл. 1. Содержание Fe в осадке по средней величине близко к кларков-

вой концентрации, определенной для кислых горных пород, богатых кальцием (29 600 мг/кг). В табл. 1 также показаны средние соотношения содержания металлов типоморфной геохимической ассоциации и концентрации Fe в осадке и других компонентах, а также соотношения концентрации металла и Fe по кларковой концентрации. Для всех исследованных компонентов городской среды ассоциации типоморфных элементов описываются близкими соотношениями. Коэффициент вариации для концентрации большинства элементов в осадке не превышает 0,2.

На рис. 2 в виде дендрограммы представлена иерархическая кластеризация металлов во фракциях 250—1000 мкм и 2—10 мкм. В качестве меры связанности использовано корреляционное расстояние $1 - r$, где r — коэффициент корреляции Пирсона. Для более крупной фракции использова-

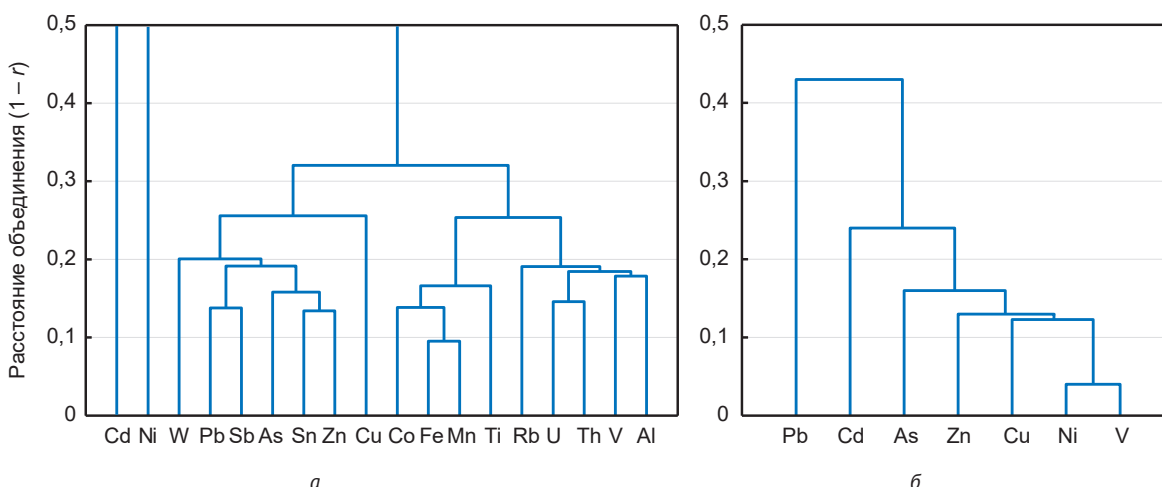


Рис. 2. Степень связанности источников поступления и миграции антропогенных металлов в пылегазовом осадке:

а — фракция 250—1000 мкм, б — фракция 2—10 мкм

Fig. 2. Degree of connectivity of sources of anthropogenic metals entry and migration in USDS:

а — 250—1000 μm fraction, б — 2—10 μm fraction

Таблица 2. Общие концентрации металлов в осадке и отношения концентраций металлов во фракции 2—10 мкм к средней суммарной концентрации этого металла в пробах осадка (с учетом всех фракций)
Table 2. Total metal concentrations in the USDS and ratios of metal concentrations in the 2—10 µm fraction to the average total concentration of this metal in USDS samples (including all fractions)

Me	Осадок		CA : ОДК	Me (2—10 мкм) : CA (осадок)			
	CA, мг/кг	СГ, мг/кг		Осадок	Грунт	СГП	ДП
Pb	29 (1,2)*	24 (1,7)**	0,91	1,9	1,9	1,1	0,8
Zn	141 (1,5)	108 (1,7)	2,6	2,7	2,2	2,4	1,0
Cu	41 (0,33)	39 (1,4)	1,2	1,9	1,7	4,7	1,7
Ni	55 (0,33)	53 (1,3)	2,8	1,8	1,9	3,0	1,0
As	1,9 (0,18)	1,9 (1,2)	1,0	1,3	1,7	2,7	0,9
Cd	0,23 (0,75)	0,23 (0,8)	0,46	0,9	1,5	0,6	0,7
Ba	563 (0,21)	551 (1,2)	—	1,2	1,1	1,6	1,6
Co	12 (0,16)	12 (1,2)	—	1,5	1,3	3,4	1,3
Rb	42 (0,28)	40 (1,3)	—	1,6	1,1	2,7	1,3
W	3,5 (0,56)	3,0 (1,8)	—	2,2	0,9	21,1	1,7
Sn	2,1 (0,38)	2,0 (1,4)	—	2,0	1,6	3,6	1,1
Sb	0,68 (0,46)	0,61 (1,6)	0,15 *	2,5	2,1	6,3	10,5
V	80 (0,39)	76 (1,3)	0,53	2,1	2,8	3,4	1,2

* Для Sb дано отношение среднего арифметического концентраций к ПДК, так как для этого элемента норматива ОДК нет.

Примечание. В данных по CA в скобках приведен коэффициент вариации, по СГ (среднему геометрическому) — стандартное геометрическое отклонение.

Note. In the CA data, the coefficient of variation is given in parentheses, in the СГ (geometric mean) data — geometric standard deviation.

ны данные о 21 металле (рис. 2а). На рис 2а можно выделить следующие кластеры элементов с расстоянием объединения $1 - r < 0,2$: 1) Al, V, Th, U, Rb; 2) Ti, Mn, Fe, Co; 3) Zn, Sn, As, Sb, Pb. Эти кластеры отражают отнесение основных и второстепенных типоморфных элементов к следующим группам геохимического сродства: литофильной, сидерофильной, халькофильной.

Антропогенная ассоциация металлов

Средние значения концентраций металлов антропогенной ассоциации представлены в табл. 2. Там же приведены соотношения средних концентраций металла в гранулометрической фракции 2—10 мкм и средней суммарной концентрации этого металла в пробах осадка (с учетом всех фракций). По всем металлам антропогенной ассоциации кроме Cd в пробах осадка наблюдаются наибольшие концентрации во фракции 2—10 мкм. Как видно из табл. 2, наименьшая разница между мелкими и крупными фракциями наблюдается в ДП, наибольшая — в СГП. В табл. 2 также представлено соотношение концентрации металла и ориентировочно допусти-

мой концентрации (ОДК)¹, а для Sb — предельно допустимой концентрации (ПДК). Для металлов Zn и Ni наблюдаются превышения ОДК более чем вдвое, для Cu — в 1,2 раза, а для As достигнуто пороговое значение.

Как видно на рис. 2б, во фракции 2—10 мкм нарушается кластеризация элементов по принципу геохимического сродства, в том числе наблюдается очень близкая, практически функциональная связь между Ni и V. При анализе концентраций металлов в этой фракции выделяется кластер, состоящий кроме Ni и V из Cu, Zn и As. Pb не включен в кластеры с другими элементами.

Распределение антропогенных металлов по гранулометрическим фракциям

На рис. 3 представлены графики распределения проб осадка по концентрации некоторых металлов для фракций 2—10 и 250—1000 мкм, обозначены

¹ СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

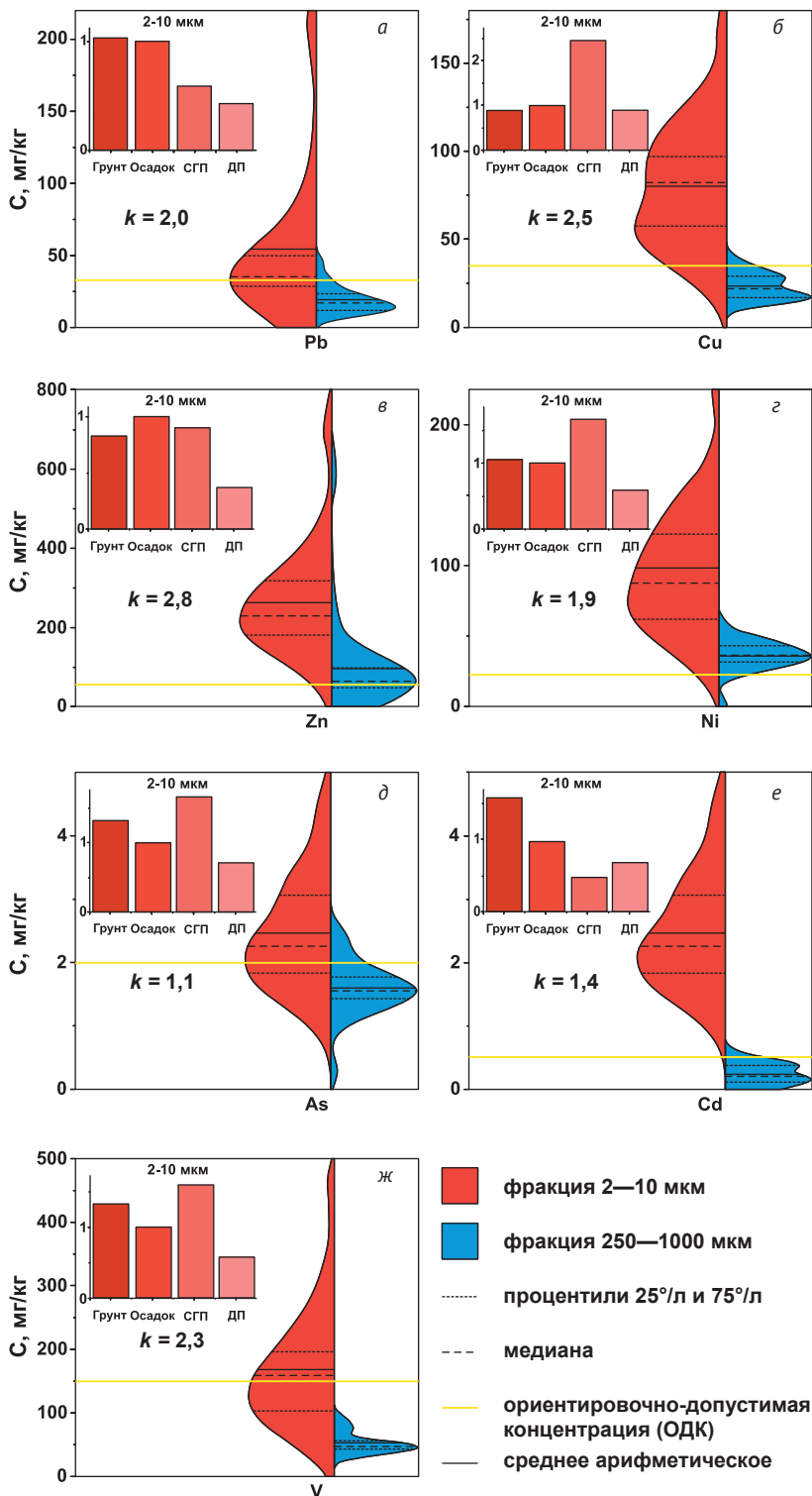
Рис. 3. Распределение концентраций металлов во фракциях 2–10 и 250–1000 мкм проб пылегрязевого осадка и содержание металлов в пробах грунта, СГП и ДП во фракции 2–10 мкм, нормированные на концентрацию в пылегрязевом осадке. k – коэффициент повышения средней концентрации металла в образцах фракции 2–10 мкм относительно фракции 250–1000 мкм при нормировке на концентрацию железа. Коэффициенты корреляции между долей пылевой фракции и общим содержанием металлов: Pb – 0,61, Cd – 0,58, As – 0,28, Zn – 0,51, Cu – 0,64, Ni – 0,42, V – 0,35

Fig. 3. Distribution of metal concentrations in the 2–10 and 250–1000 μm fractions of USDS samples and metal content in urban soil samples, SDS and RDS in the 2–10 μm fraction normalized to the concentration in USDS. The k is the coefficient of increase in the average metal concentration in samples in the 2–10 μm fraction relative to the 250–1000 μm fraction when normalized for Fe concentration. Correlation coefficients between the share of dust fraction and total metal content: Pb – 0.61, Cd – 0.58, As – 0.28, Zn – 0.51, Cu – 0.64, Ni – 0.42, V – 0.35

медианы, 25%-ные и 75%-ные процентиля и ОДК. Для всех представленных металлов наблюдается существенный сдвиг распределения концентрации в сторону больших значений во фракции 2–10 мкм, распределение концентраций во фракции 2–10 мкм отклоняется от нормального. Доля проб, в которых содержание металла превышает ОДК, составляет:

- фракция 2–10 мкм: Pb – 60% (15 проб); Cu – 96% (24 пробы); Zn – 100% (25 проб); Ni – 100% (25 проб); Cd – 64% (16 проб); As – 64% (16 проб); V – 52% (13 проб);
- фракция 250–1000 мкм: Pb – 8% (2 пробы); Cu – 12% (3 пробы); Zn – 56% (14 проб); Ni – 96% (24 пробы); Cd – 0% (0 проб); As – 16% (4 пробы); V – 0% (0 проб).

Для каждого металла и каждой фракции было рассчитано отношение концентрации металла и железа $\text{Me} : \text{Fe}$ в осадке. На рис. 3 показаны значения коэффициента повышения средней



концентрации металла в образцах фракции 2–10 мкм относительно фракции 250–1000 мкм: $k = (\text{Me} : \text{Fe})_{2-10} / (\text{Me} : \text{Fe})_{250-1000}$. Для всех металлов кроме As этот коэффициент значительно превышает единицу.

На рис. 3 также представлены столбчатые диаграммы, показывающие средние содержания металлов в пробах различных объектов во фракции 2–10 мкм, нормированные на концентрацию в пылегрязевом осадке. Как видно из этих диаграмм, максимальное накопление различных металлов наблюдается в различных объектах. При этом

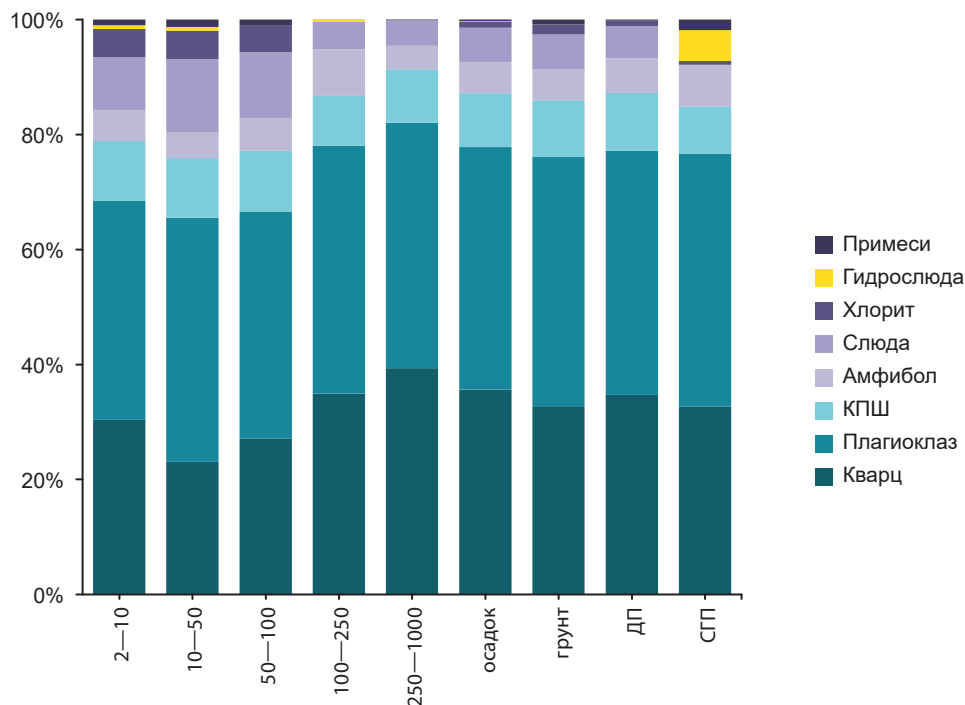


Рис. 4. Минералогический состав проб пылегрязевого осадка (в том числе по фракциям), грунта, СГП и ДП. Примеси: доломит, кальцит, вермикулит, магнетит, пирит

Fig. 4. Mineral composition of USDS (including fractions), urban soil, SDS and RDS samples. Impurities: dolomite, calcite, vermiculite, magnetite, pyrite

можно выделить следующие общие паттерны: высокое накопление в СГП характерно для Cu, Ni, As, V и Zn; высокое накопление в грунте и осадке — для Pb и Cd; высокое накопление во всех средах кроме ДП — для Zn. Для всех металлов выявлено относительно невысокое накопление в ДП.

Минералогический состав

Средний минералогический состав проб пылегрязевого осадка, грунта, ДП и СГП представлен на рис. 4. Для проб осадка представлен средний минералогический состав по размерным фракциям. Среднее содержание минералов в пылегрязевом осадке: кварц — 34%, плаггиоклаз — 41%, калиевый полево шпат — 9%, слюда (биотит) — 6%, амфибол — 5%, хлорит и примеси (доломит, кальцит, вермикулит, магнетит, пирит) — 1%. При рассмотрении распределения кварца по гранулометрическим фракциям можно отметить постепенное уменьшение его доли с уменьшением размера фракции (от 39% во фракции 250—1000 мкм до 20% во фракции 10—50 мкм). Во фракции осадка 2—10 мкм наблюдается повышение концентрации кварца на 9% по сравнению с фракцией 10—50 мкм (с 20% до 29%). Для слюды, гидрослюды, хлорита, доломита, кальцита и вермикулита наблюдается повышение концентрации в пылевых фракциях по сравнению с песчаными. В пробах СГП наблюдается повышенное в сравнении с другими объектами содержание гидрослюды (около 4%).

Распределение металлов по минеральным ассоциациям

В табл. 3 приведены результаты анализа корреляции содержания металлов и минерального состава объектов городской среды. Металлы сгруппированы по трем геохимическим группам в соответствии с классификацией В. М. Гольдшмидта [17]. Породообразующие минералы подразделены на главные и вторичные. Показаны минералы, с которыми наблюдается наиболее сильная корреляционная связь, и указаны значения коэффициента корреляции.

Как видно из табл. 3, в пробах пылегрязевого осадка элементы литофильной группы коррелируют с главными породообразующими минералами. Для сидерофильных и халькофильных характерна ассоциация с амфиболом из главных и с хлоритом из вторичных породообразующих минералов. В твердом осадке СГП концентрации элементов коррелируют в основном с амфиболом и гидрослюдой. В ДП и в грунтах ассоциации металлов с содержанием отдельных минеральных компонентов выражены слабо.

Обсуждение

В Мурманске наблюдаются благоприятные условия для образования пылегрязевого осадка: высокая доля нарушенных поверхностей, поверхностей без покрытия, неудовлетворительное техническое состояние покрытий, высокая автомобильная нагрузка (в том числе на дворовые пространства), низкое качество газонных покрытий и действие других

Таблица 3. Корреляционная связь между металлами и минералами (коэффициенты корреляции Пирсона *r*)

Table 3. Correlation between metals and minerals (Pearson correlation coefficients *r*)

Группа элементов	Me	Осадок		СГП		ДП		Грунт	
		Породообразующие минералы							
		главные	вторичные	главные	вторичные	главные	вторичные	главные	вторичные
Литофильные	Al	Q (0,68)		AM (0,65)	H (0,6)	Q (0,96)	CL (-0,98)		
	Ba	PL (0,77)		AM (0,67)	H (0,69)		CL (-0,94)		
	Mn	AM (0,52)		AM (0,73)	H (0,68)		PY (0,89)		
	Rb	FSP (0,69)		AM (0,7)	H (0,65)	PL (0,87)			
	Th	FSP (0,54)							
	Ti	FSP (0,59)	PY (0,44)	AM (0,78)	H (0,77)				
	U	FSP (0,54)		AM (0,81)	H (0,75)				
	V	MC (0,45)	CL (0,54)						
	W	—	CL (0,65)	FSP (0,66)	CL (0,80)			FSP (-0,99)	
Сидерофильные	Co	AM (0,59)	CL (0,61)	PL (0,78)	H (0,79)		PY (-0,93)		
	Fe		CL (0,49)	AM (0,73)	H (0,73)		PY (-0,90)		
	Mo								
	Ni	AM (0,49)	CL (0,5)			Q (0,96)	H (-0,96)		
Халькофильные	As	AM (0,66)	PY (0,48)	AM (0,73)			PY (-0,89)		
	Cd		CL (0,46)	AM (0,76)	H (0,69)				PY (-0,87)
	Cu		CL (0,69)			PL (0,94)			CL (0,88)
	Pb	AM (0,43)	CL (0,48)	AM (0,62)	H (0,66)	PL (0,93)	CL (-0,88)		CL (0,87)
	Sb		CL (0,72)				PY (-0,89)	PL (-0,95)	
	Sn			PL (0,67)	CL (0,77)	Q (0,91)	PY (-0,93)		
	Zn		CL (0,52)	AM (0,68)	H (0,65)	PL (0,91)			

Примечание: MC — слюда, CL — хлорит, PY — пирит, PL — плагиоклаз, H — гидрослюда, FSP — калиевый полевой шпат, AM — амфибол, Q — кварц.

Note: MC — mica, CL — chlorite, PY — pyrite, PL — plagioclase, H — hydrous mica, FSP — potassium feldspar, AM — amphibole, Q — quartz.

антропогенных факторов. Продолжительный холодный снежный период также способствует образованию и накоплению пылегрязевого осадка. С учетом антропогенных и природных условий можно предполагать, что в городе образуется до 1,6 кг/м² пылегрязевого осадка в год, из которых около 0,3 кг/м² в год составляет пыль [18], при этом накопление пылегрязевых наночастиц можно предварительно оценить примерно в 3,2 кг/м² [18; 19].

Основную часть поверхностного пылегрязевого осадка составляют наиболее распространенные породообразующие минералы. Соотношение основных породообразующих минералов сходно с минеральным составом горных пород центральной части Териберско-Вороньинского сегмента, Мурманского домена, а также со слюдяными гнейсами, залегающими в районе исследования [20]. Связь вещественного состава поверхностного осадка с геологией

региона подтверждается также присутствием амфибола и пирита.

Типоморфная ассоциация металлов в поверхностном осадке представлена наиболее распространенными в земной коре металлами в соотношениях, характерных для кларковых содержаний в кислых горных породах, богатых кальцием. К этой группе также относятся горные породы центральной части Териберско-Вороньинского сегмента. Корреляционный анализ содержания металлов и минералов демонстрирует связь типоморфной ассоциации металлов с главными породообразующими минералами.

Результаты анализа минерального состава поверхностных отложений и типоморфной ассоциации металлов говорят о генетической связи между вещественным составом отложений в городе и геологическим субстратом. В урбанизированной среде такая связь могла сформироваться непосредственно в результате эрозии почвы, которая является продуктом выветривания залегающих горных пород, либо вследствие разрушения строительных материалов, которые, в свою очередь, произведены преимущественно из местного минерального сырья.

С гранулометрическими характеристиками, минеральным и химическим составом поверхностного осадка в городской среде могут быть связаны негативные экологические аспекты.

Гранулометрический анализ проб поверхностного осадка в Мурманске показал, что в его составе значительную долю составляют частицы размером менее 100 мкм (20%), в том числе мелкодисперсные частицы размером менее 10 мкм (5%). Частицы размером менее 100 мкм могут подниматься ветром в атмосферу, а частицы размером менее 10 мкм могут задерживаться в атмосфере продолжительное время. Твердые пылегрязевые частицы, поступившие в атмосферу в результате ветрового и механического подъема, при вдыхании представляют опасность для здоровья человека.

В состав мелкодисперсной пылевой фракции входит в среднем 29% частиц кварца. Наличие респираторных частиц кристаллического кварца является канцерогенным фактором риска для здоровья населения [21]. Нормативы по загрязнению атмосферы взвешенным веществом ужесточаются при наличии кристаллического диоксида кремния.

Присутствие в составе отложений тяжелых металлов также является негативным экологическим фактором. Для трех металлов (Zn, Cu, Ni) из шести, для которых установлены нормативы ОДК в грунтах, наблюдается превышение средней концентрации в пробах пылегрязевого осадка над нормативом. Более высокие концентрации металлов антропогенной ассоциации наблюдаются в мелкодисперсных фракциях. Концентрации Pb, Zn, Cu, Ni, Co, W, Sn, Sb и V в пылевой фракции повышаются в 1,5—2,7 раза по сравнению с общей концентрацией. Превышение

ОДК по суммарным средним значениям содержания тяжелых металлов происходит в основном за счет повышения концентраций в пылевых фракциях.

Данные о содержании металлов антропогенной ассоциации в различных компонентах среды, их связь с минеральным составом, распределение по гранулометрическим фракциям позволяют сделать выводы об источниках загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами.

Для большинства металлов антропогенной ассоциации в пробах поверхностного осадка наблюдается сдвиг распределения в сторону больших значений концентрации металла, и достаточно высокие значения коэффициента вариации (более единицы). Такие параметры варибельности концентраций элементов в пробах могли сформироваться в результате загрязнения.

В составе проб осадка и других исследованных компонентов среды не прослеживаются минеральные группы, связанные с такими тяжелыми металлами, как Mn, Cu, Zn, As, Cd, Sn, Sb, Pb, Co и Ni. Mn, Pb, Co и Ni могут присутствовать в качестве примеси в амфиболах, As, Sb, Co и Ni — в пирите. С минеральным компонентом могут быть связаны только незначительные, следовые количества этих металлов.

Концентрации металлов антропогенной ассоциации в образцах осадка фракции 2—10 мкм значительно повышаются относительно фракции 250—1000 мкм, в том числе при нормировании на концентрацию Fe, элемента типоморфной ассоциации. Концентрирование металлов в мелкодисперсных фракциях может быть связано с поступлением металлов в окружающую среду из источников в растворенной форме, более интенсивной сорбцией на поверхности частиц малого размера, наличием в составе объектов окружающей среды минеральных частиц с высокими сорбционными свойствами. К таким минералам относятся слоистые минералы, такие как слюда, хлорит и др. Анализ показал, что концентрации металлов антропогенной ассоциации в осадке и других компонентах среды коррелируют с содержанием слоистых силикатов и алюмосиликатов.

Для металлов антропогенной ассоциации иерархическая древовидная кластеризация в крупной и мелкодисперсной фракциях отличаются. В мелкодисперсной фракции кластеры тяжелых металлов не отражают в полной мере известное геохимическое сродство элементов. Можно предполагать, что наблюдаемая кластеризация связана с поступлением металлов в грунты от источников загрязнения и условиями дальнейшей миграции.

Выявленные закономерности позволяют предположить, что средние концентрации металлов антропогенной ассоциации в пробах пылегрязевого осадка характеризуют уровни, сложившиеся в результате наложения загрязнения и естественного содержания элементов. Концентрации целого ряда

тяжелых металлов в мелкодисперсной фракции преимущественно связаны с загрязнением антропогенного характера.

Характер распределения концентраций тяжелых металлов по элементам городского ландшафта и компонентам среды позволяет проанализировать возможные источники загрязнения.

Для ряда металлов обнаружены контрастно максимальные уровни накопления в мелкодисперсной фракции в СГП: Cu, Ni, As, Co, W, Sn, Sb и V. Снег и СГП являются средой, период накопления загрязнения в которой ограничивается длительностью холодного времени года. С учетом этого повышенные концентрации металлов в составе твердого материала СГП свидетельствуют о современном поступлении этих поллютантов. Анализ содержания тяжелых металлов во фракции 2—10 мкм показал наличие трех паттернов распределения средних концентраций металлов в компонентах урбанизированной среды. Паттерн, при котором одновременно формируется высокое накопление в СГП и низкое в осадке и грунте, подтверждает предположение о наличии современного поступления Cu, Ni, As и V. Для Pb отмечается относительно низкая концентрация в СГП по сравнению с грунтом и осадком. Также этот металл слабо коррелирует с другими металлами антропогенной ассоциации, для которых характерна относительно более высокая концентрация в СГП. С учетом этого можно предполагать, что современное поступление Pb является незначительным. Сокращение поступления Pb могло произойти после прекращения использования этилированного бензина.

За исключением Sb для большинства металлов антропогенной ассоциации наблюдается невысокое концентрирование в ДП. Можно предполагать, что в Мурманске автотранспорт вносит меньший вклад в загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами по сравнению с другими источниками. Поступление Sb и ее высокое содержание в ДП и других компонентах среды может быть связано с истиранием тормозных колодок автомобилей. Высокое концентрирование Sb в мелкодисперсной фракции ДП может быть объяснено низкой фоновой концентрацией этого металлоида.

Более сложным и неоднозначным является поведение Zn. Для этого металла характерны примерно равные средние концентрации в трех компонентах — грунте, осадке и СГП, с одной стороны, и ассоциация с кластером тяжелых металлов, для которых отмечается высокая концентрация в СГП, с другой. Можно предполагать, что Zn наряду с Pb в прошлом являлся значимым загрязнителем и его поступление не снизилось существенным образом в последующие годы.

Наблюдаемая близкая к функциональной связь между сидерофильным Ni и литофильным V, по-видимому, связана с поступлением из единого источника загрязнения. Как указывается в ряде работ,

таким источником в Мурманске является сжигание мазута на ТЭЦ [12—14].

Для концентраций металлов Cu, Zn и As в пробах осадка обнаружена сильная корреляционная связь, которая наряду со схожим характером распределения содержания металлов по гранулометрическим фракциям говорит об общем характере поступления в окружающую среду. Полученные соотношения средних концентраций этих металлов в пробах осадка характерны для месторождений рудного сырья Мурманской области. В Мурманске тяжелые металлы предположительно поступают в окружающую среду при перегрузке минерального сырья на транспортных узлах.

Анализ гранулометрического, минерального и химического состава отложений в сравнении с другими компонентами среды позволяет также проанализировать некоторые характеристики современных седиментационных процессов в урбанизированной среде.

Как отмечено выше, сходство минерального и химического состава пылегрязевого осадка, грунта, снега и ДП указывает на единое происхождение вещественного состава этих компонентов. Такое сходство, в свою очередь, показывает связанность элементов городского ландшафта и наличие условий и путей переноса осадочного материала в пределах городской катены.

В пробах поверхностного осадка в Мурманске наблюдается заметная вариабельность гранулометрического состава. Например, вклад фракции 2—100 мкм изменяется от 6% до 41%. Такой разброс свидетельствует о существенных различиях механической дифференциации осадка по размеру частиц, которые связаны с особенностями рельефа города. Высокие значения содержания мелкодисперсных частиц могут наблюдаться в отложениях бессточных участков городской катены, достаточно удаленных от мест мобилизации материала. Участки, где выше концентрация частиц более крупного размера, могут рассматриваться как промежуточные или склоновые.

Одним из косвенных свидетельств направленности катенарных процессов в городской среде от газонов на придомовой территории к пониженным бессточным участкам микрорельефа является изменение концентрации Pb в компонентах, отобранных на этих участках (грунт и осадок соответственно). После прекращения использования этилированного бензина почвы на газонах и других участках без твердого покрытия сохранились, загрязненные ранее, они стали вторичным источником загрязнения Pb. При поступлении седиментационного материала с газонов и отсутствии дополнительных современных выпадений Pb средние концентрации металла в мелкодисперсных фракциях грунта и осадка не различаются.

Минералогический состав различных гранулометрических фракций осадка изменяется в зависимо-

сти от устойчивости групп минералов в окружающей среде. Можно предполагать, что под воздействием антропогенных и природных факторов урбанизированной среды частицы неустойчивых минералов разрушаются интенсивнее и их содержание в мелких гранулометрических фракциях увеличивается. Наоборот, содержание кварца, минерала устойчивого к воздействию среды, выше в крупных размерных фракциях.

В отличие от естественной среды в урбанизированных условиях отложения не переходят в полноценную стадию литогенеза, в то же время отдельные процессы минеральной трансформации могут наблюдаться при наличии необходимых физических и химических условий. В Мурманске в пробах СГП отмечено наличие заметной концентрации гидрослюды. В пробах, которые отбираются в летний период (грунт, осадок, ДП), гидрослюда практически отсутствует. Такая трансформация может быть связана с тем, что слюды и хлориты неустойчивы к воздействию воды в холодные периоды года и при долгом контакте с водой они замещаются гидрослюдой [22].

Заключение

Результаты исследования пылегрязевых отложений в Мурманске демонстрируют закономерности, связывающие минералогический, химический и гранулометрический состав отложений урбанизированной среды в единую комплексную систему. В седиментационном каскаде при последовательном переходе от участков мобилизации осадочного материала к бессточным участкам меняются гранулометрический состав (увеличивается доля мелкодисперсных фракций), минералогический состав (увеличивается вклад неустойчивых минералов), химический состав (увеличивается содержание примесных элементов антропогенного происхождения). В условиях рельефа Мурманска седиментационный каскад обеспечивает существенную дифференциацию по гранулометрическим фракциям. Антропогенное поступление тяжелых металлов и гранулометрическая дифференциация в седиментационном каскаде обуславливают повышенное накопление отдельных тяжелых металлов в пылегрязевом осадке. В понижениях рельефа формируются накопления осадка, которые становятся источником поступления мелкодисперсных частиц в атмосферу. В исследовании определены геохимические индикаторы экологически значимых аспектов современного седиментогенеза в арктическом городе на примере Мурманска.

Литература/References

1. Пылясов А. Н., Путилова Е. С. Оспаривая очевидное: арктические города // Город. исслед. и практики. — 2020. — Т. 5 (1). — С. 9—32. — DOI: 10.17323/usp5120209-32.

Pilyasov A. N., Putilova E. S. Challenging the obvious: Arctic cities. *Urban Studies and Practices*, 2020, vol. 5 (1), pp. 9—32. (In Russian).

2. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году: Государственный доклад. — М.: Минприроды России; МГУ им. М. В. Ломоносова, 2022. — 684 с.

On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2021. State report. Moscow, Ministry of Natural Resources and Environment of Russia; MSU, 2022, 684 p. (In Russian).

3. Silveira A., Pereira J. A., Poleto C. et al. Assessment of loose and adhered urban street sediments and trace metals: a study in the city of Poços de Caldas, Brazil. *J. Soils Sediments*, 2016, no. 16, pp. 2640—2650. DOI: 10.1007/s11368-016-1467-5.

4. Owens P. N. Soil erosion and sediment dynamics in the Anthropocene: a review of human impacts during a period of rapid global environmental change. *J. Soils Sediments*, 2020, no. 20 (12), pp. 4115—4143. DOI: 10.1007/s11368-020-02815-9.

5. Zhao H., Zou C., Huang T. et al. Heavy metals in urban Surface-Deposited sediments at different spatial heights and their potential contribution to runoff. *SSRN J.*, 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4091189.

6. Seleznev A. A., Yarmoshenko I. V., Malinovsky G. Assessment of Total Amount of Surface Sediment in Urban Environment Using Data on Solid Matter Content in Snow-Dirt Sludge. *Environ. Process*, 2019, no. 6 (3), pp. 581—595. DOI: 10.1007/s40710-019-00383-w.

7. Касимов Н. С. Экогеохимия ландшафтов. — М.: ИП Филимонов М. В., 2013. — 207 с.
Kasimov N. S. Ecogeochemistry of landscapes. Moscow, IP Filimonov M. V., 2013, 207 p. (In Russian).

8. Global Burden of Disease Collaborative Network. Global Burden of Disease Study 2019 (GBD 2019) Air Pollution Exposure Estimates 1990—2019. USA, Inst. for Health Metrics and Evaluation, 2021. DOI: 10.6069/70JS-NC54.

9. Taylor K. G., Owens P. N. Sediments in urban river basins: a review of sediment-contaminant dynamics in an environmental system conditioned by human activities. *J. Soils Sediments*, 2009, no. 9 (4), pp. 281—303. DOI: 10.1007/s11368-009-0103-z.

10. Селезнев А. А., Ярмошенко И. В., Шевченко А. В., Малиновский Г. П. Обоснование экологической геоиндикаторной роли современных поверхностных пылегрязевых отложений городской среды // Метеорология и гидрология. — 2023. — № 5. — С. 107—122. — DOI: 10.52002/0130-2906-2023-5-107-122.

Seleznev A. A., Yarmoshenko I. V., Shevchenko A. V., Malinovsky G. P. Rationale for the Ecological Geoindicator Role of Contemporary Surface Sediments of Dust and Dirt in Urban Environment. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, no. 48, pp. 467—478. DOI: 10.3103/S1068373923050102.

11. Воробьевская Е. Л., Седова Н. Б., Слипчук М. В., Цымбал М. Н. Современная геоэкологическая си-

туация в Мурманске: зимний аспект // Экология промышл. производства. — 2022. — № 4 (120). — С. 43—47. — DOI: 10.52190/2073-2589_2022_4_43.

Vorobievskaya E. L., Sedova N. B., Slipenchuk M. V., Tsymbal M. N. The current geoecological situation in the city of Murmansk: winter aspect. *Industrial Ecology*, 2022, no. 4 (120), pp. 43—47.

12. Slukovskii Z., Dauvalter V. A., Guzeva A. et al. The Hydrochemistry and Recent Sediment Geochemistry of Small Lakes of Murmansk, Arctic Zone of Russia. *Water*, 2020, no. 12 (4), p. 1130. DOI: 10.3390/w12041130.

13. Slukovskii Z. Vanadium in modern sediments of urban lakes in the North of Russia: natural and anthropogenic sources. *Marine Pollution Bull.*, 2023, no. 197 (48), p. 115754. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115754.

14. Даувальтер В. А., Слуковский З. И., Денисов Д. Б., Черепанов А. А. Особенности химического состава воды городских озер Мурманска // Вестн. СПбГУ. Науки о Земле. — 2021. — № 66 (2). — С. 252—266. — DOI: 10.21638/spbu07.2021.204.

Dauwalter V. A., Slukovskii Z. I., Denisov D. B., Cherepanov A. A. Features of the chemical composition of water of urban lakes of Murmansk. *Vestnik SPbSU. Earth Sciences*, 2021, no. 66 (2), pp. 252—266. (In Russian).

15. Seleznev A. A., Yarmoshenko I. V., Malinovsky G. P. et al. Snow-dirt sludge as an indicator of environmental and sedimentation processes in the urban environment. *Sci Rep.*, 2019, no. 9 (1). DOI: 10.1038/s41598-019-53793-z.

16. Yarmoshenko I. V., Malinovsky G., Baglaeva E., Seleznev A. A. A Landscape Study of Sediment For-

mation and Transport in the Urban Environment. *Atmosphere*, 2020, no. 11 (12), p. 1320. DOI: 10.3390/atmos11121320.

17. Воиткевич Г. В. и др. — Краткий справочник по геохимии. — М., 1970.

Voitkevich G. V. et al. *Brief Reference Book on Geochemistry*. Moscow, 1970. (In Russian).

18. Shevchenko A. V., Seleznev A. A., Malinovsky G. P., Yarmoshenko I. V. Modeling Sediment Production In Urban Environments: Case Of Russian Cities. *Geography, Environment, Sustainability*, 2023, no. 4 (16), pp. 144—155. DOI: 10.24057/2071-9388-2023-3022.

19. Seleznev A. A., Yarmoshenko I. V., Malinovsky G. P. Assessment of Total Amount of Surface Sediment in Urban Environment Using Data on Solid Matter Content in Snow-Dirt Sludge. *Environ. Process*, 2019, no. 6 (3), pp. 581—595. DOI: 10.1007/s40710-019-00383-w.

20. Козлов Н. Е., Сорохтин Н. О., Глазнев В. Н. и др. Геология архея Балтийского щита. — СПб.: Наука, 2006. — 329 с.

Kozlov N. E., Sorokhtin N. O., Glaznev V. N. et al. *Geology of the Baltic Shield Archean*. St. Petersburg, Nauka, 2006, 329 p. (In Russian).

21. Guha N., Straif K., Benbrahim-Tallaa L. The IARC Monographs on the carcinogenicity of crystalline silica. *Med Lav*, 2011, no. 102 (4), p. 310—320.

22. Бетехтин А. Г. Курс минералогии: учебное пособие. — М.: КДУ, 2007. — 721 с.

Betekhtin A. G. *Course of mineralogy: textbook*. Moscow, KDU, 2007, 721 p.

Информация об авторах

Ярмошенко Илья Владимирович, кандидат физико-математических наук, директор, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620108, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20), e-mail: ivy@ecko.uran.ru.

Шевченко Андрей Викторович, младший научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620108, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20), e-mail: av.shev98@gmail.com.

Глухов Виталий Сергеевич, инженер-исследователь, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620108, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20), e-mail: glukhov.v.s.work@gmail.com.

Малиновский Георгий Петрович, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620108, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20), e-mail: georgy@ecko.uran.ru.

Селезнев Андриан Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620108, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20), e-mail: sandrian@rambler.ru.

URBAN SURFACE DEPOSITED SEDIMENTS AS AN INDICATOR OF THE ENVIRONMENTAL AND GEOCHEMICAL STATE OF THE ARCTIC CITY

Yarmoshenko, I. V., Shevchenko, A. V., Glukhov, V. S., Malinovsky, G. P., Seleznev, A. A.

Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russia)

The article was received on May 3, 2024

For citing

Yarmoshenko I. V., Shevchenko A. V., Glukhov V. S., Malinovsky G. P., Seleznev A. A. Urban surface deposited sediments as an indicator of the environmental and geochemical state of the Arctic city. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 449—461. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-449-461. (In Russian).

Abstract

Urban surface deposited sediments are considered as an indicator of the ecological and geochemical state of the city of Murmansk. The authors have determined regularities that link mineral, chemical and granulometric composition of sediments into a single system; and characterized environmentally significant aspects of contemporary urban sediment genesis. It is shown that pollution and granulometric differentiation of sediments cause increased accumulation of some heavy metals in dust and mud sediments. The formation of sediment accumulations in relief depressions becomes a source of fine particles entering the atmosphere.

Keywords: *Arctic cities, Murmansk, geoecological monitoring, erosion processes, surface pollution, sedimentation, heavy metals.*

Information about the authors

Yarmoshenko, Ilya Vladimirovich, PhD, Director, Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, S. Kovalevskaya St., Ekaterinburg, Russia, 620108), e-mail: ivy@ecko.uran.ru.

Shevchenko, Andrey Viktorovich, Researcher, Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, S. Kovalevskaya St., Ekaterinburg, Russia, 620108), e-mail: av.shev98@gmail.com.

Glukhov, Vitaly Sergeevich, Researcher, Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, S. Kovalevskaya St., Ekaterinburg, Russia, 620108), e-mail: glukhov.v.s.work@gmail.com.

Malinovsky, Georgy Petrovich, PhD, Head of Laboratory, Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, S. Kovalevskaya St., Ekaterinburg, Russia, 620108), e-mail: georgy@ecko.uran.ru.

Seleznev, Andrian Anatolievich, PhD, Senior Researcher, Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, S. Kovalevskaya St., Ekaterinburg, Russia, 620108), e-mail: sandrian@rambler.ru.

© Yarmoshenko I. V., Shevchenko A. V., Glukhov V. S., Malinovsky G. P., Seleznev A. A., 2024