

Научная статья
УДК 541.35 543.062, 543.064, 543.061, 546.06, 54.062
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.046

ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОЧАСТИЦ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ МОСКВЫ И МУРМАНСКА

**Андрей Игоревич Новиков¹, Анна Александровна Широкая², Марина Вячеславовна Слуковская³,
Анна Андрьяновна Ветрова⁴, Олеся Ивановна Сазонова⁵, Ольга Владимировна Гавричкова⁶**

^{1, 2}Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

³Центр наноматериаловедения Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

^{4, 5}Федеральный исследовательский центр «Пушчинский научный центр биологических исследований
Российской академии наук», Пушино, Россия

⁶Институт исследований наземных экосистем, Национальный исследовательский совет, Порано, Италия

¹a.novikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2765-8251>

²a.shirokaia@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1325-2499>

³slukovskaya.mv@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-5406-5569>

⁴phdvetrova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9090-3478>

⁵sazonova_oi@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2767-2312>

⁶olga.gavrichkova@cnr.it, <https://orcid.org/0000-0003-1818-4912>

Аннотация

Получена база данных концентраций химических элементов в образцах, отобранных в Москве и Мурманске в трех различных зонах: транспортной, селитебной и рекреационной. Сравнение концентраций элементов по классам опасности в образцах, отобранных весной, летом и осенью, позволило установить, что транспортная зона была основным источником загрязняющих веществ в обоих городах. Подъем дорожной пыли, вероятно, является доминирующим фактором, формирующим химический состав аэрозольной пыли.

Ключевые слова:

элементный анализ, масс-спектрометрия, индуктивно-связанная плазма, потенциально токсичные элементы, транспортная, селитебная, рекреационная

Финансирование:

государственное задание по теме НИР № FMEZ-2025-0059, государственное задание № FMRM-2022-0014.

Для цитирования:

Элементный анализ микрочастиц городской среды Москвы и Мурманска / А. И. Новиков [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 270–275. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.046.

Original article

ELEMENTAL ANALYSIS OF MICROPARTICLES IN THE URBAN ENVIRONMENT OF MOSCOW AND MURMANSK

**Andrey I. Novikov¹, Anna A. Shirokaya², Marina V. Slukovskaya³, Anna A. Vetrova⁴,
Olesya I. Sazonova⁵, Olga V. Gavrichkova⁶**

^{1, 2}Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre
“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences” Apatity, Russia

³Center for Nanomaterials Science, Kola Science Center, Apatity, Russia

^{4, 5}The Federal Research Center “Pushchino Scientific Center for Biological Research
of the Russian Academy of Sciences”, Pushchino, Russia

⁶Research Institute on Terrestrial Ecosystems, National Research Council, Porano, Italy

¹a.novikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2765-8251>

²a.shirokaia@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1325-2499>

³slukovskaya.mv@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-5406-5569>

⁴phdvetrova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9090-3478>

⁵sazonova_oi@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2767-2312>

⁶olga.gavrichkova@cnr.it, <https://orcid.org/0000-0003-1818-4912>

Abstract

A database of chemical element concentrations in samples collected in Moscow and Murmansk was compiled for three different zones: traffic, residential and recreational. Comparison of element concentrations by hazard classes in samples collected in spring, summer and autumn indicates that transport zone is the main source of pollutants in both cities. Road dust resuspension appears to be the dominant factor shaping the chemical composition of airborne dust.

Keywords:

elemental analysis, mass spectrometry, inductively coupled plasma, potentially toxic elements, traffic, residential, recreational

Funding:

State task on the topic of research No FMEZ-2025-0059, state task on the topic of research No FMRM-2022-0014.

For citation:

Elemental analysis of microparticles in the urban environment of Moscow and Murmansk / A. I. Novikov [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 270–275. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.046.

Введение

Контроль за состоянием экологии городской среды и влиянием различных антропогенных факторов диктует необходимость проведения количественного химического анализа различных природных/антропогенных объектов, которые могут дать представление о загрязнении.

В последние годы растут масштабы и скорость урбанизации, а также наблюдается значительный рост городского населения, поэтому все больше внимания уделяется изучению экологии городской среды [1–3]. Крупные города — это антропогенные экосистемы, которые отличаются от природных по многим факторам: климату, физико-химическим свойствам почвы и воздуха, типу и структуре растительности, степени загрязнения и другим. Мелкая пыль или твердые частицы признаны одними из самых вредных загрязнителей, связанных с городской средой [4]. Пространственная структура городов обычно делится на функциональные зоны: рекреационную, селитебную и промышленную (транспортную). Как правило, функциональное зонирование определяет степень антропогенного воздействия на экосистемы и, следовательно, влияет на загрязнение [5–9]. Мониторинг качества воздуха в городах, проводимый местными органами, не всегда обеспечивает достаточный пространственный охват.

В городах Мурманске и Москве был прокачан воздух через фильтры в трех различных зонах: «транспортной» (TR), «селитебной» (RS) и «рекреационной» (GZ). Сравнение концентраций элементов в различных зонах позволило провести оценку возможных источников загрязнения и их сезонного варьирования.

Растворы и аппаратура

Осаждение частиц пыли воздуха осуществляли на PTFE фильтры (Omnipore, 47mm) с помощью пробоотборника SMART (FAI Instruments, Италия) со скоростью потока 2 л/мин на протяжении 8 дней.

Для анализа использовали кислоту HNO_3 конц. квалификации «ос. ч.» по ГОСТ 1125, перекись водорода по ГОСТ 177-88, воду дистиллированную по ГОСТ 6709, аргон газообразный высшего сорта по ГОСТ 10157, воду деионизованную (18 МОм·см), многоэлементный стандартный раствор Multi-element ICP-MS Calibration STD — № 1 (Perkin Elmer, США) для настройки прибора, многоэлементные стандартные растворы IV-STOK-21, IV-STOK-29, IV-STOK-28, IV-STOK-26 (Inorganic Ventures, США) с массовой концентрацией определяемых элементов 10 мг/дм³ и погрешностью, не превышающей 0,5 % при $P = 0,95$, для построения градуировочных характеристик. В качестве фонового раствора для разбавления образцов использовали 2 %-й раствор HNO_3 .

Правильность построения градуировочной характеристики оценивали с помощью анализа стандартных образцов: CRM-SOIL-A (Certified Reference Material Soil Solution A) и CWW-TM-A (Certified Waste Water-Trace metals Solution A)

В качестве вспомогательных устройств применяли установку для очистки воды (Millipore, США), установку для очистки кислот (Berghoff, Германия), плитку электрическую стеклокерамическую с закрытой спиралью по ГОСТ 14919.

Измерения проводили на масс-спектрометре ELAN 9000 DRC-e (Perkin Elmer, США) с индуктивно-связанной аргонной плазмой с замкнутой системой охлаждения с введением образца с помощью перистальтического насоса и пробоподатчика AS-93+. Прибор подготавливали к работе в соответствии с руководством пользователя [10]. Необходимые режимы работы устанавливали в соответствии с рекомендациями производителя. После запуска прибора производили проверку рабочих характеристик

прибора, включая чувствительность во всем диапазоне масс, проверку уровня фона, уровня вторичных оксидных и двухзарядных ионов. При измерении образцов стандартное отклонение повторяемости (СКО) не превышало 1 %.

Подготовка проб для анализа

Обработку фильтров проводили, основываясь на методике [11], способ № 1 «Разложение анализируемых проб смесью концентрированной азотной кислоты и перекиси водорода для извлечения группы кислоторастворимых элементов». К образцам приливали 15 см³ HNO₃ конц. квалификации «ос. ч.» и выдерживали при температуре 95 °С 3–4 ч. После охлаждения добавляли 0,5 см³ перекиси водорода, затем снова нагревали при температуре 95 °С в течение одного часа, после чего раствор пробы охлаждали и доводили до метки деионизованной водой до объема 50 см³.

Результаты

На рисунке приведено сравнение концентраций элементов в различных зонах Москвы и Мурманска по классам опасности весной, летом и осенью (ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения). Из полученных данных видно, что для Москвы, как и для Мурманска, характерно снижение общего загрязнения воздуха различных зон в ряду TR > RS > GZ.

На рисунке, *а* видно, что загрязнение воздуха потенциально-токсичными элементами (ПТЭ) в рекреационной зоне Москвы возрастает от весны к осени. Однако исключение составляет Cr, максимальная концентрация которого наблюдалась в летний период, а в весенний период Cr в составе образцов отсутствовал. Cd и Mo обнаружены только в осенний период.

На рисунке, *б* видно, что самое сильное загрязнение воздуха ПТЭ в селитебной зоне Москвы приходится на летний период. Однако количество Mo и Sb больше оказалось в осенний период, Cd был обнаружен только осенью.

На рисунке, *в* видно, что загрязнение воздуха ПТЭ в транспортной зоне Москвы в основном возрастает от весны к осени, однако Cr также был обнаружен только летом.

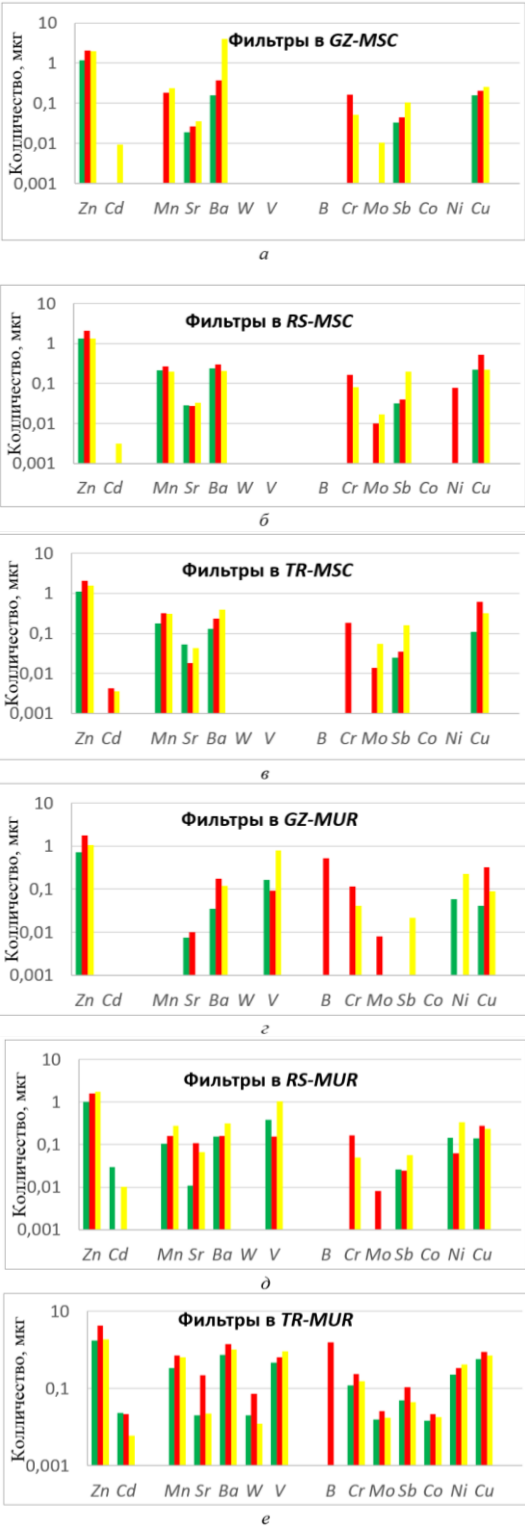
На рисунке, *г* видно, что загрязнение воздуха ПТЭ в рекреационной зоне Мурманска не показывает однозначной закономерности для разных примесей. Количество Zn, Sr, Ba, V, Cr, Mo и Cu больше в летний период. Наибольшие количества V, Sb и Ni обнаружены в осенний период.

На рисунке, *д* видно, что загрязнение воздуха ПТЭ в селитебной зоне Мурманска также не показывает однозначной закономерности. Количество Zn, Mn и Ba возрастает от весны к осени, количество V, Sb и Ni летом обнаружено меньше, чем весной и осенью, но самое большое количество пришлось на осень. Количество Sr, Cr, Mo и Cu было максимальным в летний период.

На рисунке, *е* видно, что загрязнение воздуха ПТЭ в зоне трафика Мурманска наибольшее в летний период.

Выводы

В результате проведенных исследований получена база данных концентраций химических элементов в образцах, отобранных в Москве и Мурманске в трех различных зонах («транспортной», «селитебной» и «рекреационной»). Сравнение концентраций элементов по классам опасности в образцах, отобранных весной, летом и осенью, позволило установить, что транспортная зона, возможно, была основным источником загрязняющих веществ в обоих городах. Однако проводимая в Москве тщательная уборка основных дорог снизила количество пыли, которая попадает в воздух в зоне движения транспорта. Меньше пыли также переносилось на большие расстояния от источника загрязнения. В Мурманске уборка дорог проводится реже, что приводит к скоплению пыли на поверхностях и ее дальнейшему распространению по территории, что подтверждается схожим химическим составом пыли между всеми зонами. Летний период одинаково более «сухой» для обоих городов, что облегчает подъем частиц пыли с поверхностей и приводит к повышению количества ПТЭ в воздухе. Таким образом, выдвинуто предположение, что доминантным фактором, влияющим на химический состав частиц пыли в воздухе, является наличие пыли на дорогах.



Сравнение концентраций элементов в различных зонах Москвы и Мурманска по классам опасности весной (зеленый), летом (красный) и осенью (желтый). Первый класс: Zn и Cd; второй класс: Mn, Sr, Ba, W и V; третий класс: B, Cr, Mo, Sb, Co, Ni и Cu

Список источников

1. Morel J. L., Chenu C., Lorenz K. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs) // *Journal of Soils and Sediments*. Springer Verlag, 2015. Vol. 15, № 8. P. 1659–1666.
2. Steffan J. J. et al. The effect of soil on human health: an overview // *European Journal of Soil Science*. John Wiley & Sons, Ltd, 2018. Vol. 69, № 1. P. 159–171.
3. Vasenev V., Kuzyakov Y. Urban soils as hot spots of anthropogenic carbon accumulation: Review of stocks, mechanisms and driving factors // *Land Degradation & Development*. John Wiley & Sons, Ltd, 2018. Vol. 29, № 6. P. 1607–1622.
4. WHO. Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease; WHO: Geneva, Switzerland, 2016.
5. Sarzhanov D. A. et al. Short-term dynamics and spatial heterogeneity of CO₂ emission from the soils of natural and urban ecosystems in the Central Chernozemic Region // *Eurasian Soil Science*. Maik Nauka-Interperiodica Publishing, 2015. Vol. 48, № 4. P. 416–424.
6. Hange K., Awofolu O. R. Assessment of anthropogenic influence on the level of selected heavy metals (Cu, Zn, Cd and Pb) in soil // *Journal of Soil Science and Environmental Management*. 2017. Vol. 8, № 6. P. 113–121.
7. Chouaieb L., Hatira A., Gabteni N. Assessment of selected metal trace elements from industrial activities in the agricultural surface soil of Menzel Bourguiba (Tunisia) // *Environmental Forensics*. Taylor and Francis Inc. 2018. Vol. 19, № 4. P. 277–287.
8. Ivashchenko K. V. et al. Biomass and respiration activity of soil microorganisms in anthropogenically transformed ecosystems (Moscow region) // *Eurasian Soil Science*. Maik Nauka-Interperiodica Publishing, 2014. Vol. 47, № 9. P. 892–903.
9. Steindor K. A. et al. Assessment of heavy metal pollution in surface soils and plant material in the post-industrial city of Katowice, Poland // *Journal of Environmental Science and Health — Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. Taylor and Francis Inc. 2016. Vol. 51, № 5. P. 371–379.
10. ELAN DRC ICP-MS system with dynamic bandpass tuning: an unequalled approach to reducing interferences and improving detection limits // "ICP mass spectrometry" technical note // Perkin Elmer SCIEX. USA. 2000. P. 6.
11. ПНД Ф. 16.1:2.3:3.11-98. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды. Москва. 2005. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293777/4293777593.pdf>.

References

1. Morel J. L., Chenu C., Lorenz K. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *Journal of Soils and Sediments*. Springer Verlag, 2015. Vol. 15, No. 8, pp. 1659–1666.
2. Steffan J. J. et al. The effect of soil on human health: an overview. *European Journal of Soil Science*. John Wiley & Sons, Ltd, 2018, Vol. 69, No. 1, pp. 159–171.
3. Vasenev V., Kuzyakov Y. Urban soils as hot spots of anthropogenic carbon accumulation: Review of stocks, mechanisms and driving factors. *Land Degradation & Development*. John Wiley & Sons, Ltd, 2018. Vol. 29, No. 6. pp. 1607–1622.
4. WHO. Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease; WHO: Geneva, Switzerland, 2016.
5. Sarzhanov D. A. et al. Short-term dynamics and spatial heterogeneity of CO₂ emission from the soils of natural and urban ecosystems in the Central Chernozemic Region. *Eurasian Soil Science*. Maik Nauka-Interperiodica Publishing, 2015, Vol. 48, No. 4, pp. 416–424.
6. Hange K., Awofolu O. R. Assessment of anthropogenic influence on the level of selected heavy metals (Cu, Zn, Cd and Pb) in soil. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 2017, Vol. 8, No. 6, pp. 113–121.
7. Chouaieb L., Hatira A., Gabteni N. Assessment of selected metal trace elements from industrial activities in the agricultural surface soil of Menzel Bourguiba (Tunisia). *Environmental Forensics*. Taylor and Francis Inc., 2018, Vol. 19, No. 4, pp. 277–287.
8. Ivashchenko K. V. et al. Biomass and respiration activity of soil microorganisms in anthropogenically transformed ecosystems (Moscow region). *Eurasian Soil Science*. Maik Nauka-Interperiodica Publishing, 2014, Vol. 47, No. 9, pp. 892–903.
9. Steindor K. A. et al. Assessment of heavy metal pollution in surface soils and plant material in the post-industrial city of Katowice, Poland. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. Taylor and Francis Inc., 2016, Vol. 51, No. 5, pp. 371–379.

10. ELAN DRC ICP-MS system with dynamic bandpass tuning: an unequaled approach to reducing interferences and improving detection limits. “ICP mass spectrometry” technical note. Perkin Elmer SCIEX. USA, 2000, p. 6.
11. PND F. 16.1:2.3:3.11-98. Metodika vypolneniya izmereniy sodержaniya metallov v tverdykh obyektakh metodom spektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy. Gosudarstvennyy komitet Rossiyskoy Federatsii po okhrane okruzhayushchey sredy [Methodology for measuring metal content in solid objects using inductively coupled plasma spectrometry. State Committee of the Russian Federation for Environmental Protection]. Moscow, 2005. Available at: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293777/4293777593.pdf>.

Информация об авторах

А. И. Новиков — младший научный сотрудник;
А. А. Широкая — младший научный сотрудник;
М. В. Слуковская — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник;
А. А. Ветрова — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник;
О. И. Сазонова — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник;
О. В. Гавричкова — кандидат биологических наук, младший научный сотрудник.

Information about the authors

A. I. Novikov — Research Assistant;
A. A. Shirokaya — Research Assistant;
M. V. Slukovskaya — PhD (Biology), Senior Researcher;
A. A. Vetrova — PhD (Biology), Senior Researcher;
O. I. Sazonova — PhD (Biology), Senior Researcher;
O. V. Gavrichkova — PhD (Biology), Research Assistant.

Статья поступила в редакцию 18.08.2025; одобрена после рецензирования 08.09.2025; принята к публикации 22.09.2025.
The article was submitted 18.08.2025; approved after reviewing 08.09.2025; accepted for publication 22.09.2025.