

УДК 504.064.2

## Аккумуляция тяжелых металлов в почвах и фитомассе на урбанизированных территориях

А. А. Гаврилова, Е. И. Макарова, Р. Г. Ахтямов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Гаврилова А. А., Макарова Е. И., Ахтямов Р. Г. Аккумуляция тяжелых металлов в почвах и фитомассе на урбанизированных территориях // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 706–714. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-706-714

### Аннотация

**Цель:** Провести качественную и количественную оценку содержания тяжелых металлов (Fe, Zn, Pb, Cd) в почвах и надземных вегетационных органах растений семейства Маслиновые, а именно Сирень обыкновенная (*Syringa vulgaris*), произрастающих на урбанизированных территориях, на примере центральной части города Санкт-Петербурга. Провести оценку аккумуляции железа, цинка, кадмия и свинца почвенным покровом и фитомассой в зависимости от удаленности улично-дорожной сети, прилегающей к садово-парковым зонам, и интенсивности движения автотранспортного потока по исследуемым автомагистралям. **Методы:** Экспериментальным методом, на основании «Методики определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов», был определен состав и интенсивности движения автотранспортного потока, проходящего по автомагистралям, прилегающим к зонам исследования. В дальнейшем полученные данные были статистически обработаны. На объектах исследования было выделено, на разной удаленности от источника загрязнения, в общей сложности 20 точек отбора проб. На основании принятых «Методических указаний по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства» производились отбор проб и дальнейшая пробоподготовка к исследованию методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии. В лаборатории испытательного центра «Экологическая безопасность и охрана труда» ФГБОУ ВО ПГУПС методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии был проведен количественный анализ содержания тяжелых металлов (Fe, Zn, Pb, Cd) в отобранных образцах почв и фитомассы. **Результаты:** Определен количественный и качественный состав интенсивности автотранспортного потока, проезжающего в центральной части города Санкт-Петербурга. Определены концентрации тяжелых металлов (Fe, Zn, Cd, Pb) во всех отобранных пробах почв и фитомассе в начале и в конце вегетационного периода, листья кустарников Сирень обыкновенная, произрастающих в центральных районах города Санкт-Петербурга. В большинстве проб выявлены повышенные концентрации тяжелых металлов в надземных вегетационных органах кустарников, отобранных в конце вегетационного периода, в сравнении с отобранными пробами в начале вегетационного периода. **Практическая значимость:** Показано, что аккумуляция тяжелых металлов в растениях и почве в значительной степени зависит от расположения источника загрязнения и его интенсивности. Полученные данные могут быть рекомендованы к практическому использованию.

**Ключевые слова:** Тяжелый металл, железо, цинк, кадмий, свинец, автомобильная дорога, интенсивность, автотранспортный поток, парковая зона, почва, фитомасса, растительная проба, экологическое состояние, урбанизированная территория.

## Введение

Динамичная урбанизация территорий и параллельно с этим интенсивное развитие улично-дорожной сети, увеличение интенсивности движения автотранспортных потоков приводят к распространению и аккумуляции загрязняющих веществ, которые негативно воздействуют на окружающую среду и живые организмы. На образованных антропогенных ландшафтах резко нарушаются естественные экологические системы, а это приводит к ухудшению экологической обстановки на урбанизированных территориях, особенно в центральных частях городов, где уже исторически сложена архитектура и отличительно уплотненный градостроительный план. В данных условиях важную роль играют островки флоры и фауны [1].

Различного вида растительность выполняет продуцирующую роль в урбосистеме. В процессе жизнедеятельности растений происходит поглощение из окружающей среды загрязняющих веществ и выделение жизнеобеспечивающих газов для других живых организмов. Но загрязнение окружающей среды антропогенными агентами приводит к снижению или полному угнетению фотосинтеза и минерального обмена у растений. Между растениями и средами в процессе обмена веществ зеленые насаждения пассивно и активно осуществляют поглощение различных веществ, например тяжелых металлов. В небольшой концентрации растениям для обмена веществ необходимы некоторые тяжелые металлы, при этом переизбыток тяжелых металлов может оказывать воздействие на рост, размер и количество надземных органов растений, а также снижать устойчивость к вредным веществам, что приводит к угнетению и гибели растений [2].

Источниками поступления в окружающую среду вредных веществ на урбанизированных территориях являются: отходы производства и потребления, сбросы сточных вод с производств,

сжигание топлива на различных отраслях промышленности и транспортными средствами [3–8]. В крупных городах в атмосферу поступает порядка 70 % загрязняющих веществ от автотранспорта, и этот показатель может составлять до 95 % от всех выбросов [3]. Основными источниками поступления тяжелых металлов (Fe, Zn, Pb, Cd) в окружающую среду на территории мегаполиса является автотранспорт, механический износ подвижных частей двигателя внутреннего сгорания, покрышек шин и тормозной системы автомобиля, а также их химический износ [9].

## Материалы и методы исследования

Для проведения исследования качественного и количественного содержания тяжелых металлов в почвах садово-парковых зон и растительной массе растений, произрастающих на урбанизированных территориях, были выделены 8 парковых зон в центральных районах Санкт-Петербурга: Никольский сад, сад Дворца Юсуповых, Покровский сквер, Балтийский сад, Лопухинский сад, сад Олимпия, Летний сад. Данные зоны были определены в качестве объектов исследования по следующим критериям: общественная доступность, близость расположения жилых зданий и общественных сооружений, близость к объектам улично-дорожной сети, интенсивность автотранспортного потока на прилегающих дорожных сетях, произрастание кустарников — Сирень обыкновенная.

На основании «Методики определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов» экспериментальным путем был определен состав автотранспортных средств, движущихся по автомагистралям, прилегающим к выбранным садово-парковым зонам, с последующей статистической обработкой полученных данных [10]. Отбор и подготовка проб почв и фитомассы проводились на основании принятых Методических

указаний по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства [11]. Всего было выделено 20 мест пробоотбора, находящихся на разноудаленном расстоянии от улично-дорожной сети [12, 13]. В лаборатории испытательного центра «Экологическая безопасность и охрана труда» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I» проводилась пробоподготовка образцов почвы и фитомассы, отобранных полевым методом, а также количественный и качественный анализ на содержание тяжелых металлов (Fe, Zn, Pb, Cd) в отобранных образцах — методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии.

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты, с последующей статистической обработкой, определения натурального состава и количества автотранспортных средств, движущихся по автомагистралям, прилегающим к объектам исследования, а также полученных данных количественного анализа содержания тяжелых металлов, таких как железо, цинк, кадмий и свинец, полученные методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии, в отобранных пробах почв и растений, были статистически проанализированы и представлены в виде гистограмм с ранжированием удаленности от улично-дорожной сети (рис. 1–4).

Анализ данных аккумуляции железа в почве и фитомассе растений показывает, что концентрация тяжелого металла в большинстве отобранных проб в почве выше, чем ее содержание в вегетационных органах зеленых масс. Это говорит о буферной способности почвы и толерантности растений к данному виду загрязнения. Однако в некоторых пробах выявлено превышение концентрации железа в пробах листьев, отобранных в конце вегетационного периода, в сравнении с показателями аккумуляции данного тяжелого

металла в почве и в пробах листьев, отобранных в начале вегетационного периода. Если сравнивать показатель аккумуляции железа в фитомассе с удаленностью от улично-дорожной сети и интенсивностью движения автотранспортного потока, то прослеживается их косвенная зависимость друг от друга.

Аккумуляция цинка в отобранных пробах почв и фитомассе фактически неизменна, что показывает сохранение толерантности растений к токсическому воздействию цинка. В пробах № 11, 12, 6, 1, 5, 19 выявлено превышение содержания цинка в отобранных пробах листьев в конце вегетационного периода, в сравнении с концентрациями в пробах почв и листьев в начале вегетационного периода. Данные показатели могут говорить о воздействии повышенной интенсивности автотранспортного потока и близости к улично-дорожной сети, а также о циркуляционных процессах переноса загрязняющих веществ от источника загрязнения на более дальние расстояния.

Концентрация кадмия в большинстве проб листьев растений в конце вегетационного периода превышает значения концентраций в пробах почв и листьев в начале вегетационного периода. Полученные данные показывают неустойчивость растений к данному виду загрязнения окружающей среды. В данном случае буферная способность почвы не препятствует аккумуляции тяжелого металла в органы растений, тем самым снижается обменная способность клеточных мембран у листьев.

Повышенная аккумуляция свинца в большинстве случаев выявлена в пробах почв, чем в пробах листьев. В пробах № 16, 17, 20, 13, 18 установлено превышение концентрации свинца в пробах листьев в конце вегетационного периода, в сравнении с концентрациями в пробах почв и листьев в начале вегетационного периода. Большинство точек отбора проб расположено в относительной близости к улично-дорожной сети с

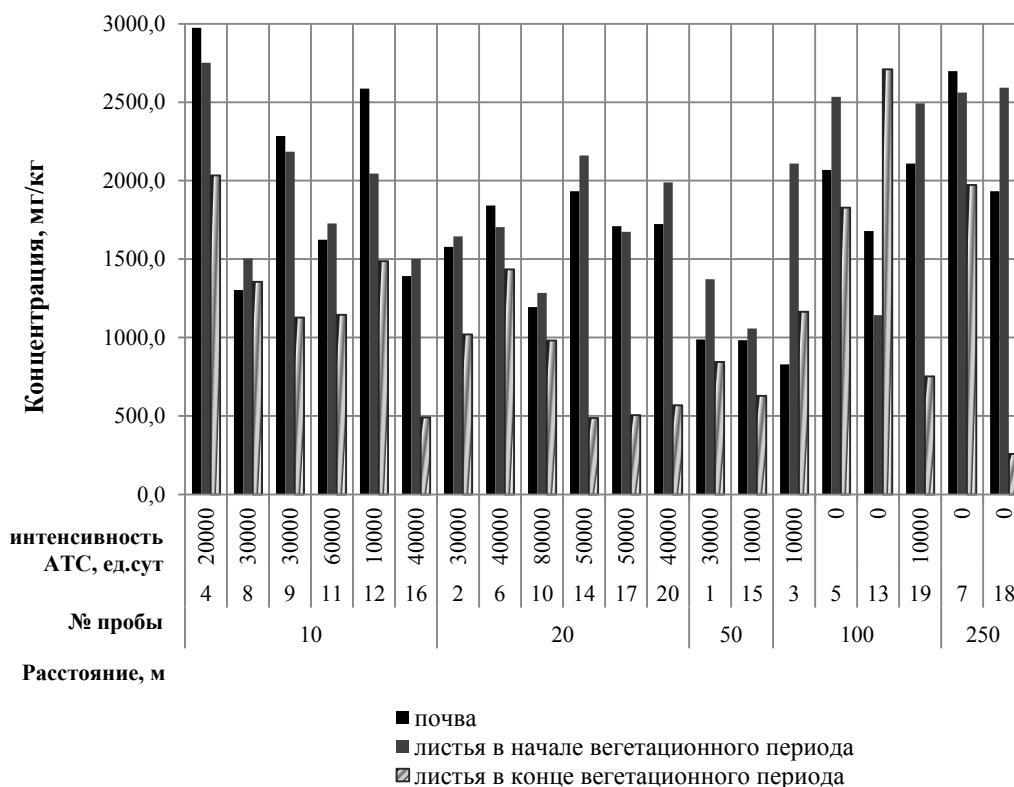


Рис. 1. Концентрация содержания железа в исследуемых пробах

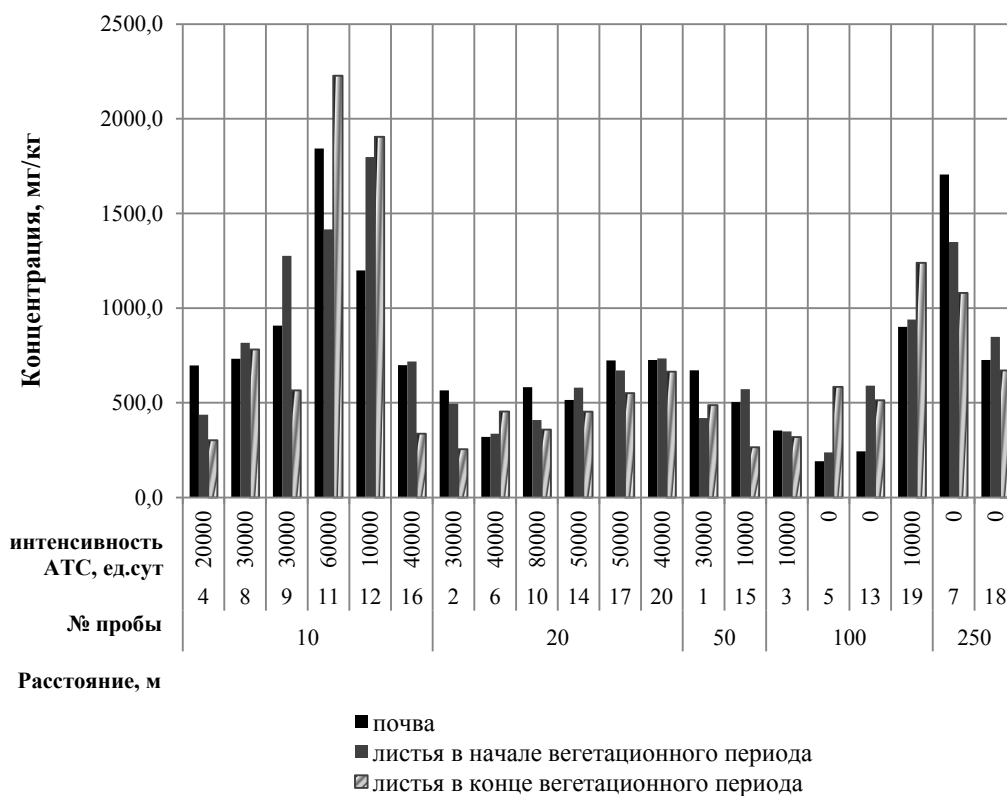


Рис. 2. Концентрация содержания цинка в исследуемых пробах

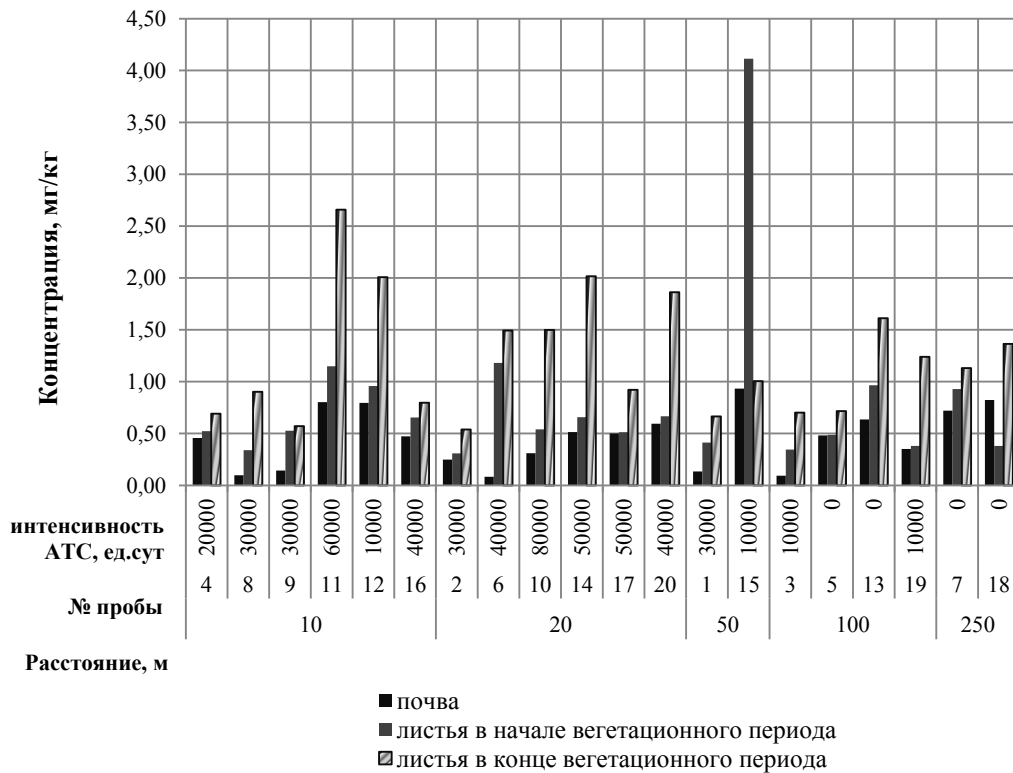


Рис. 3. Концентрация содержания кадмия в исследуемых пробах

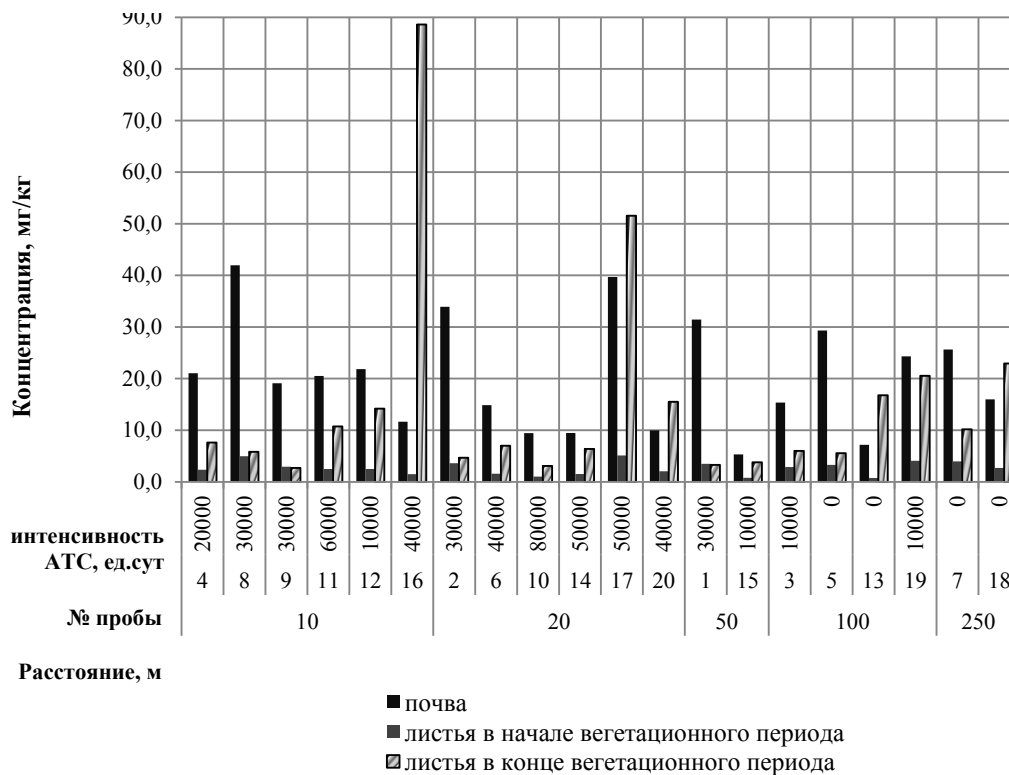


Рис. 4. Концентрация содержания свинца в исследуемых пробах

повышенной интенсивностью автотранспортного потока.

В большинстве случаев повышенное содержание концентраций тяжелых металлов в наземных вегетационных органах растений определено в пробах листьев, отобранных в конце вегетационного периода, в сравнении с пробами листьев, отобранных в начале вегетационного периода. Возможно, данный показатель характеризует аккумуляцию загрязняющих веществ не только из почв, но из атмосферного воздуха.

В результате анализа полученных результатов выявлена косвенная зависимость накопления тяжелых металлов наземными вегетационными органами кустарников, близостью расположения и интенсивностью линейного источника загрязнения окружающей среды. Общий анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что аккумуляция загрязняющих веществ в различных компонентах окружающей среды возрастает с близостью расположения и степенью вредного воздействия источника негативного влияния на окружающую среду.

## Выводы

В ходе проведенного исследования был определен количественный и качественный состав интенсивности автотранспортного потока, проезжающего по улично-дорожной сети в центральной части города Санкт-Петербурга. Определены концентрации тяжелых металлов (Fe, Zn, Cd, Pb) во всех отобранных пробах почв и фитомассе в начале и в конце вегетационного периода, листья кустарников Сирень обыкновенная, произрастающих в центральных районах города Санкт-Петербурга. В большинстве проб выявлены повышенные концентрации тяжелых металлов в наземных вегетационных органах кустарников, отобранных в конце вегетационного периода, в сравнении с отобранными пробами в начале вегетационного периода. Аккумуляция железа и

свинца в почве и фитомассе в большинстве отобранных проб в почве выше, чем ее содержание в наземных вегетационных органах кустарниковых растений, отобранных в разный период. Концентрация цинка в отобранных пробах почв и листьях растений фактически одинакова, что показывает сохранение толерантности растений к вредному воздействию цинка. Концентрация кадмия в наземных органах кустарниковых растений значительно выше в конце вегетационного периода, в сравнении с концентрацией данного металла в листьях растений в начале вегетационного периода и содержанием в почвах. Аккумуляция тяжелых металлов в растениях и почве зависит от близости расположения и интенсивности линейного источника загрязнения окружающей среды.

## Библиографический список

1. Ватулина Е. Я. Графическое представление результатов исследования экологической нагрузки на урбанизированную территорию при воздействии транспортных потоков / Е. Я. Ватулина, А. В. Леванчук, Л. А. Леванчук и др. // *Науковедение*. — 2016. — Т. 8. — № 2(33). — 100 с.
2. Байсеитова Н. М. Фитотоксичное действие тяжелых металлов при техногенном загрязнении окружающей среды / Н. М. Байсеитова, Х. М. Сартаева // *Молодой ученый*. — 2014. — № 2. — С. 382–384.
3. Копытенкова О. И. Гигиеническая характеристика химического загрязнения окружающей среды в процессе эксплуатации транспортно-дорожного комплекса / О. И. Копытенкова, А. В. Леванчук, И. Р. Мингулова // *Профилактическая и клиническая медицина*. — 2012. — Т. 93. — № 6 — С. 87–92.
4. Леванчук А. В. Загрязнение окружающей среды продуктами эксплуатационного износа автомобильно-дорожного комплекса / А. В. Леванчук // *Гигиена и санитария*. — 2014. — С. 17–21.
5. Рябец В. В. Анализ методов учета загрязнителей атмосферного воздуха автотранспортными средствами / В. В. Рябец // *Безопасность жизнедеятельности*. — 2023. — № 5. — С. 38–42.



6. Копытенкова О. И. Повышение качества оценки комфортности городской среды / О. И. Копытенкова, В. В. Рябец // *Здоровье — основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения.* — 2022. — Т. 17. — № 3. — С. 109–116.

7. Рябец В. В. Создание комфортной городской среды за счет обеспечения техносферной безопасности транспортных систем / В. В. Рябец // *Техносферная и экологическая безопасность на транспорте: материалы VIII Международной научно-практической конференции.* — Санкт-Петербург, 2022. — С. 114–117.

8. Рябец В. В. Методические подходы к оценке качества городской среды / В. В. Рябец, О. И. Копытенкова // *Материалы Международной научно-практической конференции «Здоровья и окружающая среда».* — Минск, 2022. — С. 29–31.

9. Рахманин Ю. А. Гигиеническая оценка атмосферного воздуха в районах с различной степенью развития дорожно-автомобильного комплекса / Ю. А. Рахманин, А. В. Леванчук // *Гигиена и санитария.* — 2016. — Т. 95. — № 12. — С. 1117–1121.

10. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. — М.: ЦИАНО, 1992. — 64 с.

11. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения

атмосферного воздуха. Утверждена приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 27 ноября 2019 г. № 804.

12. Гаврилова А. А., Копытенкова О. И. Андреева Л. А., Фролов А. В. Количественная оценка аккумуляции тяжелых металлов в растениях в зависимости от удаленности автодорог в центре Санкт-Петербурга / А. А. Гаврилова, О. И. Копытенкова, Л. А. Андреева // *Безопасность жизнедеятельности.* — 2018. — № 10(214). — С. 44–47.

13. Копытенкова О. И. Анализ содержания железа в листьях кустарников парковых зон мегаполиса / О. И. Копытенкова, А. А. Гаврилова, А. М. Тинус // *Проблемы обеспечения безопасности (БЕЗОПАСНОСТЬ-2021): материалы III Международной научно-практической конференции: в 2 томах.* Уфа, 2021. — С. 198–203.

Дата поступления: 28.05.2023

Решение о публикации: 08.07.2023

#### **Контактная информация:**

ГАВРИЛОВА Алина Анатольевна — ст. преподаватель; A.A.Gavrilova.eco@yandex.ru

МАКАРОВА Елена Игоревна — д-р техн. наук, доц.; makarova@mail.ru

АХТЯМОВ Расул Гумерович — канд. техн. наук, доц.; ahtamov\_zchs@mail.ru

## **Accumulation of Heavy Metals in Soils and Phytomass in Urbanized Areas**

**A. A. Gavrilova, E. I. Makarova, R. G. Akhtyamov**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Gavrilova A. A., Makarova E. I., Akhtyamov R. G. Accumulation of Heavy Metals in Soils and Phytomass in Urbanized Areas // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 706–714. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-706-714

### **Summary**

**Purpose:** To carry out a qualitative and quantitative assessment of the content of heavy metals (Fe, Zn, Pb, Cd) in soils and aboveground vegetation organs of plants of the Olive family, namely the common lilac (*Syringa vulgaris*) growing in urban areas, using the example of the central part of the city of St. Petersburg. To assess

the accumulation of iron, zinc, cadmium and lead by soil cover and phytomass, depending on the remoteness of the street-traffic network adjacent to garden-park areas, and the traffic intensity along the studied highways.

**Methods:** The experimental method, based on the “Methodology for determining vehicle emissions for conducting summary calculations of urban air pollution”, has been used to determine the composition and traffic intensity of the traffic flow passing along highways adjacent to the study areas. Subsequently, the obtained data have been statistically processed. A total of 20 sampling points have been identified at the study sites, at different distances from the pollution source. Based on the adopted “Methodological guidelines for determining heavy metals in soils of agricultural lands and crop products”, samples have been taken and further sample preparation has been carried out for research by flame atomic absorption spectrometry. In the laboratory of the testing center “Ecological and Occupational Safety” of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education PGUPS, using the method of flame atomic absorption spectrometry, a quantitative analysis of the content of heavy metals (Fe, Zn, Pb, Cd) in selected soil and phytomass samples has been carried out.

**Results:** The quantitative and qualitative composition of the intensity of the traffic flow passing through the central part of the city of St. Petersburg has been determined. The concentrations of heavy metals (Fe, Zn, Cd, Pb) have been determined in all selected soil samples and phytomass at the beginning and at the end of the growing season, leaves of common lilac shrubs growing in the central regions of the city of St. Petersburg. In most samples, elevated concentrations of heavy metals have been found in the aboveground vegetation organs of shrubs taken at the end of the growing season, compared with those taken at the beginning of the growing season. **Practical significance:** It is shown that the accumulation of heavy metals in plants and soil largely depends on the location of the pollution source and its intensity. The data obtained can be recommended for practical use.

**Keywords:** Heavy metal, iron, zinc, cadmium, lead, highway, intensity, traffic flow, park area, soil, phytomass, plant sample, ecological state, urbanized area.

## References

1. Vatulina Ye. Ya., Levanchuk A. V., Levanchuk L. A. et al. Graficheskoye predstavleniye rezul'tatov issledovaniya ekologicheskoy nagruzki na urbanizirovannuyu infrastrukturu pri vozdeystvii transportnykh potokov [Graphical presentation of the results of a study of the environmental load on urban infrastructure under the influence of traffic flows]. *Naukovedeniye*. 2016, vol. 8, Iss. 2(33), p. 100. (In Russian)

2. Bayseitova N. M., Sartayeva Kh. M. Fitotoksichnoye deystviye tyazhelykh metallov pri tekhnogennom zagryaznenii okruzhayushchey sredy [Phytotoxic effect of heavy metals in technogenic environmental pollution]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2014, Iss. 2, pp. 382–384. (In Russian)

3. Kopytenkova O. I., Levanchuk A. V., Mingulova I. R. Gigiyenicheskaya kharakteristika khimicheskogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy v protsesse ekspluatatsii transportno-dorozhnogo kompleksa [Hygienic characteristics of chemical pollution of the environment during the operation of the transport and road complex]. *Profilakticheskaya i*

*klinicheskaya meditsina* [Preventive and Clinical Medicine]. 2012, vol. 93, Iss. 6, pp. 87–92. (In Russian)

4. Levanchuk, A. V. Zagryazneniye okruzhayushchey sredy produktami ekspluatatsionnogo iznosa avtomobil'no-dorozhnogo kompleksa [Pollution of the environment by products of operational wear of the automobile and road complex]. *Gigiyena i sanitariya* [Hygiene and Sanitation]. 2014, vol. 93, Iss. 6, pp. 17–21. (In Russian)

5. Ryabec V. V. Analiz metodov ucheta zagryaznitelej atmosfernogo vozduha avtotransportnymi sredstvami [Analysis of accounting methods for atmospheric air pollutants by vehicles]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety]. 2023, Iss. 5, pp. 38–42. (In Russian)

6. Kopytenkova O. I., Ryabec V. V. Povyshenie kachestva ocenki komfortnosti gorodskoj sredy [Improving the quality of assessing the comfort of the urban environment]. *Zdorov'e — osnova chelovecheskogo potentsiala: problemy i puti ih resheniya* [Health is the basis of human potential: problems and ways to solve them]. 2022, vol. 17, Iss. 3, pp. 109–116. (In Russian)



7. Ryabec V. V. *Sozdanie komfortnoj gorodskoj sredy za schet obespecheniya tekhnosfernoj bezopasnosti transportnyh sistem. Tekhnosfernaya i ekologicheskaya bezopasnost' na transporte: materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Creation of a comfortable urban environment by ensuring the technospheric safety of transport systems. Technospheric and environmental safety in transport: materials of the VIII International scientific and practical conference]. St. Petersburg, 2022, pp. 114–117. (In Russian)

8. Ryabec V. V., Kopytenkova O. I. *Metodicheskie podhody k ocenke kachestva gorodskoj sredy. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Zdorov'ya i okruzhayushchaya sreda"* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Health and the Environment"]. Minsk, 2022, pp. 29–31. (In Russian)

9. Rakhmanin Yu. A., Levanchuk A. V. *Gigiyenicheskaya otsenka atmosfernogo vozdukh v rayonakh s razlichnoy stepen'yu razvitiya dorozhno-avtomobil'nogo kompleksa* [Hygienic assessment of atmospheric air in areas with varying degrees of development of the road and automobile complex]. *Gigiyena i sanitariya* [Hygiene and Sanitation]. 2016, vol. 95, Iss. 12, pp. 1117–1121. (In Russian)

10. *Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu tyazhelykh metallov v pochvakh sel'khozugodiy i produkcii rasteniyevodstva* [Guidelines for the determination of heavy metals in agricultural soils and crop production]. Moscow: TSIANO Publ., 1992, 64 p. (In Russian)

11. *Metodika opredeleniya vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv v atmosfernyj vozdukh ot peredvizhnyh istochnikov dlya provedeniya svodnyh raschetov zagryazneniya atmosfernogo vozduha* [Methodology for determining emissions of pollutants into the atmospheric air from mobile

sources for conducting summary calculations of atmospheric air pollution]. Utverzhdena prikazom Ministerstva prirodnyh resursov i ekologii RF ot 27 noyabrya 2019 g. № 804. (In Russian)

12. Gavrilova A. A., Kopytenkova O. I., Andreyeva L. A. et al. *Kolichestvennaya otsenka akkumulyatsii tyazhelykh metallov v rasteniyakh v zavisimosti ot udalennosti avtodorog v tsentre Sankt-Peterburga* [Quantitative assessment of the accumulation of heavy metals in plants depending on the remoteness of roads in the center of St. Petersburg]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety]. 2018, Iss. 10(214), pp. 44–47. (In Russian)

13. Kopytenkova O. I., Gavrilova A. A., Tinus A. M. *Analiz sodержaniya zheleza v list'yakh kustarnikov parkovykh zon megapolisa. Problemy obespecheniya bezopasnosti (BEZOPASNOST'-2021): materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 2 tomakh* [Analysis of the iron content in the leaves of shrubs in park areas of the metropolis. Problems of ensuring security (SAFETY-2021): materials of the III International scientific-practical conference: in 2 volumes]. Ufa, 2021, pp. 198–203. (In Russian)

Received: May 28, 2023

Accepted: July 08, 2023

#### Author's information:

Alina A. GAVRILOVA — Senior Lecturer;

A.A.Gavrilova.eco@yandex.ru

Elena I. MAKAROVA — Dr. Sci. in Engineering, Professor; makarova@mail.ru

Rasul G. AKHTYAMOV — PhD in Engineering, Associate Professor; ahtamov\_zchs@mail.ru