

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 504.054, 504.53

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-196-207>

Исследование сорбции тяжелых металлов наземными экосистемами на участках города Чита с различной антропогенной нагрузкой

Т.В. Турушева  , В.Е. Есипов

Забайкальский государственный университет, г. Чита, Российская Федерация

 turusheva_tanya@mail.ru

EDN: YKMQQT

Аннотация

Введение. Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами представляет собой одну из наиболее актуальных экологических проблем, поскольку эти вещества негативно влияют на экосистемы и здоровье живых организмов. В литературе активно исследуется вопрос о накоплении тяжелых металлов растениями в урбоэкосистемах, однако многие аспекты данной проблемы остаются недостаточно раскрытыми. Например, существующие исследования не всегда учитывают влияние различных факторов окружающей среды на процесс сорбции металлов. Это создает пробелы в понимании механизмов взаимодействия растений и загрязняющих веществ. Настоящее исследование нацелено на детальное изучение зависимости сорбции тяжелых металлов сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*) от уровня загрязнения среды. Авторы ставят задачу определить, как изменяются показатели накопления металлов в зависимости от условий произрастания, что позволит более точно оценить роль данного растения в экологии городских территорий.

Материалы и методы. Исследования проводились на территории города Чита Забайкальского края. Сосна обыкновенная является широко распространенным видом рода сосна в Забайкальском крае, поэтому материалом для исследования послужила кора сосны обыкновенной, а также почвенные образцы, взятые на участках города Чита, отличающихся интенсивностью антропогенной нагрузки. Выбор участков для отбора материала осуществлялся, в том числе, по показателю комплексного загрязнения атмосферного воздуха (ИЗА5) на территории города Чита. После отбора пробы подвергались квартованию, сушке и измельчению до мелкозернистого состояния, после чего кора и почва подвергались термической обработке в муфельной печи при 600 °С. Обожженную почву и золу коры сосны исследовали по методикам, общепринятым в химии древесины, с использованием спектрометрического метода на атомно-абсорбционном спектрометре Shimadzu AA–6200. Кислотность определяли потенциометрическим методом в хлоридной вытяжке. Для этого использовали 1М раствор KCl (рН = 6,0), а также стандартные буферные растворы (рН 4,01; 6,86; 9,18) для калибровки прибора. Суспензии готовили, добавляя к 30 г почвы 75 мл экстрагента, перемешивали в течение одной минуты и измеряли рН после стабилизации показаний. Параллельно выполняли контрольный эксперимент без образца почвы.

Результаты исследования. Проведенный анализ полученных данных по сезонному изменению зольности и влажности коры сосны обыкновенной показал, что они незначительно возрастают в летне-осенний период. В ходе работы была получена динамика распределения тяжелых металлов в почве и коре сосны обыкновенной в зависимости от сезона года. Выяснено, что наибольшее содержание меди в почве и в коре сосны обыкновенной наблюдается на участке Батарейной сопки, превышая ПДК в 11 раз, далее ул. Гранитная, где ПДК превышен в 5 раз. Высокое содержание цинка в почве сосны обыкновенной наблюдается сразу в трех точках: Сосновый бор, Парк Памяти и Батарейная сопка, с превышением ПДК в 1,77; 1,74 и 1,5 раза соответственно. Содержание свинца в почве на всех семи точках находится в пределах ПДК. Сезонных изменений содержания тяжелых металлов в почве и коре не наблюдается. Таким образом, в ходе исследования была выявлена зависимость содержания тяжелых металлов в почве и коре сосны обыкновенной от степени антропогенной загруженности районов города Чита Забайкальского края.

Обсуждение. Результаты исследования показали зависимость содержания тяжелых металлов в исследованных образцах почвы и коры сосны обыкновенной от степени интенсивности антропогенной нагрузки. Таким образом, сосна обыкновенная представляет собой ценный объект для мониторинга загрязнения тяжелыми металлами, так как сочетает в себе высокую чувствительность к техногенному воздействию, устойчивость к неблагоприятным условиям и долговременную способность накапливать токсиканты. Полученные данные обосновывают целесообразность включения этого вида в системы экологического контроля, особенно в регионах с развитой промышленностью и транспортной инфраструктурой. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку стандартизированных методик использования сосны в биоиндикации, а также на изучение её фиторемедиационного потенциала в условиях хронического загрязнения.

Заключение. Проведенное исследование расширяет понимание механизмов миграции и аккумуляции тяжелых металлов в урбанизированных экосистемах, особенно в условиях резко-континентального климата. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации городского планирования, минимизации негативного воздействия на здоровье населения и разработки стратегий устойчивого развития территорий с высокой антропогенной нагрузкой.

Ключевые слова: тяжелые металлы, загрязнение почвы, сосна обыкновенная, мониторинг, негативное воздействие

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников лаборатории физико-химических исследований природных объектов и синтезированных веществ Финансово-хозяйственного института проблем освоения Сибири и Востока Забайкальского государственного университета за помощь в получении и обсуждении результатов.

Для цитирования. Турушева Т.В., Есипов В.Е. Исследование сорбции тяжелых металлов наземными экосистемами на участках города Чита с различной антропогенной нагрузкой. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(3):196–207. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-196-207>

Original Empirical Research

Investigation of the Sorption of Heavy Metals by Terrestrial Ecosystems in Areas of the City of Chita with Various Anthropogenic Loads

Tatyana V. Turusheva , Vyacheslav E. Esipov

Transbaikal State University, Chita, Russian Federation

✉ turusheva_tanya@mail.ru

Abstract

Introduction. Environmental pollution with heavy metals is one of the most pressing environmental problems, as these substances can have a negative impact on ecosystems and living organisms. In particular, the accumulation of heavy metals in plants in urban ecosystems is an issue that has been widely studied, but many aspects of the problem remain unintelligible. For example, existing research does not always consider the influence of different environmental factors on metal sorption processes. This creates gaps in understanding the mechanisms of interaction between plants and pollutants. The current study aims to investigate the dependence of heavy metal sorption by the Scots pine (*Pinus sylvestris*) on the level of environmental pollution. The goal is to determine how metal accumulation indicators change depending on the growing conditions, allowing for a more accurate assessment of this plant's role in urban ecology.

Materials and Methods. The research was conducted in the city of Chita in the Trans-Baikal Territory. Scots pine is a widespread species of pine in this region, therefore, the bark of the Scots pine, as well as soil samples from sites in Chita that were exposed to high levels of human activity served as the basis for the study. Selection of sites was based, among other factors, on complex air pollution index (API5) in Chita. After collecting samples, they were quartered, dried, and ground into a fine powder. Then, the bark and soil were heated in a muffle furnace at 600°C. The burnt soil and pine bark ash were analyzed using methods commonly used in wood chemistry, including a spectrometric analysis on a Shimadzu AA-6200 atomic absorption spectrometer. The acidity was determined by the potentiometric method in a chloride extract. For this purpose, a 1M KCl solution (pH = 6.0) was used, as well as standard buffer solutions (pH 4.01; 6.86; 9.18) for instrument calibration. Suspensions were prepared by adding 75 ml of extractant to 30 g of soil, stirring for one minute. The pH was then measured after the readings stabilized. In parallel, a control experiment was conducted without a soil sample.

Results. Analysis of the data on seasonal changes in the ash and moisture content of Scots pine bark showed that they slightly increased in the summer and autumn months. During the study, we also obtained data on the distribution of heavy metals in the soil and bark of Scots pine depending on the season of the year. It was found that the highest levels of copper in the soil and bark of Scots pine were observed in Batareinaya Sopka, exceeding the maximum permissible concentration by 11 times, followed by Granitnaya Street, where the maximum permissible concentration was exceeded

by 5 times. Zinc levels in the soil were high at three locations: Sosnovy Bor, Memory Park, and Batareinaya Sopka, exceeding the maximum permissible concentration by 1.77, 1.74 and 1.5 times, respectively. Lead levels were within the MPC at all seven locations. There were no seasonal changes in the content of heavy metals in the soil and bark. Thus, the study revealed the dependence of the content of heavy metals in the soil and bark of the Scots pine on the degree of anthropogenic load in the districts of Chita in the Trans-Baikal Territory.

Discussion. The results of the study demonstrated the correlation between the concentration of heavy metals in soil and bark samples of Scots pine and the degree of anthropogenic load. Therefore, the Scots pine can be considered a valuable object for monitoring heavy metal pollution, as it combines high sensitivity to man-made effects, resistance to adverse conditions and long-term ability to accumulate toxic substances. The data obtained support the idea of including the Scots pine in environmental monitoring systems, particularly in areas with developed industrial and transportation infrastructure. Future research could focus on developing standardized methods for using pine in bioindication, as well as studying its phytoremediation potential in conditions of chronic pollution.

Conclusion. The study expands our understanding of the mechanisms behind the migration and accumulation of heavy metals in urban ecosystems, especially in areas with a harsh continental climate. The findings can be used to improve urban planning, reduce the negative impact on public health, and develop sustainable strategies for areas with high levels of anthropogenic load.

Keywords: heavy metals, soil pollution, scots pine, monitoring, negative impact

Acknowledgements. The authors would like to thank the staff of the Laboratory of Physical-Chemical Research of Natural Objects and Synthesized Substances of the Financial and Economic Institute for the Development of Siberia and the East of Transbaikal State University for their help in obtaining and discussing the results.

For Citation. Turusheva TV, Esipov VE. Investigation of the Sorption of Heavy Metals by Terrestrial Ecosystems in Areas of the City of Chita with Various Anthropogenic Loads. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(3):196–207. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-196-207>

Введение. Одной из актуальных проблем современной экологии является загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами. Эти вещества [1] относятся к первому и второму классам опасности, так как оказывают серьезное негативное воздействие на биологические процессы в экосистемах [2]. Кроме того, тяжелые металлы способны накапливаться в живых организмах, почве и водоемах [3]. Попадая в организм человека через желудочно-кишечный тракт, дыхательные пути или кожу в малых дозах эти вещества незаметны, так как лишены вкуса, запаха и цвета. Однако их способность накапливаться [4] годами в костях, печени или мозге человека может вызывать тяжелые заболевания, такие как неврологические расстройства и онкологию. В последнее время в научной литературе наблюдается возрастание интереса к теме аккумуляции тяжелых металлов [5] растениями урбоэкосистем [6]. Автор [7] в своей работе проводит сравнительный анализ накопления тяжелых металлов в листьях, корне и коре караганы древовидной (*Caragana arborescens*) в условиях антропогенного воздействия на территории Забайкальского края. Исследования другого автора показывают [8], что в урбанизированных ландшафтах, особенно вблизи автомагистралей, кора сосны аккумулирует значительные концентрации свинца, кадмия, цинка и меди, выполняя роль своеобразного «депо» для этих загрязнителей. Поскольку город Чита характеризуется горно-котловинным расположением и высоким уровнем загрязнения воздуха, а сосна обыкновенная круглогодично выполняет функцию аккумуляции загрязнителей, оседающих на её хвое и коре, исследование накопления тяжелых металлов в хвойных деревьях для климатических условий Забайкальского края остается недостаточно изученным, что делает данную работу особенно актуальной.

Установлено [9], что место произрастания в значительной степени влияет на количественное содержание тяжелых металлов в растениях. Основными источниками попадания тяжелых металлов в окружающую среду в Забайкальском крае являются промышленность, автотранспортные выбросы, а также частный сектор, использующий уголь для печного отопления. Проблема загрязнения атмосферного воздуха в Забайкальском крае стоит особенно остро, так как город Чита уже несколько лет подряд входит в число городов с наиболее высоким уровнем загрязнения воздушной среды. Эта проблема усугубляется природно-климатическими условиями и горно-котловинным расположением города. Зимой над территорией Забайкальского края господствует сибирский антициклон, для которого характерны низкая температура и отсутствие переноса воздушных масс. В результате над городом Чита возникает температурная инверсия, препятствующая нормальному рассеиванию выбросов. Поэтому мониторинг состояния атмосферного воздуха по приоритетным загрязняющим веществам является необходимым во многих городах [10].

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) представляет значительный интерес в контексте фиторемедиации городских территорий, загрязненных тяжелыми металлами, благодаря ряду уникальных адаптационных механизмов и высокой устойчивости к неблагоприятным экологическим условиям. Будучи вечнозеленым хвойным видом, она круглогодично выполняет функцию аккумуляции загрязнителей [11], особенно эффективно улавливая металлосодержащие аэрозоли и пылевые частицы, оседающие на поверхности хвои.

Кора сосны обыкновенной выступает уникальным биологическим фильтром, играющим значительную роль в накоплении тяжелых металлов в условиях городской среды. В отличие от других тканей дерева, кора обладает выраженной сорбционной способностью благодаря своей пористой структуре, высокому содержанию лигнина и присутствию фенольных соединений, которые активно связывают ионы металлов. Механизм накопления металлов в коре имеет комплексный характер. Первичное осаждение происходит благодаря прямому контакту с атмосферными выбросами — частицами износа шин, тормозных колодок и дорожного покрытия, которые оседают на шероховатой поверхности коры. Вторичное накопление связано с процессами коровой диффузии, когда растворимые формы металлов проникают в наружные слои коры вместе с дождевой влагой или конденсатом, фиксируясь в клеточных стенках благодаря хелатированию органическими кислотами и дубильными веществами.

Таким образом, целью данной работы является установление характера зависимости сорбции тяжелых металлов сосной обыкновенной от степени загрязнения среды произрастания в условиях резко континентального климата и горно-котловинного расположения города Чита Забайкальского края.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования была использована кора сосны обыкновенной и образцы почвы, взятые на семи участках города Читы, которые различаются уровнем антропогенной нагрузки (рис. 1): участок № 1 — парк Пионеров (ул. Журавлёва); участок № 2 — парк Памяти (ул. Петровско-Заводская); участок № 3 — стадион СибВО (ул. Кайдаловская); участок № 4 — Батарейная сопка; участок № 5 — Сосновый бор; участок № 6 — Объездное шоссе; участок № 7 — ул. Гранитная.



Рис. 1. Карта отбора проб

Отбор материала осуществлялся в течение сезонов с весны 2024 года по зиму 2025 года. Пробы коры отбирались с 10–12 деревьев на каждой точке отбора. Верхний сухой слой отбрасывался, после чего находившийся под ним свежий слой аккуратно срезался ножом. Образцы почвы отбирали на расстоянии 1,5 метра от деревьев на глубине 10 см под поверхностью.

Пробы подвергались квартованию, сушке и измельчению до мелкозернистого состояния, после чего кора и почва обрабатывались термически в муфельной печи при 600 °С. Обожжённую почву и золу коры сосны обыкновенной исследовали по методикам, принятым в химии древесины [12], используя спектрометрический метод на атомно-абсорбционном спектрометре Shimadzu AA–6200. Подготовка проб для анализа на атомно-абсорбционном спектрометре включала взятие навески 5,00 г, её помещение в коническую колбу, смачивание водой и добавление 15 мл соляной химически чистой кислоты. Затем смесь кипятили в течение 2–3 минут, добавляли 5 мл 2М азотной химически чистой кислоты и доводили содержимое колбы до состояния сухих солей. После этого колбы снимали с плиты, добавляли 30 мл 5М соляной кислоты 1:1 и снова кипятили до получения сухих солей, затем снова добавляли HCl 1:1 и кипятили в течение 3 минут. Колбы оставляли остывать до комнатной температуры, затем доводили объем раствора до 200 мл и фильтровали через фильтры синяя лента. Получившийся фильтрат анализировали на приборах Shimadzu AA-6200 и Agilent 240 FS AA. Данные обрабатывались и заносились в таблицы, затем строились диаграммы с указанием ПДК в почве (ГН 2.1.7.2041–06). Кислотность определяли потенциометрическим методом в хлоридной вытяжке, используя 1М раствор KCl (pH = 6,0), а также стандартные буферные растворы (pH 4,01; 6,86; 9,18) для калибровки прибора. Суспензию готовили, добавляя к 30 г почвы 75 мл экстрагента, перемешивали в течение минуты и измеряли pH после стабилизации показаний. Параллельно проводили контрольный эксперимент без образца почвы.

Результаты исследования. В ходе работы была проведена оценка влажности и зольности коры сосны обыкновенной, а также влажности почвы. Повышение уровня влажности приводит к увеличению подвижности тяжелых металлов в почве и, как следствие, увеличивает их биологическую доступность для растений (таблицы 1–3).

Таблица 1

Сезонная динамика изменения влажности коры сосны обыкновенной в 2024 г., %

Участок отбора проб	Сезон года			Стандартное отклонение
	Весна	Лето	Осень	
Парк Пионеров	6,4	7,6	8,1	0,8737
Парк Памяти	5,9	7,3	7,9	1,0263
Стадион СибВО	8,3	9,1	10,1	0,9018
Батарейная сопка	10,2	11,3	12,6	1,2014
Сосновый бор	7,3	8,7	9,8	1,2530
Объездное шоссе	6,1	7,5	8,2	1,0693
Ул. Гранитная	8,5	9,2	10,3	0,9074

Таблица 2

Сезонная динамика изменения зольности коры сосны обыкновенной в 2024 г., %

Участок отбора проб	Сезон года			Стандартное отклонение
	Весна	Лето	Осень	
Парк Пионеров	6,7	7,1	6,9	0,2000
Парк Памяти	4,9	5,3	5,5	0,3055
Стадион СибВО	4,8	5,1	5,4	0,3000
Батарейная сопка	5,2	4,5	4,7	0,3606
Сосновый бор	4,9	4,7	5,2	0,2517
Объездное шоссе	3,9	4,2	4,3	0,2082
Ул. Гранитная	4,8	5,0	5,4	0,3055

Анализ полученных данных о влажности и зольности коры сосны показал, что в среднем она характеризуется низкой влажностью на всех участках, за исключением Батарейной сопки и ул. Гранитная. Это может быть обусловлено тем, что указанные участки расположены на некотором удалении от города, что позволяет им получать больше влаги и в меньшей степени терять её под воздействием солнечных лучей. Влажность немного увеличивается в течение года от зимы к осени, в то время как зольность находится примерно на одном уровне на протяжении всего года. Хотя зольность коры непосредственно не способна оказывать влияние на накопление тяжелых металлов, она может воздействовать на этот процесс косвенно, например, через соотношение органических и неорганических веществ в коре, что, в свою очередь, влияет на накопление тяжелых металлов растением [13].

Таблица 3

Сезонная динамика изменения влажности почвы в 2024 г., %

Участок отбора проб	Сезон года			Стандартное отклонение
	Весна	Лето	Осень	
Парк Пионеров	3,0	3,1	3,6	0,3215
Парк Памяти	2,1	2,3	2,5	0,2000
Стадион СибВО	1,7	1,8	2,1	0,2082
Батарейная сопка	2,4	2,5	3,0	0,3215
Сосновый бор	3,0	3,2	3,8	0,4163
Объездное шоссе	3,7	3,9	4,2	0,2517
Ул. Гранитная	2,6	2,7	3,1	0,2646

Согласно полученным данным, влажность почвы на данных участках имеет низкие показатели и совсем немного возрастает в летне-осенний период.

Также важным фактором сорбции тяжелых металлов из почвы является её кислотность. В исследуемом регионе наиболее распространены подзолистые почвы. Их тип предварительно оценивался по морфологическим признакам, таким как цвет и структура, что позволило выделить генетические горизонты. Анализируемые образцы отличались серо-коричневым цветом и наличием мелких агрегатов, что характерно для дерново-подзолистых почв с диапазоном pH 4–7.

Полученные данные представлены в таблице 4.

Таблица 4

Значения pH почвенных вытяжек

Места отбора проб	Значение pH
Парк Пионеров	6,3
Парк Памяти	5,5
Стадион СибВО	6,3
Батарейная сопка	4,9
Сосновый бор	5,3
Объездное шоссе	6,6
Ул. Гранитная	5,6

Проведённые исследования почвенного покрова Читы позволили выявить ряд интересных закономерностей. Особую озабоченность вызывают данные по следующим территориям — Батарейной сопке и Сосновому бору. Здесь зафиксированы аномально низкие значения pH, что для хвойных массивов выглядит особенно неожиданно. Анализ розы ветров и расположения промышленных объектов свидетельствует о том, что эти, казалось бы, естественные экосистемы фактически стали аккумуляторами техногенных загрязнений, поступающих от ТЭЦ, котельных и оживлённых автомагистралей. Стадион СибВО и Объездное шоссе показывают благополучные показатели. Для этих территорий характерны показатели кислотности в диапазоне 6,3–6,6 единиц pH, что согласуется с результатами морфологических исследований почвенного покрова и свидетельствует о его соответствии дерново-подзолистому типу. Улица Гранитная с её умеренно кислыми почвами представляет собой типичный пример урбанизированной территории с преобладанием транспортной нагрузки. Такие результаты требуют дополнительного изучения, особенно с учётом долговременной динамики и возможных последствий для городских экосистем.

При исследовании почвы [14] и коры сосны обыкновенной особое внимание уделялось следующим тяжёлым металлам: Cu, Zn, Pb. Каждому элементу соответствует своя лампа, излучающая свет с определенной длиной волны: медь — 324,7 нм, свинец — 283,3 нм, цинк — 213,9 нм. Полученные лабораторные данные отображены на рис. 2–7.

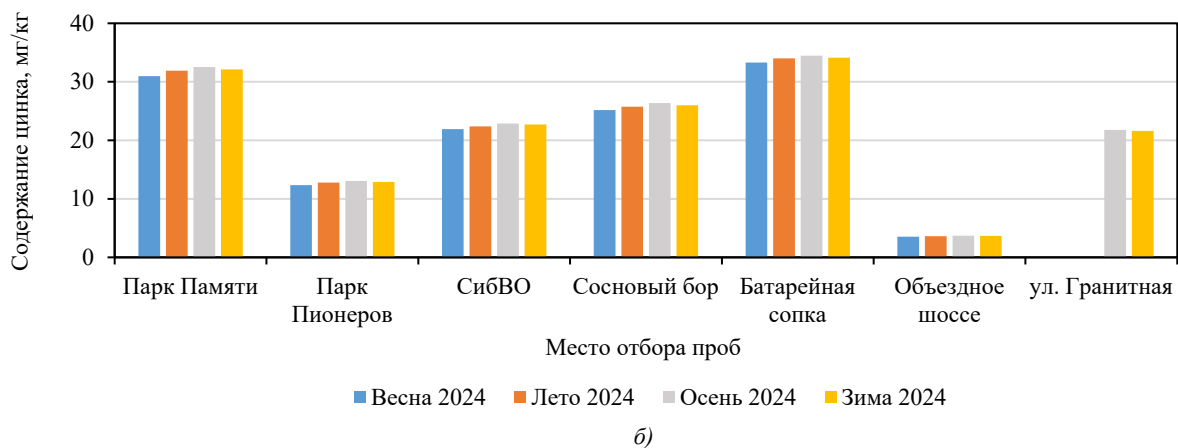
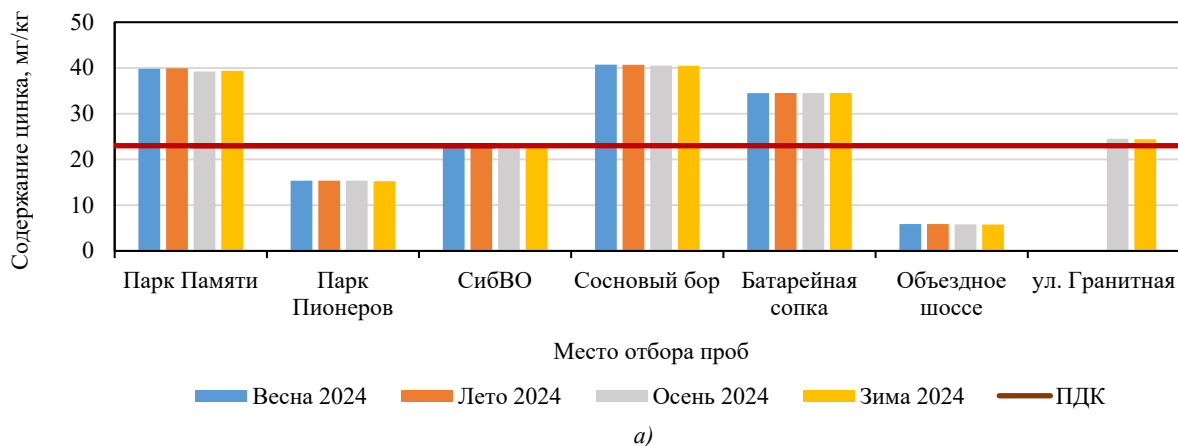


Рис. 2. Содержание цинка: а — в почве; б — в коре

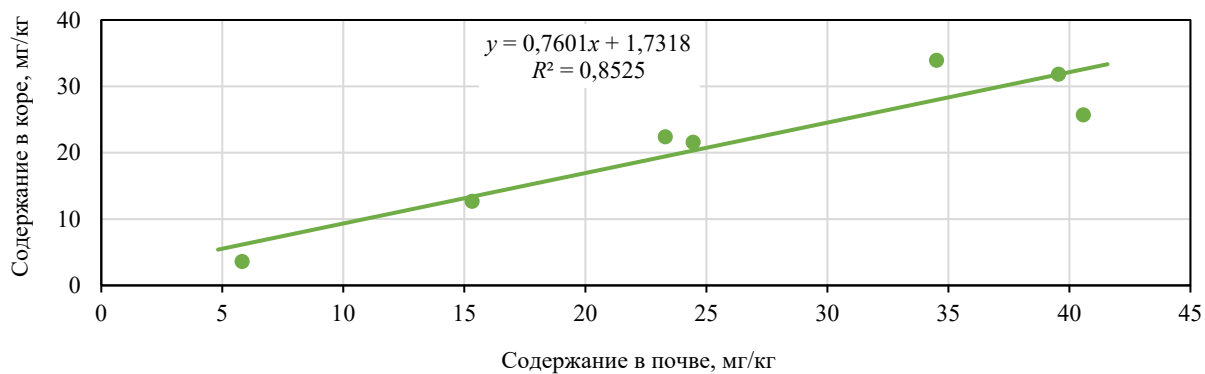
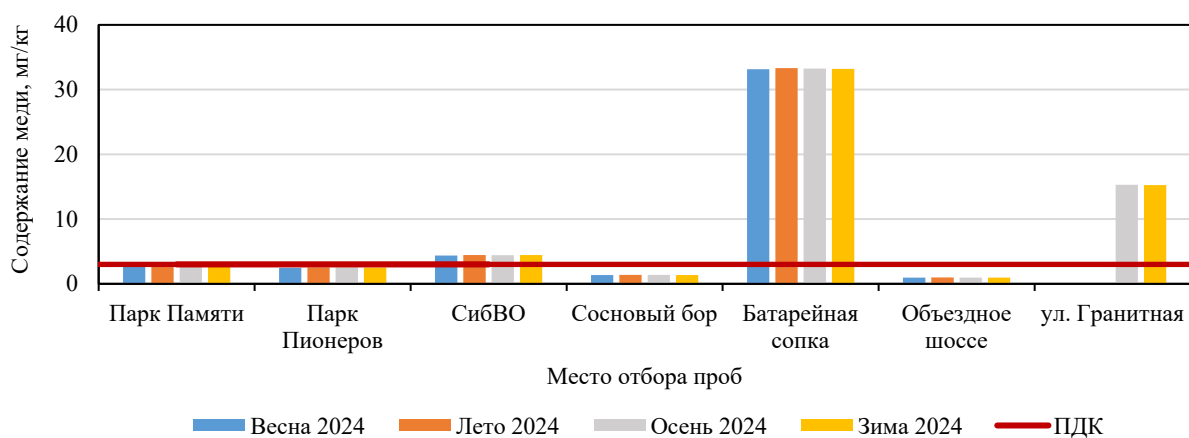
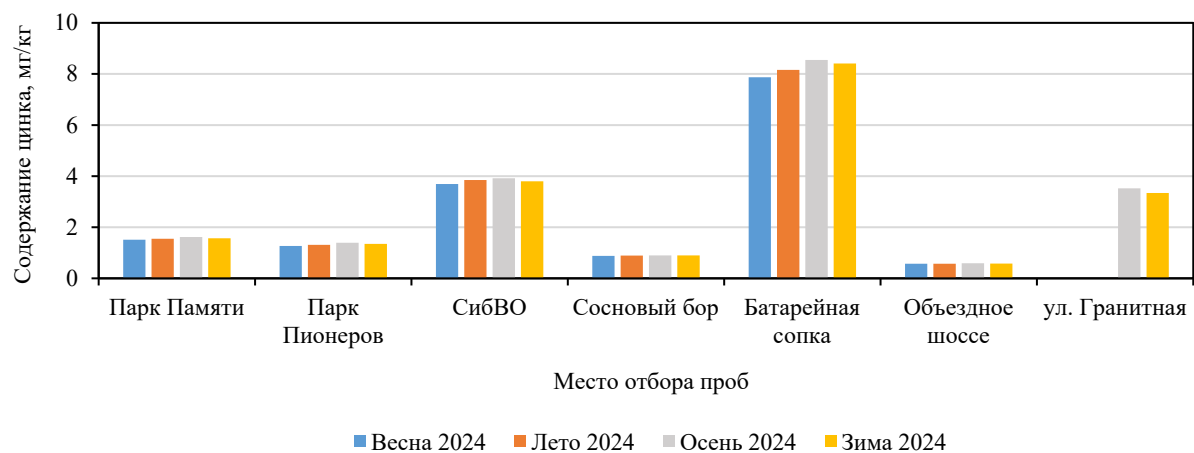


Рис. 3. Зависимость содержания цинка в почве и коре



а)



б)

Рис. 4. Содержание меди: а — в почве; б — в коре

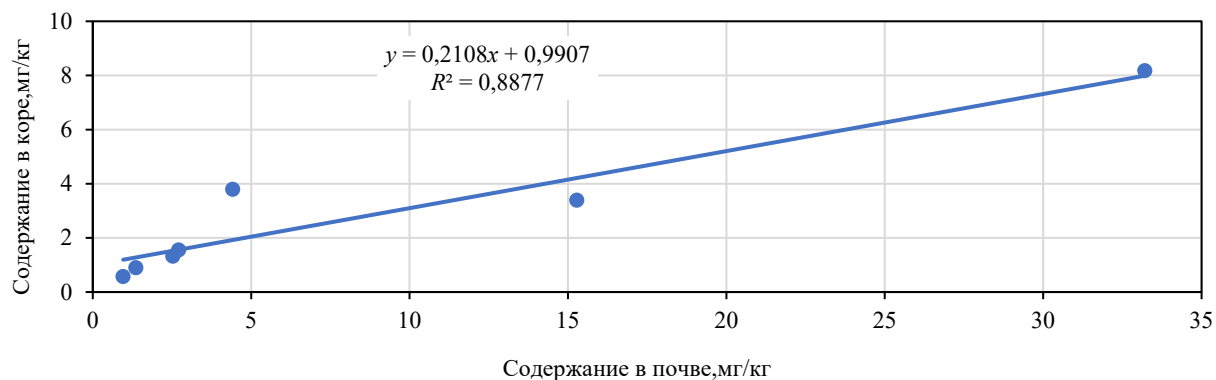
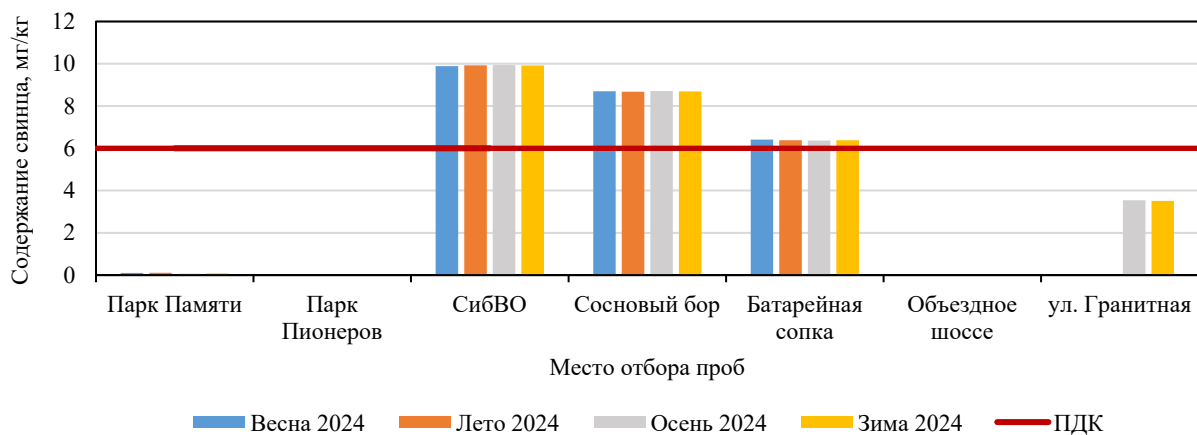
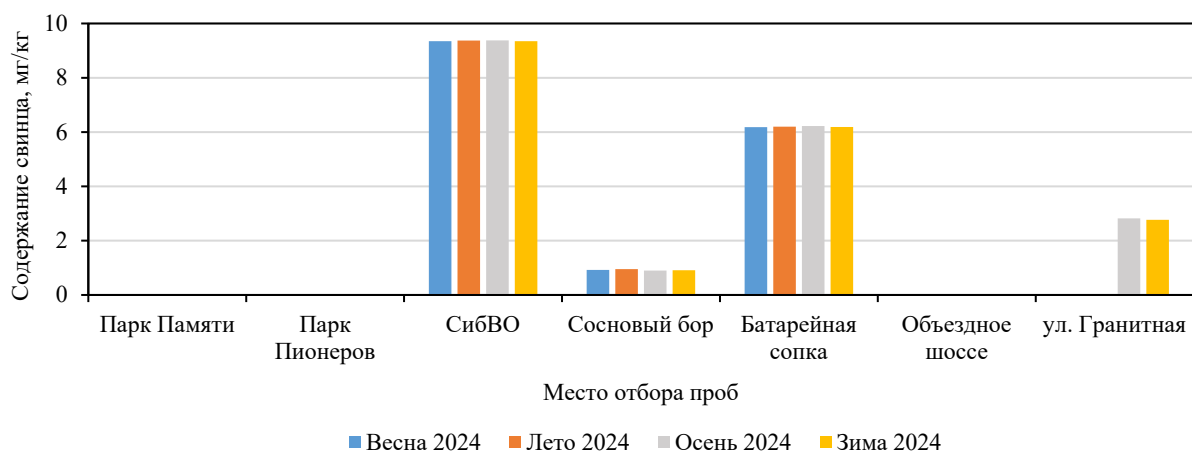


Рис. 5. Зависимость содержания меди в коре от содержания в почве



а)



б)

Рис. 6. Содержание свинца: а — в почве; б — в коре

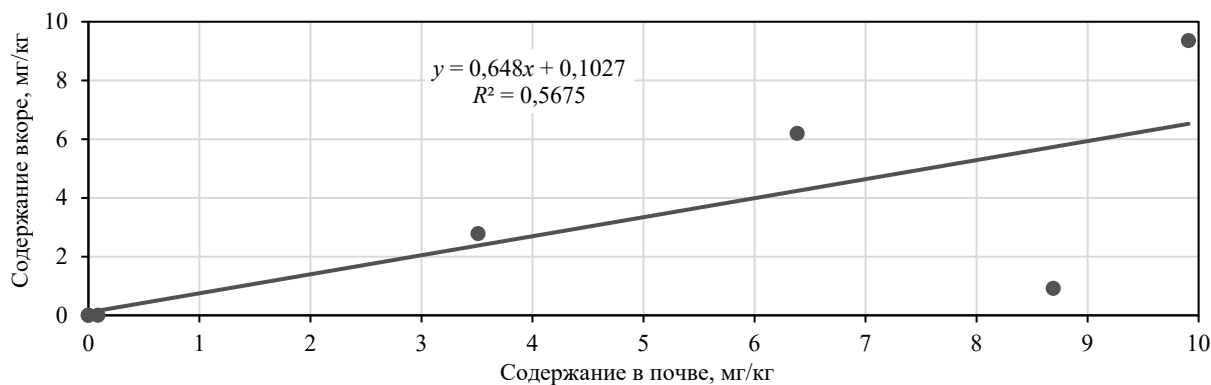


Рис. 7. Зависимость содержания свинца в коре от содержания в почве

Проанализировав полученные результаты, можно заметить, что содержание тяжелых металлов в коре сосны обыкновенной незначительно изменяется от весны к осени в сторону увеличения, тогда как в почве практически остается неизменным. Самое высокое загрязнение почвы наблюдается на участках Батарейной сопки, Соснового Бора, Парка Памяти, ул. Гранитной и СибВО. Анализ позволил выявить зависимость содержания тяжелых металлов в почве и коре сосны обыкновенной от уровня антропогенной нагрузки на соответствующих участках.

В ходе исследований было установлено высокое содержание меди в почве на участке Батарейной сопки, превышающее ПДК в 11 раз. Это может быть обусловлено близким расположением автомастерских и автомобильных дорог, сточные воды с которых могут содержать повышенное количество тяжелых металлов. Участок № 4 характеризуется высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха, так как расположен на подветренной стороне относительно Читинской ТЭЦ-2. В пробах, отобранных в районе ул. Гранитной и стадиона СибВО, содержание меди в почве превышает ПДК в 5 и 1,5 раза соответственно. На остальных участках содержание меди находится в пределах санитарных норм.

Высокое содержание цинка в почве наблюдается сразу в трех точках: Сосновый Бор, Парк Памяти и Батарейная сопка с превышением ПДК в 1,77; 1,74 и 1,5 раза соответственно. Далее выявлено небольшое превышение ПДК в зоне СибВО и ул. Гранитной, на остальных участках показатели находятся в пределах норм. Содержание свинца в почве превышает ПДК в точках СибВО — в 1,6 раз, Сосновый Бор — в 1,45 раз и на Батарейной сопке. В районах Парка Памяти, Парка Пионеров и Обьездного шоссе содержание свинца не обнаружено.

Превышение ПДК по свинцу объясняется негативным воздействием предприятий энергетики и автотранспорта. Так, в зольных уносах на ТЭЦ-2 после сжигания углей содержание свинца на 50–60 % выше порога токсичности. Ветер разносит токсичную пыль с золошлакоотвалов по всем прилегающим участкам [15]. Высокие значения содержания свинца в почве также обусловлены тем, что свинец медленно выводится из почвы — скорость вымывания в разных видах колеблется между значениями 4 и 30 г/га в год — что приводит к повышению его концентрации, особенно в местах с близким расположением автомобильных трасс.

Сезонных изменений содержания тяжелых металлов в почве не наблюдается. В коре было замечено небольшое колебание содержания ТМ, а именно постепенное увеличение от весны к осени и незначительное снижение зимой и весной, что может быть связано с периодом вегетации.

На участке Сосновый Бор содержание свинца в коре почти не обнаружено. Такое несоответствие общей картине может быть объяснено тем, что свинец в почвах с высоким содержанием гумуса прочно связывается [16] с органическим веществом, а также образует фосфаты и карбонаты, становясь практически недоступным для растений. Наряду с этим, на усвоение тяжелых металлов растениями влияет ионный состав почвы. Например, присутствие конкурирующих ионов Ca^{2+} и Al^{3+} может подавлять поглощение свинца корнями [17]. В почвах с повышенным содержанием этих элементов поступление Pb^{2+} в растения снижается, в то время как цинк и медь [18], благодаря специализированным транспортным механизмам, продолжают активно накапливаться.

Самым чистым участком в этом исследовании оказалось Обьездное шоссе, поскольку место отбора проб в данном случае было удалено от источников загрязнения.

Обсуждение. Результаты исследования выявили значительное загрязнение почв тяжелыми металлами (Pb, Zn, Cu) на ряде участков города. Наибольшие превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) зафиксированы на Батарейной сопке (медь — в 11 раз, цинк — в 1,5 раза), улице Гранитной (медь — в 5 раз) и в районе стадиона СибВО (свинец — в 1,6 раза). Эти данные свидетельствуют о высокой антропогенной нагрузке, обусловленной близостью промышленных предприятий, транспортных магистралей и исторически сложившимися источниками загрязнения, такими как свалки и котельные. При этом сезонные колебания содержания тяжелых металлов в почве оказались незначительными, что указывает на хронический характер загрязнения.

Особое внимание в работе уделено влиянию котловинного расположения города Чита на экологическую ситуацию. Горно-котловинный рельеф способствует накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы и почве, ограничивая их естественное рассредоточение. Это усугубляется преобладающими природно-климатическими условиями, такими как резко-континентальный климат с низким уровнем осадков, что усиливает концентрацию поллютантов. Результаты исследования подтвердили, что данные факторы создают неблагоприятные условия для естественного самоочищения экосистем, особенно в зонах с высокой антропогенной нагрузкой.

Важным аспектом исследования стало изучение влияния кислотности почвы на подвижность и аккумуляцию тяжелых металлов. Установлено, что в кислых почвах (pH 4,9–5,6), таких как участки Батарейной сопки и Соснового бора, повышается доступность металлов для растений, что способствует их накоплению в коре сосны. В то же время нейтральные и слабощелочные почвы (pH 6,3–6,6) демонстрировали меньшую подвижность тяжелых металлов, что снижало их биологическую доступность. Эти данные подчеркивают необходимость учета pH при оценке рисков загрязнения и разработке ремедиационных мероприятий.

Таким образом, сосна обыкновенная представляет собой ценный объект для мониторинга загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами в условиях резко-континентального климата и котловинного расположения города Чита, сочетая в себе высокую чувствительность к техногенному воздействию, устойчивость к неблагоприятным условиям и долговременную способность накапливать токсины, тем самым выводя их из круговорота веществ. Полученные данные обосновывают целесообразность включения этого вида в системы экологического контроля, особенно в регионах с развитой промышленностью и транспортной инфраструктурой. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку стандартизированных методик использования сосны в биоиндикации, а также на изучение её фиторемедиационного потенциала в условиях хронического загрязнения.

Заключение. Результаты проведенного исследования показали, что в городе Чита наблюдается высокий уровень загрязнения почв тяжелыми металлами. Они, в свою очередь, аккумулируются растениями, что позволяет временно выводить вредные соединения из круговорота веществ и снижать их негативное влияние на природу. Анализ полученных результатов подтверждает выводы других исследователей [19] о том, что сорбция тяжелых металлов в компонентах окружающей природной среды напрямую зависит от близости расположения и степени интенсивности вредного воздействия источника негативного влияния на окружающую природную среду [20].

Кора сосны, будучи пассивным, но эффективным накопителем тяжёлых металлов, заслуживает особого внимания в стратегиях фиторемедиации городских территорий. Её способность длительно удерживать загрязнители без существенного ущерба для жизнедеятельности дерева делает этот вид ценным компонентом защитных посадок вдоль транспортных артерий. Однако для максимальной эффективности необходимо учитывать динамику накопления, пространственное распределение металлов и разрабатывать методы безопасного удаления и переработки загрязнённой коры, чтобы исключить её возврат в биогеохимический цикл.

Проведённое исследование расширяет понимание механизмов миграции и аккумуляции тяжёлых металлов в урбанизированных экосистемах, особенно в условиях резко-континентального климата. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации городского планирования, минимизации негативного воздействия на здоровье населения и разработки стратегий устойчивого развития территорий с высокой антропогенной нагрузкой.

Список литературы / References

1. Дубровина О.А., Зубкова Т.В., Масина Т.А., Виноградов Д.В., Гогмачадзе Г.Д. Аккумуляция свинца и кадмия в вегетативных органах *Betula Pendula*, *Tilia Cordata* L., *Populus Pyramidalis* в городских парках г. Ельца, г. Задонска, г. Лебедяни Липецкой области. *АгроЭкоИнфо*. 2024;4(64):1–13. <https://doi.org/10.51419/202144416>

Dubrovina O, Zubkova T, Masina T, Vinogradov D, Gogmachadze G. Accumulation of Lead and Cadmium in Vegetative Organs of *Betula Pendula*, *Tilia Cordata* L., *Populus Pyramidalis* in Urban Parks of Yelets, Zadonsk, Lebedyan, Lipetsk Region. *AgroEcoInfo*. 2024;4(64):1–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.51419/202144416>

2. Зубаиров Р.Р., Мустафин Р.Ф., Одинцов Г.Е. Содержание элементов первого класса опасности в почвах и древесине на водосборе реки Большая Балыклы. В: *Сборнике статей III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, приуроченной к 80-летию агрономического факультета Алтайского государственного аграрного университета «Перспективы внедрения инновационных технологий в АПК»*, Барнаул, 22 ноября 2023 года. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет; 2023. С. 203–207.

Zubairov RR, Mustafin RF, Odintsov GE. The Content of Elements of the First Hazard Class in Soils and Wood in the Catchment Area of the Bolshaya Balykly River. In: *Prospects for the Introduction of Innovative Technologies in Agriculture: Proceedings of the III All-Russian (National) Scientific and Practical Conference with International Participation, Dedicated to the 80th Anniversary of the Faculty of Agronomy of Altai State Agrarian University, Barnaul, November 22, 2023*. Barnaul: Altai State Agrarian University; 2023. P. 203–207. (In Russ.)

3. Гюльбяков Н.Р., Давыдова С.А., Гюльбякова Х.Н. Изменение числовых показателей и содержания дубильных веществ в коре липы мелколистной в зависимости от места произрастания. В: *Сборнике научных трудов «Разработка, исследование и маркетинг новой фармацевтической продукции»*. Том Выпуск 76. Пятигорск: Рекламно-информационное агентство на Кавминводах; 2021. С. 24–29.

Gyul'byakov NR, Davydova SA, Gyul'byakova KhN. Changes in the Numerical Parameters and Content of Tannins in the Bark of Small-Leaved Linden Depending on the Place of Growth. In: *Collection of Scientific Papers "Development, Research and Marketing of New Pharmaceutical Products"*. Pyatigorsk: Advertising and Information Agency on Kavminvody; 2021. P. 24–29. (In Russ.)

4. Ветчинникова Л.В., Кузнецова Т.Ю., Титов А.Ф. Особенности накопления тяжелых металлов в листьях древесных растений на урбанизированных территориях в условиях Севера. *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2013;(3):68–73.

Vetchinnikova LV, Kuznetsova TYu, Titov AF. Patterns of Heavy Metal Accumulation in Leaves of Trees in Urban Areas in the North. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2013;(3):68–73. (In Russ.)

5. Чураков Б.П., Зырянова У.П., Загидуллин Р.А., Парамонова Т.А., Митрофанова Н.А., Михеева А.В. Динамика накопления тяжелых металлов в трофических цепях лесных экосистем. *Ульяновский медико-биологический журнал*. 2024;(1):105–114. <https://doi.org/10.34014/2227-1848-2024-1-105-114>

Churakov BP, Zyryanova UP, Zagidullin RA, Paramonova TA, Mitrofanova NA, Mikheeva AV. Dynamics of Heavy Metal Accumulation in Trophic Levels of Forest Ecosystems. *Ulyanovsk Medico-Biological Journal*. 2024;(1):105–114. (In Russ.) <https://doi.org/10.34014/2227-1848-2024-1-105-114>

6. Петухов А.С., Кремлева Г.А., Петухова Г.А., Хритохин Н.А. Аккумуляция и миграция тяжелых металлов в почвах и растениях в условиях антропогенного загрязнения городской среды. *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2022;(3):53–66. <https://doi.org/10.17076/eco1342>

Petukhov AS, Kremleva GA, Petukhova GA, Khritokhin NA. Heavy Metal Accumulation and Migration in Soils and Plants under Contamination in Urban Environments. *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022;(3):53–66. <https://doi.org/10.17076/eco1342>

7. Кравцов В.Н. Содержание тяжёлых металлов в листьях и хвое древесных растений, произрастающих на территории Дальневосточного высшего общевойскового командного училища. В: *Труды XXIII региональной научно-практической конференции «Молодёжь XXI века: шаг в будущее», Благовещенск, 24 мая 2022 года.* Том 4. Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет; 2022. С. 253–255.

Kravtsov VN. The Content of Heavy Metals in the Leaves and Conifers of Woody Plants Growing on the Territory of the Far Eastern Higher Combined Arms Command School. In: *Proceedings of the 23d Regional Scientific and Practical Conference “Youth of the 21st Century: A Step into the Future”, Blagoveshchensk, May 24, 2022.* Vol. 4, Blagoveshchensk: Far Eastern State Agrarian University; 2022. P. 253–255. (In Russ.)

8. Копылова Л.В. Накопление тяжёлых металлов *Caragana arborescens* Lam. в условиях антропогенного воздействия (Забайкальский край). *Ученые записки Забайкальского государственного университета.* 2017;12(1):20–25.

Kopylova LV. Accumulation of Heavy Metals *Caragana Arborescens* Lam. In the Conditions of Anthropogenic Influence (Zabaikalsky Krai). *Scholarly Notes of Transbaikial State University.* 2017;12(1):20–25. (In Russ.)

9. Сайдышева Г.В., Захаров С.А. Результаты мониторинга содержания тяжелых металлов в почве, растениях и снежном покрове вблизи автомобильных трасс на различном удалении от города Ульяновска. *Вестник Казанского государственного аграрного университета.* 2023;17(4):45–49. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-45-49>

Saidyasheva GV, Zakharov SA. The Results of Monitoring the Content of Heavy Metals in Soil, Plants and Snow Cover near Highways Selected Can Be Removed at Various Distances from the City of Ulyanovsk. *Vestnik of Kazan State Agrarian University.* 2023;17(4):45–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-45-49>

10. Гаврилова А.А., Макарова Е.И., Ахтямов Р.Г. Аккумуляция тяжелых металлов в почвах и фитомассе на урбанизированных территориях. *Известия Петербургского университета путей сообщения.* 2023;20(3):706–714. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2023-3-706-714>

Gavrilova AA, Makarova EI, Akhtyamov RG. Accumulation of Heavy Metals in Soils and Phytomass in Urbanized Areas. *Proceedings of Petersburg Transport University.* 2023;20(3):706–714. (In Russ.) <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2023-3-706-714>

11. Соболева С.В., Ченцова Л.И., Почекутов И.С. Исследование накопления тяжелых металлов в почве и коре тополя на территории Красноярск. *Вестник КрасГАУ.* 2013;9(84):122–126. <https://kgau.editorum.ru/ru/storage/viewWindow/146397> (дата обращения: 11.04.2025).

Soboleva SV, Chentsova LI, Pochekutov IS. The Research of the Heavy Metal Accumulation in the Soil and Poplar Bark in the Krasnoyarsk City Territory. *Bulletin of KSAU.* 2013;9(84):122–126. (In Russ.) <https://kgau.editorum.ru/ru/storage/viewWindow/146397> (accessed: 11.04.2025).

12. Кашина Е.М., Малков А.В., Боголицын К.Г. Определение содержания тяжелых металлов в древесине методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал.* 2011;(6):140–143.

Kashina EM, Malkov AV, Bogolitsyn KG. Determination of Heavy Metal Content in Wood by X-Ray Fluorescence Spectroscopy. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal.* 2011;(6):140–143. (In Russ.)

13. Chichigina Y, Shigabaeva G, Emelyanova E, Galunin E, Yakimov A, Isaev A, Bekker M. Heavy Metal Contents in the Tyumen City Residential Area Soils. *Journal of Advanced Materials and Technologies.* 2023;8(2):141–156. <https://doi.org/10.17277/jamt.2023.02.pp.141-156>

14. Vedernikov K, Zagrebina E, Bukharina I. Specific Nature of the Biochemical Composition of Spruce Wood from the Forest Stands Exposed to Drying out in European Russia. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty.* 2020;20(3):208–219. <https://doi.org/10.17475/kastorman.849461>

15. Menahem Edelstein, Meni Ben-Hur. Heavy Metals and Metalloids: Sources, Risks and Strategies to Reduce Their Accumulation in Horticultural Crops. *Scientia Horticulturae.* 2018;234:431–444. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.039>

16. Kočevár Glavač N, Mračević SD, Ražić SS, Kreft S, Veber M Accumulation of Heavy Metals from Soil in Medicinal Plants. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology.* 2017;68(3):236–244. <https://doi.org/10.1515/aiht-2017-68-2990>

17. Konstantinova E, Minkina T, Konstantinov A, Sushkova S, Antonenko E, Kurasova A, et al. Pollution Status and Human Health Risk Assessment of Potentially Toxic Elements and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Street Dust of Tyumen City, Russia. *Environmental Geochemistry and Health.* 2020;44:409–432. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00692-2>

18. Stepanova NV, Fomina SF, Valeeva ER, Ziyatdinova AI. Heavy Metals as Criteria of Health and Ecological Well-Being of the Urban Environment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology;* 2018;50:646–651. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.05.015>

19. Dyomina EB, Savchenkova VA. The Content of Heavy Metals in Soils and Leaves of Silver Birch Plantations (Moscow). *Russian Forestry Journal;* 2024;4(400):37–48. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-37-48>

20. Tsegay MK, Sukhenko LT. Pilot Survey of Three Soil Heavy Metals at Abandoned Industrial Farmland, and Determination of Its Potential Health Risk. *International Journal of Humanities and Natural Sciences;* 2023;10–1(85):23–30. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-10-1-23-30>

Об авторах:

Татьяна Викторовна Турушева, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Техносферная безопасность» Забайкальского государственного университета (672039, Российская Федерация, г. Чита, ул. Александровская, д. 30), [SPIN-код](#), [ORCID](#), turusheva_tanya@mail.ru

Вячеслав Евгеньевич Есипов, магистрант, кафедра «Техносферная безопасность» Забайкальского государственного университета (672039, Российская Федерация, г. Чита, ул. Александровская, д. 30), slavel.chapp@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Т.В. Турушева: научное руководство, разработка концепции.

В.Е. Есипов: проведение исследования.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Tatyana V. Turusheva, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technosphere Safety, Transbaikal State University (30, Aleksandro-Zavodskaya Str., Chita, 672039, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), turusheva_tanya@mail.ru

Vyacheslav E. Esipov, Master's Degree Student of the Department of Technosphere Safety, Transbaikal State University (30, Aleksandro-Zavodskaya Str., Chita, 672039, Russian Federation), slavel.chapp@gmail.com

Claimed Contributorship:

TV Turusheva: supervision, conceptualization.

VE Esipov: investigation.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 28.05.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 14.06.2025

Принята к публикации / Accepted 02.07.2025