



Серия «Науки о Земле»
2023. Т. 46. С. 93–113
Онлайн-доступ к журналу:
<http://izvestiageo.isu.ru/ru>

ИЗВЕСТИЯ
Иркутского
государственного
университета

Научная статья

УДК 504.05:581.151(470.322)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.46.93>

Геоэкологическая оценка загрязнения окружающей среды по биогеохимическим параметрам древесных растений (на примере г. Липецка)

М. А. Клевцова, В. А. Седых*

Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. Дана геоэкологическая оценка территории г. Липецка с использованием некоторых биогеохимических параметров вида-индикатора – тополя итальянского (*Populus italica* (Du Roi) Moench). В летний период 2022–2023 гг. были отобраны образцы корки тополя, произрастающего в экологических условиях с разной степенью техногенной нагрузки, и определены их кислотность, зольность и элементный состав. Подобного рода исследования для данной территории ранее не проводились. В связи с наличием предприятия высокой степени экологической опасности (Новолипецкого металлургического комбината) проведение мониторинга состояния окружающей среды методами биоиндикации имеет практическую значимость. Выявлены увеличение кислотности корки тополя в сторону подщелачивания на рассматриваемой территории города по сравнению с фоновым участком и зоной рекреации и наращение зольности корки в местах повышенного техногенного воздействия, преимущественно промышленно-транспортных узлах. Получен ряд убывания концентрации некоторых химических элементов: $\text{Ca} > \text{Fe} > \text{Al} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Ti} > \text{Sr} > \text{Cu}$. Высокое содержание цинка и железа отмечено вблизи промышленных площадок указанного предприятия. Таким образом, отмечена закономерность: увеличение ряда биогеохимических показателей у древесных растений в зонах с повышенной техногенной нагрузкой.

Ключевые слова: загрязнение, окружающая среда, древесные растения, тяжелые металлы, техногенное воздействие.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-17-00172, <https://rscf.ru/project/20-17-00172/>.

Для цитирования: Клевцова М. А., Седых В. А. Геоэкологическая оценка загрязнения окружающей среды по биогеохимическим параметрам древесных растений (на примере г. Липецка) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2023. Т. 46. С. 93–113. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.46.93>

Original article

Geocological Assessment of Environmental Pollution by Biogeochemical Parameters of Ligneous Plants (on the Example of the Lipetsk City)

М. А. Klevtsova, V. A. Sedykh*

Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

© Клевцова М. А., Седых В. А., 2023

* Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.
For complete information about the authors, see the last page of the article.

Abstract. To conduct a geoecological assessment of the territory of the Lipetsk city, biogeochemical parameters of woody plants were used. *Populus italica* (Du Roi) Moench, growing in different ecological conditions, acted as an indicator species. Sampling of poplar bark was carried out at 21 points, including the background one. The laboratory determined the following biogeochemical parameters: acidity, ash content, content of chemical elements. During the summer period 2022–2023 samples were taken and analyzed. According to the data obtained, the pH of the aqueous extract of the samples varied from 5.05 to 7.74 for different sampling points, the average value being 6.98. We have established a change in the hydrogen index of the Italian poplar bark towards alkalization. The maximum increase in pH was recorded in the area of the cement plant (7.74), as well as on the left bank, where Novolipetsk metallurgical plant production facilities are concentrated. The lowest indicator of acidity of the crust is typical for the recreational zone of park areas – 5.05. The ash content of Italian poplar peel in the territory of Lipetsk varied from 10.42 to 21.44%. We noted the minimum ash content in the Nizhny Park, the maximum parameter was recorded in the immediate vicinity of the Novolipetsk metallurgical plant production sites and in the zone of influence of the cement plant. Determining the amount of chemical elements in the *Populus italica* bark by the X-ray fluorescence method made it possible to establish a number of regularities. The selected samples have a high level of accumulation for a number of heavy metals. Copper was found at 11 points. In terms of manganese, the highest content was recorded in a sample of Italian poplar bark on the street. Diamond (330 mg/kg). At all points, with the exception of the Nizhniy park, there is an excess of background values. The concentration of zinc in almost all samples is high, more than 80 mg/kg, especially trees in the industrial and transport zone have elevated values of the indicator. The content of iron at all points in the territory of Lipetsk exceeds the background values (1.04 g/kg). The presence and high content of a number of chemical elements in the Italian poplar bark is explained by the fact that in addition to carbon, sulfur, nitrogen oxides, the composition of emissions from blast-furnace, sintering production, ferroalloys includes a large amount of dust containing particles of Fe, Cu, Ti, Zn, Pb, Cr and other heavy metals. A moderate correlation was established between the content of iron-titanium ($r \pm m_r = 0.48 \pm 0.20$) and iron-zinc ($r \pm m_r = 0.47 \pm 0.20$) in the Italian poplar bark. A high level correlation was recorded between the concentrations of iron and manganese ($r \pm m_r = 0.80 \pm 0.14$). Therefore, the use of tree bark to assess environmental pollution is a sensitive method that is used for geoecological monitoring.

Keywords: pollution, environment, ligneous plants, heavy metals, anthropogenic impact.

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Science Foundation grant № 20-17-00172, <https://rscf.ru/project/20-17-00172/>.

For citation: Klevtsova M.A., Sedykh V.A. Geoecological Assessment of Environmental Pollution by Biogeochemical Parameters of Ligneous Plants (on the Example of the Lipetsk City). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2023, vol. 46, pp. 93–113. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.46.93> (in Russian)

Введение

В настоящее время в связи с возрастающими процессами урбанизации и развития производственного комплекса одним из важнейших вопросов является экологическое состояние городской среды обитания. Эмиссия загрязняющих веществ промышленных предприятий и высокая транспортная нагрузка обуславливают создание неблагоприятных условий как для отдельных природных компонентов, так и состояния окружающей среды в целом. Интенсивное техногенное воздействие в городах служит потенциальным фактором риска для всех живых организмов на такой территории. В особенности данная проблема характерна для промышленных центров, где на сравнительно небольшой территории формируется высокая концентрация стационарных и передвижных источников загрязнения. Одним из таких городов является Липецк.

Город Липецк – крупный промышленный, административный и экономический центр Центрального Черноземья. Промышленная структура областного центра представлена различными предприятиями: металлургической, машиностроительной, химической, строительной, энергетической и коммунальной сферы. В 2021 г. валовая эмиссия загрязняющих веществ от стационарных источников составила 271,5 тыс. т¹.

Основной промышленной специализацией города является черная металлургия с полным производственным циклом. На территории Липецка расположен один из крупнейших в Российской Федерации металлургических комбинатов – ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (далее – НЛМК), включающий в себя полный спектр металлургического и сопутствующих производств. На НЛМК приходится основная часть всех выбросов загрязняющих веществ с показателем 266 тыс. т в 2021 г.², что составляет порядка 98 % от общей валовой эмиссии города. Также к относительно крупным предприятиям металлургической отрасли относится ЛТК «Свободный сокол» (295 т/год).

Помимо металлургии к важным источникам загрязнения окружающей среды относятся предприятия: АО «Липецкцемент» (7,4 тыс. т/год), ООО «Липецкий механический завод» (30 т/год), Липецкая ТЭЦ-2 (1,9 тыс. т/год), МУП «Липецкая станция аэрации» (176 т/год), ООО «Липецкий силикатный завод» (48 т/год). Также к юго-восточной границе города прилегает Особая экономическая зона федерального значения «Липецк», на территории которой сконцентрировано более 60 резидентов, наиболее крупным из которых является предприятие по производству стекла ООО «ЧСЗ-Липецк» (618 т/год).

Конфигурация размещения промышленности на территории Липецка имеет явно выраженное промышленное ядро, расположенное в левобережной части города и представленное, главным образом, производственной площадкой НЛМК. Также здесь располагаются и все другие наиболее крупные предприятия, за исключением «Липецкцемент». Правобережная часть, напротив, представлена жилыми и административными районами.

Важным источником загрязнения, помимо стационарных, является автомобильный транспорт, на долю которого приходится порядка 13 % т³. Разветвленная улично-дорожная сеть приурочена к правобережным районам и характеризуется участками, где наблюдается образование транспортных заторов. К таким относятся просп. Победы, ул. Советская, ул. Первомайская, Товарный проезд, ул. Московская, ул. Циолковского. В левобережной части города улично-дорожная сеть имеет меньшую нагрузку, где основной магистралью является просп. Мира. В данных локациях нагрузка транспортных средств в сутки может достигать до 20 тыс. ед. Причем рост интенсивности движения в часы пик может увеличиваться в 1,5–2 раза, а средняя скорость движения в такие периоды способна падать до 15 км/ч.

¹ Доклад «Состояние и охрана окружающей среды Липецкой области в 2021 году». Липецк : Упр. экологии и природ. ресурсов Липец. области, 2022. 128 с.

² Там же.

³ Там же.

Основными загрязняющими веществами в г. Липецке являются оксид углерода, диоксид серы, оксиды азота, на которые приходится более 90% общей эмиссии. Однако не менее важную роль играют и специфические вещества, доля которых не велика, но весомо значение общетоксикологических свойств таких поллютантов. К загрязняющим веществам в г. Липецке относятся бенз(а)пирен, фенол, формальдегид, сероводород, а также оксиды тяжелых металлов. Эмиссия последнего связана, главным образом, с металлургической отраслью. На территориях, прилегающих к главным источникам сероводорода, фиксируются превышения концентраций данного поллютанта в атмосферном воздухе до 9,5 ПДК.

Проведение мониторинговых работ на территории крупных промышленных центров является весьма актуальным направлением. При этом в большинстве случаев используют инструментальные методы исследования, что не позволяет увидеть полную картину комплексного влияния техногенных источников загрязнения. В связи с этим существенный интерес представляют работы по оценке экологического состояния древесных растений под влиянием стрессоров урбанизированной среды. Для диагностики используют разные биоиндикационные показатели, среди которых представляют интерес такие параметры коры деревьев, как зольность, кислотность, содержание тяжелых металлов.

В отечественной литературе приводятся результаты многолетних исследований по изучению указанных индикационных признаков городов Биробиджана [Калманова, 2005], Красноярска [Соболева, Ченцова, Почекутов, 2011], Санкт-Петербурга [Экологический мониторинг загрязнения ... , 2011], Читы [Лескова, Копылова, Якимова, 2013], Петрозаводска и Кондопоги [Кузнецова, Ветчинникова, Титов, 2015], для Екатеринбурга [Veselkin, 2023], а также Самарской области [Иржигитова, Каратаева, Корчиков, 2009], Кольского полуострова [Поглощение макроэлементов ... , 2008] и ряда других.

Зарубежные ученые также неоднократно рассматривали данные вопросы в своих трудах, проводя исследования в пределах разных регионов и стран мира – на территории Польши [Grodzińska, 1977], Нидерландов [Kuik, Wolterbeek, 1994], Иордании [Cypress tree ... , 2002], Эстонии [Marmor, Randle, 2007], Англии [Mapping aerial metal ... , 2008], Турции [Bingöl, Geven, Güney, 2008], Аргентины [Use of tree ... , 2011], Ирана [Kord, Kord, 2011], Нигерии [Ejidike, Onianwa P., 2015], Таиланда [Levels of road ... , 2016], Италии [Tree barks as ... , 2017], Словакии [Accumulation of heavy ... , 2017], Китая [Zhang, Xiang, Chen, 2019], Казахстана [Ишимова, 2012], Беларуси [Высотное распределение зольности..., 2016].

Для г. Липецка подобная проблематика затрагивается в работах О. В. Поповой, А. И. Федоровой [2005], А. В. Знаменщиковой [2008]. Так, О. В. Попова и А. И. Федорова отмечают, что накопление тяжелых металлов (Pb, Cu, Cd, Zn) в листовых пластинках клена платанолистного зависит от дальности произрастания от Новолипецкого металлургического комбината. Авторы констатируют, что влияние производства распространяется на расстоянии более 60 км, что проявляется также и в повреждениях листьев [Попова, Федорова, 2005].

А. В. Знаменщикова указывает на зависимость содержания тяжелых металлов в почвенном покрове и накопление их в листовых пластинках. При этом наблюдается и увеличение показателя зольности листьев, что особенно прослеживается для таких видов, как *Acer negundo* L, *Acer platanoides* L., которые проявляют тенденцию к повышению содержания зольных элементов при произрастании в условиях техногенного загрязнения на территории г. Липецка [Знаменщикова, 2008].

Таким образом, на основе анализа теоретических и практических источников нами поставлена цель по геоэкологической оценке территории г. Липецка с использованием отдельных биогеохимических параметров деревьев вида-индикатора – тополя итальянского (*Populus italica* (Du Roi) Moench). В связи с тем, что исследования коры древесных растений на данной территории не проводились ранее, именно заявленный растительный материал послужил объектом геоэкологической оценки. Распространение загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников прослеживается в разных функциональных зонах г. Липецка. Поэтому зонирование точек отбора по типу использования территории является условным. Так, например, промышленные зоны часто сочетают как собственно производственные участки, так и транспортные узлы, что свидетельствует о явном наличии синергетического эффекта загрязняющих веществ.

Объект и методы исследования

Для определения биогеохимических параметров древесной коры в летний период 2022 г. и июне 2023 г. были отобраны образцы корки тополя итальянского (*Populus italica* (Du Roi) Moench) в 21 точке, определенных с целью наиболее полного охвата территории г. Липецка (табл. 1). Предварительно было проведено обследование города для выявления видового состава зеленых насаждений и определения видов-индикаторов. Так, по результатам данной работы установлено, что основными древесными породами, произрастающими на рассматриваемой территории, являются следующие: береза повислая (*Betula pendula* Roth.), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), тополь итальянский (*Populus italica* (Du Roi) Moench), липа сердцевидная (*Tilia cordata* Mill.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). При этом именно тополь итальянский представлен более равномерно в разных категориях насаждений, отвечает всем требованиям, предъявляемым к видам-индикаторам. В выборку были включены только средневозрастные экземпляры деревьев.

Каждая точка отбора образцов была отнесена условно к одной из функциональных зон: промышленная, транспортная, жилая, рекреационная. При зонировании главный акцент уделялся основному типу использования данной территории. Условная фоновая точка находилась в микрорайоне Елецком, расположенном на существенном удалении от основных источников техногенного воздействия в западной части города.

Таблица 1

Пункты отбора растительного материала на территории г. Липецка

| № точки | Местоположение | Функциональная зона |
|---------|---|---------------------|
| 1 | ул. Ковалева, 126Б (район АО «Липецкцемент») | промышленная |
| 2 | Грязинское шоссе, вл. 2 (район ТЭЦ-2) | -//- |
| 3 | ул. Алмазная, 22 | -//- |
| 4 | ул. Металлургов, 22Г | -//- |
| 5 | перекресток ул. Липовской и ул. Семашко | транспортная |
| 6 | перекресток ул. Водопьянова и пр-та Победы | -//- |
| 7 | ул. Гагарина (район железнодорожного вокзала) | -//- |
| 8 | Заводская площадь, 2 | -//- |
| 9 | перекресток ул. Каткуова и пр-та Победы | -//- |
| 10 | перекресток Товарный проезда и ул. Московской | -//- |
| 11 | ул. Циолковского, 11 | жилая |
| 12 | ул. Кирова, 1 | -//- |
| 13 | ул. Краснознаменная, 2Б | -//- |
| 14 | ул. Левобережная, 1 | -//- |
| 15 | просп. Победы, 8 | -//- |
| 16 | ул. Невского, 27 | -//- |
| 17 | ул. Бехтеева, 9 | -//- |
| 18 | ул. Энергостроителей, 23а | -//- |
| 19 | Нижний парк | рекреационная |
| 20 | Верхний парк | -//- |
| 21 | мкр-н Елецкий | условный фон |

Не менее чем с десяти экземпляров деревьев в каждой точке был отобран верхний корковый слой, не доходя до луба. Все образцы транспортировались в пакетах из кальки в эколого-аналитическую лабораторию Воронежского госуниверситета, где затем проводился последующий анализ. Предварительно пробы корки были измельчены с помощью лабораторной мельницы и просеяны через сито с диаметром отверстий 2 мм.

Для определения кислотности корки готовили навеску 2 г и заливали дистиллированной водой в соотношении 1:10, после чего проводился потенциометрический анализ рН. Повторность опыта трехкратная.

Для определения в растениях содержания общей золы использовался метод сухого озоления, который основан на сжигании органических веществ при высокой температуре 550–650 °С. Для этих целей мы использовали двухкамерную печь ПДП-Аналитика. Данный метод подробно описан в ГОСТе 24027.2-80⁴.

Химический анализ проб на элементный состав проводился с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра S8 Tiger. Для этого методом квартования отбиралась навеска массой 4 г. Далее, пробы были высушены в сушильном шкафу до абсолютно сухого состояния при температуре 100–105 °С. Подготовка проб для измерений проводилась путем прессования на прессе Herzog TP-40. Остывшие пробы были смешаны со связующим веще-

⁴ ГОСТ 24027.2-80. Сырье лекарственное растительное. Методы определения влажности, содержания золы, экстрактивных и дубильных веществ, эфирного масла. М., 1981. С. 119–126.

ством – воском (в пропорции 4:1) и спрессованы в пресс-форме диаметром 34 мм с усилием 20 т. Полученные в результате прессования «таблетки» были проанализированы в центре коллективного пользования научным оборудованием Воронежского госуниверситета. Обработка результатов проводилась в программе Spectra Plus. Следует отметить, что метод рентгеновской флуоресценции для химического анализа коры деревьев позволяет проводить прямой анализ растительного материала с минимальной подготовкой образца, тем самым сокращая этапы, а также снижая вероятность загрязнения и другие возможные проблемы при исследовании. При этом получаемые результаты имеют высокую точность и достоверность, что подтверждено в исследованиях Cristiane R. G. Caldana с коллегами [Evaluation of urban ... , 2023]. Все данные, полученные в ходе наших лабораторных исследований, проверены с помощью методов статистического анализа на репрезентативность в программе Statistica 10.0, а также обработаны с использованием Microsoft Excel 2016. Картографический материал был создан в среде геоинформационной системы QGIS 3.10 с помощью интерполирования методов IDW (метод обратных взвешиваний) с последующим автоматическим наложением изолиний.

Результаты и обсуждение

Кора как одна из надземных частей древесных растений постоянно подвергается воздействию внешних экологических факторов. Складчатая структура коры придает ей относительно высокую удельную поверхность и большую площадь. Так, тополь итальянский во взрослом состоянии имеет буровато-серую, с неправильной глубокой продольной трещиноватостью кору. Благодаря существенной сорбционной способности кора способна стабильно адсорбировать пыль, взвешенную в воздухе. Использование данной части растений позволяет проводить мониторинг качества воздушной среды в любое время года. Следует отметить, что образцы коры для исследований на территории г. Липецка отбирались с экземпляров примерно одного возраста, что определено путем измерения высоты и диаметра стволов на уровне 1,5 м от поверхности почвы. При этом жизненное состояние древесных растений не влияет на качество выборки образцов.

Древесная кора имеет сложное строение, в частности внешняя часть – это корка (ритидом), а внутренний слой – это луб. Корка представляет собой отмершие клетки луба, которые выполняют защитные функции, препятствуя повреждению внутренней части ствола от механических повреждений, фитопатогенов и вредителей. Для анализа нами использована именно корка, при этом после снятия коры с деревьев отделение корки и луба проводилось вручную.

Первым этапом исследования было определение кислотности корки. По полученным данным рН водной вытяжки образцов изменялась от 5,05 до 7,74 для разных точек отбора, среднее значение составило 6,98. Пространственное распределение данного показателя представлено на рис. 1.

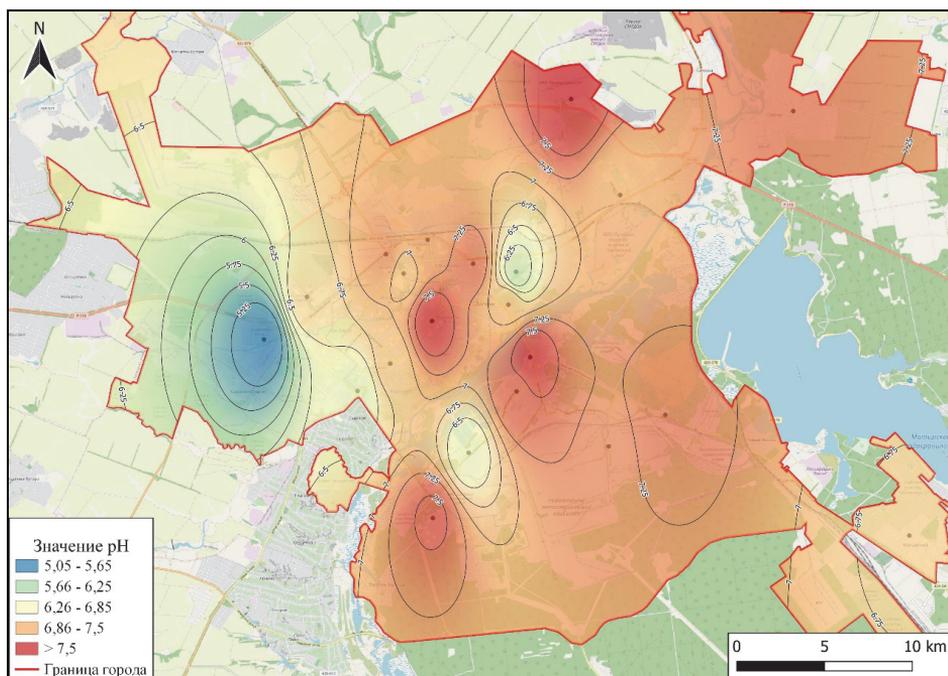


Рис. 1. Распределение показателя кислотности корки тополя итальянского на территории г. Липецка

Еще в 1977 г. К. Grodzińska, проведя ряд исследований в промышленных районах Польши, доказала, что кислотность коры коррелирует с величиной газообразных загрязнителей воздуха. Так, в случае присутствия кислотных соединений (например, SO_2), поступающих от близлежащих транспортных путей или стационарных источников выбросов, происходит подкисление коры [Grodzińska, 1977].

Проведенные нами исследования на территории г. Липецка показали, что наблюдается изменение водородного показателя коры тополя итальянского в сторону подщелачивания. Как видно из картосхемы, максимальное увеличение pH зафиксировано в районе цементного завода (7,74), а также на левом берегу, где сосредоточены производственные мощности НЛМК. Наименьший показатель кислотности корки характерен для рекреационной зоны парковых территорий – 5,05.

При произрастании в естественных условиях величина pH водной вытяжки коры обычно кислая, при этом у разных древесных растений имеет свои значения [Иржигитова, Корчиков, 2011]. Также на кислотность влияет выпадение атмосферных осадков, что приводит обычно к подкислению коры до 3,5–4,0 pH.

Л. Мармор и Т. Рандлане установили влияние загрязнения воздуха от автотранспорта в Таллине на pH коры *Pinus sylvestris*. Кора данной породы обычно кислая (среднее значение pH на контрольном участке 3,0) и изменяется до субнейтральной (до 5,7) вблизи дорог [Marmor, Randlane, 2007].

Проводя исследования в 1992–1993 гг. на ряде лиственных и хвойных пород в Наварре, Испания, Й. М. Сантамариа и А. Мартин выявили тенденцию повышения кислотности коры в зависимости от расположения основных источников загрязнения окружающей среды. А в образцах *Quercus ilex* обнаружена достоверная корреляция между рН коры и уровнем дефолиации ($p < 0,01$, $r = 0,62$) [Santamaría, Martín, 1997].

М. Г. Опекунова с коллегами отмечают, что в условиях г. Санкт-Петербурга, несмотря на влияние кислотных осадков и высокого уровня SO_2 в выбросах, во многих зонах наблюдается нейтральная реакция корки древесных растений, особенно это характерно для микрорайонов с жилой застройкой, где сказывается подщелачивающее влияние оштукатуренных построек [Экологический мониторинг загрязнения ... , 2011].

Подобного рода тенденция к увеличению рН прослеживалась и в наших исследованиях на территории г. Воронежа, что связано со щелочным загрязнением атмосферного воздуха, в частности повышенным количеством техногенной пыли [Клевцова, Якунин, Михеев, 2017].

На всей исследуемой территории Липецка нами установлено увеличение рН водной вытяжки корки тополя итальянского, а в некоторых точках более чем на 50 % по сравнению с фоновым участком. В парковых зонах отмечено повышение рН на 35 %. Следует отметить, что точки отбора № 19 и 20, расположенные в Верхнем и Нижнем парках Липецка, находятся на расстоянии не менее 50 м от границы зеленой зоны, что также обуславливает меньшее значение рН корки по сравнению с прилегающими территориями.

Следовательно, важное значение имеют, как отмечает Д. В. Веселкин, такие характеристики, как степень урбанизации, удаленность от границы леса, тип и возраст леса. Он обнаружил значительное влияние данных особенностей на рН коры *Pinus sylvestris* при произрастании на территории г. Екатеринбурга. Подщелачивание коры увеличилось в среднем на 0,2–0,5 ед. рН выше фона по градиенту от внутренней части леса к опушке. В городских лесах опушечное влияние было примерно вдвое больше (0,6–0,8 ед. рН), чем в пригородных лесах (0,2–0,3 ед. рН), а глубина колебалась от 70 до 160 м. Исследования показали, что загрязнение воздуха городской пылью влияет на сосняки южной тайги на глубину около 100–150 м от границы с лесом [Veselkin, 2023].

В своих исследованиях Д. М. Иржигитова с коллегами также доказали, что кислотность коры преимущественно зависит от видовых особенностей и возраста деревьев. При этом существенное влияние на рН оказывает влажность биотопа, состав атмосферного воздуха, выделения эпифитных организмов, а также почвообразующие породы [Иржигитова, Каратаева, Корчиков, 2009].

Таким образом, в пределах г. Липецка наблюдается увеличение кислотности корки тополя итальянского за счет наличия в воздухе взвешенных частиц, которые, оседая на поверхности стволов, вызывают изменение рН в сторону подщелачивания. Особенно ярко выражено данное явление в точке № 1 (район АО «Липецкцемент»). Известно, что предприятия данного типа

являются поставщиками в атмосферный воздух неорганической пыли, в состав которой входят и частицы карбонатов. Если рассматривать средние значения по функциональным зонам, то имеет место следующий ряд убывания кислотности корки тополя итальянского: жилая < промышленная < транспортная < рекреационная.

Важным биогеохимическим показателем условий произрастания древесных растений является зольность. Данный параметр характеризует соотношение органических и неорганических веществ в том или ином органе растительного организма. При этом количество последних зависит как от внутренних (в частности биологических особенностей самого вида, органа, ткани и т. п.), так и от внешних экологических факторов среды обитания.

О. М. Храменкова с коллегами отмечают, что поверхность корки древесных растений постоянно взаимодействует с окружающим атмосферным воздухом, следовательно, происходит контакт и с теми примесями, которые в нем содержатся. Кроме того, на корку оказывает влияние влага, появляющаяся на стволах деревьев во время выпадения осадков. Она содержит водорастворимые вещества, вымываемые из листьев, ветвей, вышерасположенной корки, эпифитных лишайников, а также может иметь в составе выделения насекомых, осаждаемые листьями и ветвями пылевые частицы и др. [Высотное распределение зольности ... , 2016].

В табл. 2 приведены основные выборочные параметры, подтверждающие соответствие наших данных закону нормального распределения (распределения Гаусса – Лапласа). Варьирование для кислотности – малое, для зольности – среднее. Репрезентативность полученных опытным путем данных достаточная ($p \leq 5\%$).

Таблица 2

Статистические характеристики биогеохимических параметров корки тополя итальянского

| Показатель | $M \pm m_M$ | X_{\min} | X_{\max} | Me | $\pm\sigma$ | V, % | p , % |
|-----------------|-------------|------------|------------|-------|-------------|-------|---------|
| Зольность, % | 15,03±0,68 | 10,42 | 21,44 | 14,33 | 3,12 | 20,78 | 4,54 |
| Кислотность, рН | 6,98±0,14 | 6,08 | 7,74 | 7,14 | 0,65 | 9,32 | 2,04 |

Примечание. $M \pm m_M$ – среднее арифметическое \pm ошибка среднего арифметического; X_{\min} – минимальное значение показателя; X_{\max} – максимальное значение показателя; Me – медиана; $\pm\sigma$ – среднее квадратическое отклонение; V – коэффициент вариации; p – точность опыта.

Зольность корки тополя итальянского на территории г. Липецка изменялась в пределах от 10,42 до 21,44 %. Минимальное значение зольности нами отмечено в точке № 19 (Нижний парк). Максимум параметра зафиксирован в точках № 2 и 3, расположенных по Грязинскому шоссе и ул. Алмазной соответственно. Древесные растения здесь произрастают в непосредственной близости от производственных площадок НЛМК и попадают в зону максимальных выбросов согласно розе ветров. Высокое содержание зольных элементов имеет и точка № 1, которая находится в зоне влияния цементного завода. Пространственное распределение данного показателя представлено на рис. 2.

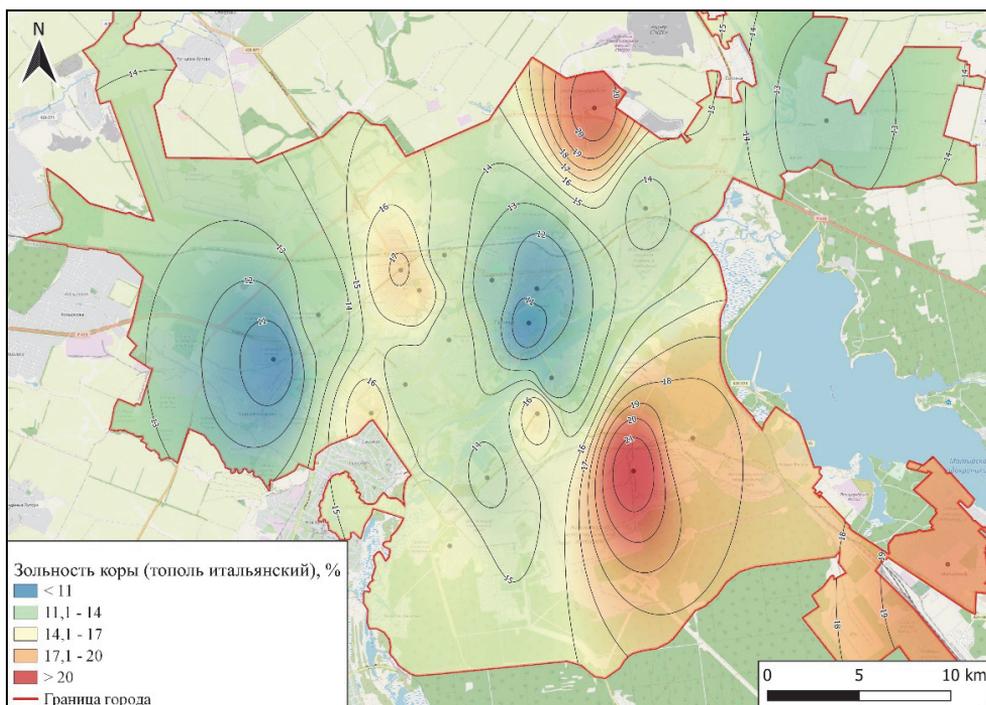


Рис. 2. Распределение зольности в коре тополя итальянского на территории г. Липецка

Таким образом, мы установили увеличение зольности корки тополя итальянского в основном при произрастании в местах влияния промышленных выбросов. В остальных зонах показатель меньше. В целом ряд по мере убывания зольности корки тополя итальянского в зависимости от категории использования территории выглядит следующим образом: промышленная зона > транспортная \approx жилая > рекреационная.

Сходные результаты мы получили и для г. Воронежа [Клевцова, Якунин, Михеев, 2017], а также, например, А. Е. Ишимова на основе проведенных исследований на территории г. Семей (Казахстан) [Ишимова, 2012] и Е. Г. Тюлькова путем лабораторного анализа образцов растений, произрастающих в г. Гомеле (Беларусь) [Тюлькова, 2016]. Самые высокие значения зольности деревьев приурочены к промышленным и транспортным зонам, минимальные выявляются у деревьев, растущих в селитебных и рекреационных зонах. При этом зольность разных видов отличается, как и содержание зольных элементов в листьях и коре.

Определение количества химических элементов в коре тополя итальянского рентгенфлуоресцентным методом позволило установить ряд закономерностей. По элементному составу корка нижней части ствола содержит повышенное количество неорганических соединений и углерода, что подтверждено и другими исследователями [Дейнеко, Дейнеко, Белов, 2007]. Так, по основным элементам органических веществ (С, Н, О, N) наблюдается уменьшение содержания по сравнению с фоновым участком во всех точках

до 3 %. По калию в 65 % образцов зафиксировано снижение концентрации от 4 до 56 %. На перекрестке ул. Катукова и просп. Победы значения K идентичны контролю, а в шести точках наблюдается увеличение содержания данного макроэлемента (рис. 3).

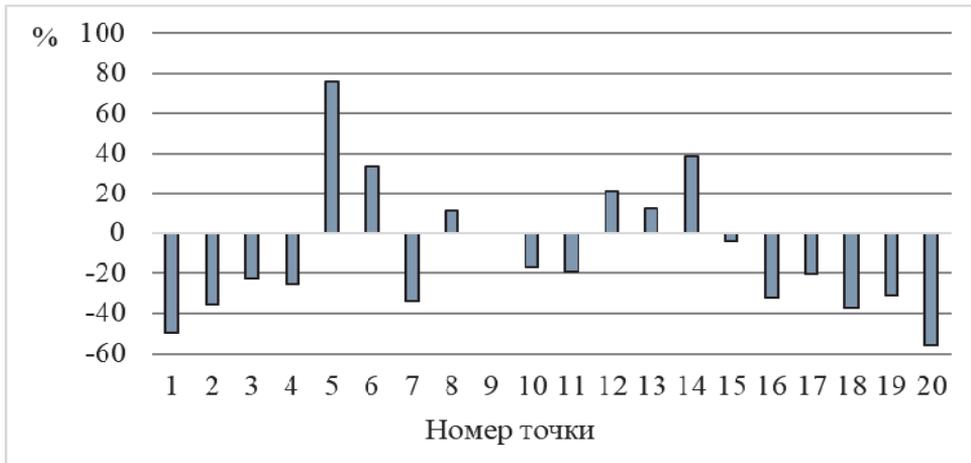


Рис. 3. Содержание калия в коре тополя итальянского в сравнении с фоновыми значениями

Это косвенно может свидетельствовать о различии в условиях минерального питания при произрастании деревьев в тех или иных экологических условиях, что сказывается на жизнедеятельности растений в течение ряда лет, в частности, на фотосинтезирующей активности, водном балансе и т. п.

Как известно, в разных органах древесных растений накопление и распределение микроэлементов, в том числе и тяжелых металлов неравномерное. Например, группа исследователей из Петрозаводска при изучении насаждений березы повислой и березы пушистой указывает на то, что в городской среде Cd, Zn, Fe накапливаются преимущественно в листьях, Ni, Zn, Fe – в брахипластах, а Ni, Fe, Mn – в почках [Кузнецова, Ветчинникова, Титов, 2015].

Следует отметить, что в результате химического анализа нами не обнаружены свинец, кадмий, никель, кобальт, ртуть, что, возможно, объясняется их очень низкой концентрацией в коре тополя и невысокой чувствительностью метода к данным элементам, в отличие, например, от атомно-эмиссионного спектрального анализа. Последний позволяет определять с высокой точностью наличие всех требуемых элементов, причем начиная от 0,0001 %. Хром зафиксирован только в точке № 3 (30 мг/кг) и в 17 раз превышает кларк (1,8 мг/кг) по В. В. Добровольскому [1998].

В табл. 3 представлены данные, характеризующие наличие некоторых тяжелых металлов в исследуемых образцах.

Таблица 3

Статистические показатели содержания тяжелых металлов в коре тополя итальянского (мг/кг сухого вещества)

| Показатель | $M \pm m_M$ | X_{\min} | X_{\max} | Мода | Медиана | Кларк по В. В. Добровольскому, 2003 г. |
|---------------|-------------|------------|------------|------|---------|--|
| Медь (Cu) | 6,0±1,5 | 0 | 20 | 0 | 10 | 8 |
| Цинк (Zn) | 106,5±13,9 | 30 | 290 | 90 | 90 | 30 |
| Марганец (Mn) | 92,1±15,8 | 0 | 330 | 50 | 70 | 205 |
| Титан (Ti) | 86,4±11,3 | 0 | 200 | 100 | 90 | 32,5 |
| Стронций (Sr) | 51,9±2,5 | 30 | 70 | 60 | 60 | 35 |

Отобранные пробы имеют высокий уровень накопления по ряду тяжелых металлов. Медь обнаружена в 11 точках, максимальная концентрация в точках № 3 и 16, в целом средние значения не превышают кларк по В. В. Добровольскому [1998], но больше фоновых в 20 раз.

По марганцу наибольшее содержание зафиксировано в пробе корки тополя итальянского по ул. Алмазной (330 мг/кг) и выше контроля в 8,5 раза (40 мг/кг), кларка в 1,6 раза. Во всех точках, за исключением Верхнего парка, наблюдается превышение фоновых значений.

Концентрация цинка почти во всех образцах высокая – более 80 мг/кг, в особенности повышенные значения показателя имеют деревья в промышленно-транспортной зоне. Как показано на рис. 4, только в трех точках Zn меньше фоновых. В этих же точках зафиксировано и высокое содержание цинка в почвенном покрове [Седых, 2022].

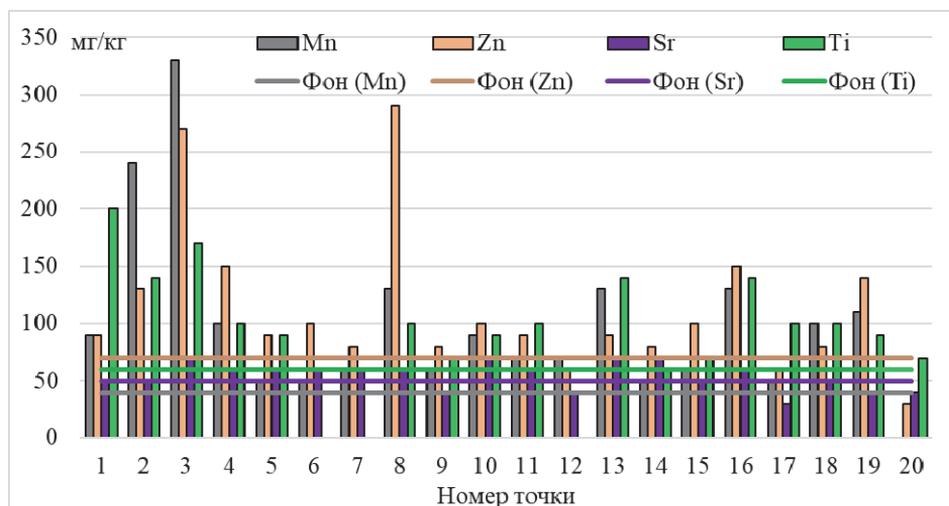


Рис. 4. Содержание некоторых тяжелых металлов в коре тополя итальянского на территории г. Липецка

В. Б. Калманова при проведении комплексного исследования на территории г. Биробиджана отмечает высокую степень накопления именно цинка в коре разных видов тополей по сравнению с другими тяжелыми металлами [Калманова, 2005].

Стронций имеет низкий диапазон колебаний от 30 до 70 мг/кг, при этом во всех образцах на всех точках отбора наблюдается превышение кларка по В. В. Добровольскому (35 мг/кг) [1998], а в 11 точках концентрация выше фоновых значений (50 мг/кг).

Высокие показатели титана отмечены в 85 % точек, особенно заметное увеличение концентрации в 3 раза наблюдается в зоне влияния цементного завода и вблизи производственных площадок Новолипецкого металлургического комбината.

В 2011 г. группа исследователей на территории г. Красноярск выявила количественные связи между концентрациями некоторых тяжелых металлов в воздухе, почве и аккумуляцией их в коре тополя бальзамического. Сезонная динамика свидетельствовала о большем количестве поллютантов в осенне-летний период по сравнению с зимним. Что позволило утверждать о поступлении загрязнителей из почвы и атмосферы. Самые высокие концентрации приурочены к источникам техногенных выбросов. На примере цинка и меди установлены достоверные корреляционные связи между содержанием этих элементов в атмосферном воздухе и коре тополя бальзамического [Соболева, Ченцова, Почкутов, 2011].

Зарубежные ученые также подтверждают, что анализ содержания химических элементов в коре древесных растений позволяет получить информацию об уровнях загрязнения как воздушной среды, так и почвенного покрова. Это обусловлено тем, что кора состоит из внешней (мертвой) части, которая пассивно аккумулирует вещества из воздуха, и внутренней (живой) части, поглощающей загрязнители через корневую систему [Chrabaszcz, Mróz, 2017].

Содержание железа в проанализированных образцах корки для исследуемых всех точек превышает фоновые значения (до 1,04 г/кг). Максимум зафиксирован в точках № 2–4, которые расположены непосредственно в зоне прилегания к производственным площадкам НЛМК. Так, точка № 2 находится рядом с агломерационным цехом, где совершают спекание агломерационной шихты, охлаждение агломерата и возврата, обжиг окатышей. Наличие и высокое содержание ряда химических элементов в корке тополя итальянского объясняется тем, что в состав выбросов доменного, агломерационного производства, ферросплавов входит помимо оксидов углерода, серы, азота, большое количество пыли, содержащей частицы Fe, Cu, Ti, Zn, Pb, Cr и других тяжелых металлов.

При изучении накопления тяжелых металлов в разных органах тополя бальзамического группа ученых на территории г. Читы установила, что железо накапливается в большей степени именно в корке, по сравнению с листьями и корнями [Лескова, Копылова, Якимова, 2013].

Нами установлена корреляционная связь средней степени между содержанием железа-титана ($r \pm m_r = 0,48 \pm 0,20$) и железа-цинка ($r \pm m_r = 0,47 \pm 0,20$) в корке тополя итальянского. Корреляция высокого уровня зафиксирована между концентрацией железа и марганца ($r \pm m_r = 0,80 \pm 0,14$). Коэффициент детерминации для последнего случая показывает, что 64 % изменений содержания Fe обусловлено изменениями Mn. Проверка по критерию Стьюдента подтвердила, что корреляционные связи достоверные.

Г. Н. Копчик с коллегами, изучая поглощение тяжелых металлов *Picea abies* под влиянием выбросов комбината «Североникель», подчеркивают, что кора является многолетним органом, она аккумулирует значительные количества загрязняющих веществ. С ростом атмосферного загрязнения содержание серы в коре возрастает в 3, никеля – в 320, меди – в 210, свинца – в 10, кадмия – в 4 раза [Поглощение макроэлементов ... , 2008].

При исследовании придорожных зон г. Хунджанда ученые указывают на накопление тяжелых металлов в листьях древесных растений и обеднение количества в них биофильных элементов. Именно тополь пирамидальный в сравнении с контролем аккумулирует максимальное количество поллютантов: Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, Co, Fe, Cr [Зокиров, Неверова, 2012].

Таким образом, для корки тополя итальянского, произрастающего на территории г. Липецка, мы получили следующий ряд убывания концентрации некоторых химических элементов: Ca > Fe > Al > Mg > Zn > Mn > Ti > Sr > Cu. К особо опасным для древесных растений в случае накопления относятся кобальт, хром, медь, свинец, цинк, кадмий, ртуть [Неверова, Колмогорова, 2003]. В этом случае наблюдается токсический эффект, который проявляется в ферментотоксическом действии, мембранотропном действии и окислительном стрессе. Однако растения имеют защитные механизмы, позволяющие им противостоять стрессовым факторам окружающей среды: предотвращение или ограничение проникновения, хелатирование и локализация, а также работа антиоксидантной системы [Сиромля, Загурская, 2021].

Группа ученых, исследуя территорию Польши, установила, что необходимо учитывать время взятия проб на анализ, так как это в значительной мере влияет на полученные результаты. Некоторые сезонные изменения сказываются на содержании химических элементов, например, зимний отопительный сезон дает более высокие концентрации тяжелых металлов в образцах коры деревьев, взятых весной [Swislowski., Kriz, Rajfur, 2020]. Следовательно, можно предположить, что в летний период, когда и были проведены наши исследования на территории г. Липецка, содержание поллютантов в образцах корки тополя итальянского имеет более низкие значения. Однако это требует подтверждения на последующих этапах нашей работы.

Заключение

На основе проведенных нами исследований, получены следующие закономерности:

Во-первых, главным преимуществом использования именно коры в целях биоиндикации по сравнению с листьями растений является то, что загрязняющие вещества, которые оседают на листовых пластинках, могут быть смыты атмосферными осадками или разноситься ветром. Благодаря большой площади поверхности и постоянному контакту с внешней средой кора является хорошим биоиндикатором экологических условий. Поллютанты, присутствующие в окружающей среде, впитываются в структуру коры и накапливаются годами за счет оседания влажных и сухих отложений. Хотя механизмы накопления металлов в коре до конца не изучены. Об этом свидетельствуют результаты исследований ряда ученых о влиянии в том числе почвенного покрова на элементный состав корки.

Во-вторых, обнаружена зависимость между измерениями рН экстрактов коры тополя итальянского и состоянием окружающей среды. Данный показатель является легко определяемым биогеохимическим параметром, позволяющим установить степень влияния присутствующих в атмосферном воздухе веществ. На всей исследуемой территории г. Липецка нами отмечено увеличение рН водной вытяжки корки тополя итальянского по сравнению с фоновым участком. В зонах рекреации кислотность возрастает незначительно, а на остальной территории, в том числе и селитебной, наблюдается подщелачивание корки деревьев. Это обусловлено, с большей долей вероятности, присутствием в воздухе и последующим ее оседанием на коре пылевидных частиц.

В-третьих, кора выступает в роли абсорбента, позволяющего контролировать постоянное и временное загрязнение окружающей среды различного происхождения. Зольность корки является маркером долговременного воздействия поллютантов на древесные растения. Зольность корки тополя итальянского на территории г. Липецка возрастает в промышленной зоне, в особенности максимальные значения зафиксированы в районе Новолипецкого металлургического комбината и цементного завода, минимальные – в парковых территориях.

В-четвертых, для корки тополя итальянского, произрастающего на территории г. Липецка, мы получили следующий ряд убывания концентрации некоторых химических элементов: $Ca > Fe > Al > Mg > Zn > Mn > Ti > Sr > Cu$. Содержание железа во всех исследуемых точках на территории г. Липецка превышает фоновые значения (1,04 г/кг). Нами установлена корреляционная связь средней степени между содержанием железа-титана и железа-цинка. Отмечены высокие концентрации по цинку, особенно в промышленных районах. Сравнение результатов исследований с официальными данными природоохранных служб свидетельствует о том, что в зонах с повышенным уровнем атмосферного загрязнения наблюдается и увеличение ряда биогеохимических параметров.

В-пятых, проведенная геоэкологическая оценка состояния окружающей среды в г. Липецке путем определения некоторых биогеохимических показателей в древесной корке как депонирующей среде позволила выделить зоны, характеризующиеся повышенным загрязнением, к которым относятся территории непосредственного прилегания к НЛМК на юге и юго-востоке левобережной части города, а также локальные участки прилегания к цементному заводу на севере города. Помимо этого увеличение фона фиксируется и на крупных участках улично-дорожной сети.

Список литературы

Высотное распределение зольности и элементного состава корки сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) / О. М. Храмченкова [и др.] // Веснік Палескага дзяржаўнага ўніверсітэта. Серыя прыродазнаўчых навук. 2016. № 2. С. 34–38

Дейнеко И. П., Дейнеко И. В., Белов Л. П. Исследование химического состава коры сосны // Химия растительного сырья. 2007. № 1. С. 19–24.

Добровольский В. В. Основы биогеохимии. М. : Высш. шк., 1998. 413 с.

Знаменищикова А. В. Влияние экологической ситуации в г. Липецке на физиологические особенности древесных растений // Экология урбанизированных территорий. 2008. № 3. С. 100–102.

Зокиров Р. С., Неверова О. А. Оценка аккумулирующей способности древесных растений в отношении тяжелых металлов в примагистральных зонах г. Худжанда // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. С. 293.

Иржигитова Д. М., Каратаева Е. И., Корчиков Е. С. Кислотность коры основных лесобразующих пород Красносамарского лесного массива и Жигулевского госзаповедника им. И. И. Спрыгина // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2009. Т. 18. № 3. С. 153–160.

Иржигитова Д. М., Корчиков Е. С. Некоторые химические особенности коры деревьев как субстрата для развития лишайников (на примере Красносамарского лесного массива) // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. 2011. № 5. С. 144–152.

Ишимова А. Е. Зольность листьев, хвои и коры древесных растений как индикаторный признак загрязнения воздушного бассейна г. Семей // Проблемы геологии и освоения недр. Томск, 2012. С. 547–549.

Калманова В. Б. Комплексная оценка функциональной значимости и экологического состояния дендрофлоры г. Биробиджан // Региональные проблемы. 2005. № 6-7. С. 67–72.

Клевцова М. А., Якунин А. И., Михеев А. А. Эколого-геохимическая диагностика загрязнения территории по реакции древесных растений // Медико-экологическая диагностика состояния окружающей среды города Воронежа : сб. науч. ст. Воронеж, 2017. С. 113–124.

Кузнецова Т. Ю., Ветчинникова Л. В., Тутов А. Ф. Аккумуляция тяжелых металлов в различных органах и тканях березы в зависимости от условий произрастания // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 1. С. 86–94.

Лескова О. А., Копылова Л. В., Якимова Е. П. Накопление тяжелых металлов в *Populus balsamifera* L. (Забайкальский край) // Ученые записки Забайкальского государственного гуманитарно-педагогического университета им. Н. Г. Чернышевского. 2013. № 1 (48). С. 102–107.

Неверова О. А., Колмогорова Е. Ю. Древесные растения и урбанизированная среда: экологические и биотехнологические аспекты. Новосибирск : Наука, 2003. 222 с.

Поглощение макроэлементов и тяжелых металлов елью при атмосферном загрязнении на Кольском полуострове / Г. Н. Копчик [и др.] // Лесоведение. 2008. № 2. С. 3–12.

Попова О. В., Федорова А. И. Индикация дальности и интенсивности влияния Новолипецкого металлургического комбината на прилегающую территорию (по реакциям клена платанолистного) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2005. № 1. С. 135–142.

Седых В. А. Содержание тяжелых металлов в почвенном покрове города Липецка // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2022. № 4. С. 126–130. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2022/4/126-130>

Сиромля Т. И., Загурская Ю. В. Проблемы исследования процессов аккумуляции и гипераккумуляции растениями химических элементов // Журнал общей биологии. 2021. Т. 82, № 4. С. 283–296.

Соболева С. В., Ченцова Л. И., Почекутов И. С. Оценка сезонных накоплений тяжелых металлов в коре тополя различных районов г. Красноярск // Вестник КрасГАУ. 2011. № 12 (63). С. 144–148.

Тюлькова Е. Г. Зольность и морфометрические параметры листьев древесных растений как индикаторы загрязнения окружающей среды (на примере г. Гомеля) // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. 2016. № 3 (96). С. 64–69.

Экологический мониторинг загрязнения территории Васильевского острова Санкт-Петербурга с использованием тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) / М. Г. Опекунова [и др.] // Известия Русского географического общества. 2011. Т. 143. № 2. С. 31–44.

Accumulation of heavy metals in needles and bark of *Pinus* species / A. Parzych [et al.] // Folia Forestalia Polonica, series A – Forestry. 2017. Vol. 59, N 1. P. 34–44. <https://doi.org/10.1515/ffp-2017-0004>

Bingöl Ü, Geven F., Göney K. Heavy metal (Pb and Ni) accumulation in the branch and bark tissues of street tree *Sophora japonica* L. // Kastamonu Univ., Journal of Forestry Faculty. 2008. N 8, part 1. P. 93–96.

Chrabąszcz M., Mróz L. Tree Bark, a valuable source of information on air quality // Polish Journal of Environmental Studies. 2017. Vol. 26, N 2. P. 453–466. <https://doi.org/10.15244/pjoes/65908>

Cypress tree (*Cupressus semovirens* L.) bark as an indicator for heavy metal pollution in the atmosphere of Amman City, Jordan / T. El-Hasana, H. Al-Omaria, A. Jiriesb, F. Al-Nasirc // Environment International. 2002. Vol. 28. P. 513–519. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00079-X)

Ejidike I. P., Onianwa P. C. Assessment of trace metals concentration in tree barks as indicator of atmospheric pollution within Ibadan City, South-West, Nigeria // Journal of Analytical Methods in Chemistry. 2015. 8 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/243601>

Evaluation of urban tree barks as bioindicators of environmental pollution using the X-ray fluorescence technique / C. R. G. Caldana [et al.] // Chemosphere. 2023. Vol. 312, Part 2. 137257 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137257>

Grodzińska K. Acidity of tree bark as a bioindicator of forest pollution in Southern Poland // Water, Air, and Soil Pollution. 1977. Vol. 8. P. 3–7.

Kord B., Kord B. Heavy metal levels in pine (*Pinus eldarica* Medw.) tree barks as indicators of atmospheric pollution // BioResources. 2011. Vol. 6, N 2. P. 927–935. <https://doi.org/10.15376/biores.6.2.927-935>

Kuik P., Wolterbeek H. Th. Factor analysis of trace-element data from tree-bark samples in The Netherlands // Environmental Monitoring and Assessment. 1994. Vol. 32. P. 207–226.

Levels of road traffic heavy metals in tree bark layers of *Cassia fistula* tree / R. Janta [et al.] // International journal of environmental science and development. 2016. Vol. 7. N 5. P. 385–388. <https://doi.org/10.7763/IJESD.2016.V7.805>

Mapping aerial metal deposition in metropolitan areas from tree bark: a case study in Sheffield, England / E. Schelle [et al.] // Environmental Pollution. 2008. Vol. 155, Iss. 1. P. 164–173 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.10.036>

Marmor L., Randlane T. Effects of road traffic on bark pH and epiphytic lichens in Tallinn // Folia Cryptog. Estonica, Fasc. 2007. Vol. 43. P. 23–37.

Santamaria J. M., Martin A. Tree bark as a bioindicator of air pollution in Navarra, Spain // Water, Air, and Soil Pollution. 1997. Vol. 98. P. 381–387.

Swisłowski P., Kriz J., Rajfur M. The Use of Bark in Biomonitoring Heavy Metal Pollution of Forest Areas on the Example of Selected Areas in Poland // Ecological Chemistry and Engineering S. 2020. Vol. 27, N 2. P. 1–16. <https://doi.org/10.2478/eces-2020-0013>

Tree barks as environmental biomonitors of metals – the example of mercury / P. Costagliola, M. Benvenuti, L. Chiarantini [et al.] // Journal of Environmental Science and Allied Research. 2017. Vol. 1, Iss. 1. P. 11–18. <https://doi.org/10.29199/ESAR.101012>

Use of tree bark for comparing environmental pollution in different sites from Buenos Aires and Montevideo / A. M. Faggi, F. Fujiwara, C. Anido, P. E. Perelman // Environmental Monitoring and Assessment. 2011. Vol. 178. P. 237–245.

Veselkin D. V. Urbanization increases the range, but not the depth, of forest edge influences on *Pinus sylvestris* bark pH // Urban Forestry & Urban Greening. 2023. Vol. 79. 127819. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127819>

Zhang Y., Xiang Y. B., Chen W. Y. Heavy metal content in the bark of *Camphora* tree in Xiangtan and its environmental significance // Applied ecology and environmental research. 2019. Vol. 17, N 4. P. 9827–9835. https://doi.org/10.15666/aecr/1704_98279835

References

Hramchenkova O.M. et al. Vysotnoe raspredelenie zolnosti i jelementnogo sostava korki sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L.) [Altitudinal distribution of ash content and elemental composition of Scotch pine bark]. *Vestnik Polesskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija estestvennyh nauk: nauchno-prakticheskij zhurnal* [Bulletin of Polessky State University. Series of natural sciences: scientific and practical journal], 2016, no. 2, pp. 34–38. (in Russian)

Dejneko I.P., Dejneko I.V., Belov L.P. Issledovanie himicheskogo sostava kory sosny [Study of the chemical composition of pine bark]. *Himija rastitelnogo syrja* [Chemistry of plant raw materials], 2007, no. 1, pp. 19–24. (in Russian)

Dobrovolskii V.V. *Osnovy biogeokhimii* [Fundamentals of biogeochemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1998, 413 p.

Znamenshnikova A.V. Vlijanie jekologicheskoj situacii v g. Lipecke na fiziologicheskie osobennosti drevesnyh rastenij [The influence of the ecological situation in the city of Lipetsk on the physiological characteristics of woody plants]. *Ekologija urbanizirovannyh territorij* [Ecology of urban areas], 2008, no. 3, pp. 100–102. (in Russian)

Zokirov R.S., Neverova O.A. Ocenka akumulirujushhej sposobnosti drevesnyh rastenij v otnoshenii tzhzhelyh metallov v primagistralnyh zonah g. Hudzhanda [Assessment of the accumulative capacity of woody plants in relation to heavy metals in the main areas of Khujand]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija* [Modern problems of science and education], 2012, no. 5, pp. 293. (in Russian)

Irzhigitova D.M., Karataeva E.I., Korchikov E.S. Kislotnost kory osnovnyh lesoobrazujushhih porod Krasnosamarskogo lesnogo massiva i Zhigulevskogo goszapovednika im. I.I. Sprygina [The acidity of the bark of the main forest-forming species of the Krasnosamarsky forest area and the Zhiguli State Reserve named after. I.I. Sprygin]. *Samarskaja Luka: problemy regionalnoj i globalnoj ekologii* [Samarskaya Luka: problems of regional and global ecology], 2009, vol. 18, no. 3, pp. 153–160 (in Russian)

Irzhigitova D.M., Korchikov E.S. Nekotorye himicheskie osobennosti kory derev'ev kak substrata dlja razvitija lishajnikov (na primere Krasnosamarskogo lesnogo massiva) [Some chemical features of the bark of trees as a substrate for the development of lichens (on the example of the Krasnosamarsky forest area)]. *Vestnik SamGU. Estestvennonauchnaja serija* [Bulletin of SamGU. Natural Science Series], 2011, no. 5, pp. 144–152. (in Russian)

Ishimova A.E. Zolnost list'ev, hvoi i kory drevesnyh rastenij kak indikatornyj priznak zagryaznenija vozdušnogo bassejna g. Semej [Ash content of leaves, needles and bark of woody plants as an indicator sign of pollution of the air basin of the city of Semej]. *Problemy geologii i osvoenija nedr* [Problems of Geology and Mineral Development], Tomsk, 2012, pp. 547–549. (in Russian)

Kalmanova V.B. Kompleksnaja ocenka funkcionalnoj znachimosti i jekologicheskogo sostojanija dendroflory g. Birobidzhan [Comprehensive assessment of the functional significance and ecological state of the dendroflora in the city of Birobidzhan]. *Regionalnye problem* [Regional issues], 2005, no. 6-7, pp. 67–72. (in Russian)

Klevcova M.A., Jakunin A.I., Miheev A.A. Jekologo-geohimicheskaja diagnostika zagryaznenija territorii po reakcii drevesnyh rastenij [Ecological and geochemical diagnostics of territory pollution by the reaction of woody plants] *Mediko-jekologicheskaja diagnostika sostojanija okruzhajushhej sredy goroda Voronezha: sbornik nauchnyh statej* [Medico-ecological diagnostics of the state of the environment of the city of Voronezh: collection of scientific articles], 2017, pp. 113–124. (in Russian)

Akkumuljacija tzhzhelyh metallov v razlichnyh organah i tkanjah berezy v zavisimosti ot uslovij proizrastanija [Accumulation of heavy metals in various organs and tissues of birch depending on growth conditions]. *Trudy Karelskogo nauchnogo centra RAN* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the RAS], 2015, no. 1, pp. 86–94. (in Russian)

Leskova O.A., Kopylova L.V., Jakimova E.P. Nakoplenie tzhzhelyh metallov v Populus balsamifera L. (Zabajkalskij kraj) [Accumulation of heavy metals in Populus balsamifera L. (Zabajkal'skij kraj)]. *Uchenye zapiski Zabajkalskogo gosudarstvennogo gumanitarno-pedagogicheskogo universiteta im. N.G. Chernyshevskogo* [Scientific notes of the Trans-Baikal State Humanitarian and Pedagogical University named after V.I. N.G. Chernyshevsky], 2013, no. 1(48), pp. 102–107. (in Russian)

Neverova O.A., Kolmogorova E.Yu. *Drevesnye rasteniya i urbanizirovannaya sreda: ekologicheskie i biotekhnologičeskie aspekty* [Woody plants and urbanized environment: ecological and biotechnological aspects]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2003, 222 p.

Kopcik G.N. et al. Pogloshhenie makrojelementov i tzhzhelyh metallov elju pri atmosfjernom zagryaznenii na Kolskom poluostrove [Absorption of macroelements and heavy metals by spruce under atmospheric pollution on the Kola Peninsula]. *Lesovedenie* [Forestry], 2008, no. 2, pp. 3–12. (in Russian)

Popova O.V., Fedorova A.I. Indikacija dal'nosti i intensivnosti vlijanija Novolipeckogo metalurgicheskogo kombinata na priliegajushhuju territoriju (po reakcijam klena platanolistnogo) [Indica-

tion of the range and intensity of the influence of the Novolipetsk Iron and Steel Works on the adjacent territory (according to the reactions of the maple tree)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Himija. Biologija. Farmacija* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy], 2005, no. 1, pp. 135–142. (in Russian)

Sedyh V.A. Soderzhanie tjazhelyh metallov v pochvennom pokrove goroda Lipecka [The content of heavy metals in the soil cover of the city of Lipetsk]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geografija. Geojekologija* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geocology], 2022, no. 4, pp. 126–130. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2022/4/126-130> (in Russian)

Siromlja T.I., Zagurskaja Ju.V. Problemy issledovanija processov akumuljaccii i giperakumuljaccii rastenijami himicheskikh elementov [Problems of studying the processes of accumulation and hyperaccumulation of chemical elements by plants]. *Zhurnal obshhej biologii* [Journal of General Biology], 2021, vol. 82, no. 4, pp. 283–296. (in Russian)

Soboleva S.V., Chencova L.I., Pochekutov I.S. Ocenka sezonnyh nakoplenij tjazhelyh metallov v kore topolja razlichnyh rajonov g. Krasnojarska [Estimation of seasonal accumulations of heavy metals in poplar bark in various regions of Krasnoyarsk]. *Vestnik KrasGAU* [Vestnik KrasGAU], 2011, no. 12 (63), pp. 144–148. (in Russian)

Tjul'kova E.G. Zolnost i morfometricheskie parametry listiev drevesnyh rastenij kak indikatorы zagryaznenija okruzhajushhej sredy (na primere g. Gomelja) [Ash content and morphometric parameters of leaves of woody plants as indicators of environmental pollution (on the example of the city of Gomel)]. *Izvestija Gomeľ'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny* [Proceedings of the Gomel State University named after F. Skorina], 2016, no. 3 (96), pp. 64–69. (in Russian)

Opekunova M.G. et al. Jekologicheskij monitoring zagryaznenija territorii Vasil'evskogo ostrova Sankt-Peterburga s ispolzovaniem topolja bal'zamicheskogo (*Populus balsamifera* L.) [Ecological monitoring of pollution of the territory of Vasilevsky Island of St. Petersburg using balsam poplar (*Populus balsamifera* L.)]. *Izvestija Russkogo geograficheskogo obshhestva* [Proceedings of the Russian Geographical Society], 2011, vol. 143, no. 2, pp. 31–44. (in Russian)

Parzych A. et al. Accumulation of heavy metals in needles and bark of *Pinus* species. *Folia Forestalia Polonica, series A – Forestry*, 2017, vol. 59 (1), pp. 34–44. <https://doi.org/10.1515/ffp-2017-0004>

Bingöl Ü, Geven F., Güney K. Heavy metal (Pb and Ni) accumulation in the branch and bark tissues of street tree *Sophora japonica* L. *Kastamonu Univ., Journal of Forestry Faculty*, 2008, vol. 8, no. 1, pp. 93–96.

Chrabąszcz M., Mróz L. Tree Bark, a valuable source of information on air quality. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2017, no. 26(2), pp. 453–466. <https://doi.org/10.15244/pjoes/65908>

El-Hasana T., Al-Omaria H., Jiriesb A., Al-Nasirc F. Cypress tree (*Cupressus semervirens* L.) bark as an indicator for heavy metal pollution in the atmosphere of Amman City, Jordan. *Environment International*, 2002, vol. 28, pp. 513–519. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00079-X)

Ejidike I.P., Onianwa P.C. Assessment of trace metals concentration in tree barks as indicator of atmospheric pollution within Ibadan City, South-West, Nigeria. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2015, 8 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/243601>

Caldana C.R.G. et al. Evaluation of urban tree barks as bioindicators of environmental pollution using the X-ray fluorescence technique. *Chemosphere*, 2023, vol. 312, part 2, 137257. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137257>.

Grodzińska K. Acidity of tree bark as a bioindicator of forest pollution in Southern Poland. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1977, vol. 8, pp. 3–7.

Kord B., Kord B. Heavy metal levels in pine (*Pinus eldarica* Medw.) tree barks as indicators of atmospheric pollution. *BioResources*, 2011, no. 6 (2), pp. 927–935. <https://doi.org/10.15376/biores.6.2.927-935>

Kuik P., Wolterbeek H.Th. Factor analysis of trace-element data from tree-bark samples in The Netherlands. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1994, vol. 32, pp. 207–226.

Janta R. et al. Levels of road traffic heavy metals in tree bark layers of *Cassia fistula* tree. *International journal of environmental science and development*, 2016, vol. 7, no. 5, pp. 385–388. <https://doi.org/10.7763/IJESD.2016.V7.805>

Schelle E., Rawlins B. G., Lark R.M. [et al.] Mapping aerial metal deposition in metropolitan areas from tree bark: a case study in Sheffield, England. *Environmental Pollution*, 2008, vol. 155, iss. 1, pp. 164–173 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.10.036>.

Marmor L., Randlane T. Effects of road traffic on bark pH and epiphytic lichens in Tallinn. *Folia Cryptog. Estonica, Fasc*, 2007, vol. 43, pp. 23–37.

Santamaría J. M., Martín A. Tree bark as a bioindicator of air pollution in Navarra, Spain. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1997, vol. 98, pp. 381–387.

Swislawski P., Kriz J., Rajfur M. The Use of Bark in Biomonitoring Heavy Metal Pollution of Forest Areas on the Example of Selected Areas in Poland. *Ecological Chemistry and Engineering S.*, 2020, vol. 27, no. 2, pp.1–16. <https://doi.org/10.2478/eces-2020-0013>

Costagliola P. et al. Tree barks as environmental biomonitors of metals – the example of mercury. *Journal of Environmental Science and Allied Research*, 2017, vol.1, iss. 1, pp.11–18. <https://doi.org/10.29199/ESAR.101012>

Faggi A. M., Fujiwara F., Anido C., Perelman P.E. Use of tree bark for comparing environmental pollution in different sites from Buenos Aires and Montevideo. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, vol. 178, pp. 237–245.

Veselkin D.V. Urbanization increases the range, but not the depth, of forest edge influences on *Pinus sylvestris* bark pH. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2023, vol. 79, 127819. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127819>

Zhang Y., Xiang Y.B., Chen W.Y. Heavy metal content in the bark of *Camphora* tree in Xiangtan and its environmental significance. *Applied ecology and environmental research*, 2019, vol. 17, no. 4, pp. 9827–9835. https://doi.org/10.15666/aecer/1704_98279835

Сведения об авторах

Information about the authors

Клевцова Марина Александровна
кандидат географических наук,
доцент кафедры геоэкологии и мониторинга
окружающей среды
Воронежский государственный университет
Россия, 394018, г. Воронеж,
Университетская пл., 1
e-mail: klevtsova@geogr.vsu.ru

Klevtsova Marina Alexandrovna
Candidate of Sciences (Geography),
Associate Professor at the Department of
Geoecology and Environmental Monitoring,
Voronezh State University,
1 Universitetskaya pl., Voronezh, 394018,
Russian Federation
e-mail: klevtsova@geogr.vsu.ru

Седых Владислав Александрович
аспирант, кафедра геоэкологии и
мониторинга окружающей среды
Воронежский государственный университет
Россия, 394018, г. Воронеж,
Университетская пл., 1
e-mail: vladsedykh48@mail.ru

Sedykh Vladislav Alexandrovich
Postgraduate, Department of Geoecology and
Environmental Monitoring
Voronezh State University
1, Universitetskaya square, Voronezh, 394018,
Russian Federation
e-mail: vladsedykh48@mail.ru