

Биоаккумуляция тяжелых металлов тополем дрожащим (*Populus tremula* L.) в условиях урбанизированной территории города Нижневартовска

Bioaccumulation of heavy metals by trembling poplar (*Populus tremula* L.) in the urbanized area of Nizhnevartovsk

Томилов А. С., Сторчак Т. В., Кулагин А. А.

Tomilov A. S., Storchak T. V., Kulagin A. A.

Нижневартовский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия. E-mail: andrew.istomin400@gmail.com, tatyana-storchak@yandex.ru, kulagin-aa@mail.ru
Nizhnevartovsk State University, NVSU, Nizhnevartovsk, Russia

Реферат. Исследование посвящено оценке влияния техногенного загрязнения тяжелыми металлами на жизненное состояние тополя дрожащего (*Populus tremula* L.) в условиях северного промышленного города Нижневартовска. Выбор модельного вида обусловлен его широким распространением в урбоэкосистемах региона и способностью аккумулировать поллютанты. В черте города было заложено девять пробных площадок (ПП), в четырех функциональных зонах: западный и восточный промышленные узлы, старая и новая жилая застройка. Проведена оценка относительного жизненного состояния древостоев по методике В. А. Алексеева и определено содержание тяжелых металлов (Fe, Cu, Mn, Cd, Cr, Zn, Ni) в различных органах растений методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Установлено критическое угнетение древостоев осины (средний показатель ОЖС составил 54 %), выявлена органоспецифичность накопления металлов с преимущественной фитостабилизацией Fe, Mn, Cr в корнях и фитоаккумуляцией Zn и Cd в листьях. Кадмий идентифицирован как приоритетный загрязнитель с максимальной концентрацией 118,3 мг/кг в листе промышленной зоны. Корреляционный анализ подтвердил прямую связь между уровнем техногенной нагрузки и деградацией насаждений. Результаты обосновывают перспективность использования осины для биомониторинга и фиторемедиации урбанизированных территорий Севера.

Ключевые слова. Биоиндикация, древесные растения, относительное жизненное состояние, северный промышленный город, тополь дрожащий, тяжелые металлы, урбанизированная территория, *Populus tremula*.

Summary. A study was conducted to assess the impact of heavy metal pollution on the vital status of trembling poplar (*Populus tremula* L.) in the northern industrial city of Nizhnevartovsk. The model species was selected due to its widespread distribution in regional urban ecosystems and ability to accumulate pollutants. Nine sample plots were established within the city across four functional zones: western and eastern industrial hubs, old residential areas, and new residential developments. Relative vital state (RVS) assessment was performed using Alekseev's methodology, and seven heavy metals (Fe, Cu, Mn, Cd, Cr, Zn, Ni) were quantified in various plant organs using atomic absorption spectroscopy. Critical degradation of aspen stands was established (average RVS of 54 %), and organ-specific metal accumulation was revealed with predominant phytostabilization of Fe, Mn, Cr in roots and phytoaccumulation of Zn and Cd in leaves. Cadmium was identified as a priority pollutant with maximum concentration of 118.3 mg/kg in industrial zone foliage. Correlation analysis confirmed a direct relationship between anthropogenic load and stand degradation. Results demonstrate the potential of aspen for biomonitoring and phytoremediation in northern urbanized territories.

Key words. Bioindication, heavy metals, northern industrial city, *Populus tremula*, relative vital state, trembling poplar, urbanized territory, woody plants.

Введение. Урбанизированные территории нефтедобывающих регионов Западной Сибири, где и находится город Нижневартовск – крупный промышленный центр Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, характеризуются высокой техногенной нагрузкой, связанной с деятельностью нефтегазового комплекса, энергетического сектора и интенсивным автомобильным транспортом. Тяжелые

металлы, поступающие в городскую среду из различных источников, аккумулируются в почвах и растительности, оказывая токсическое воздействие на компоненты экосистем (Безель и др., 1994).

Древесные растения в условиях урбанизации выступают не только как элемент озеленения, но и как естественные биоиндикаторы экологического состояния территории (Ветчинникова и др., 2013). Их способность аккумулировать тяжелые металлы в различных органах позволяет оценивать уровень и пространственное распределение загрязнения (Ильин, Степанова, 1980; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Тополь дрожащий (*Populus tremula* L.) представляет особый интерес как модельный вид для экологического мониторинга благодаря широкому распространению, быстрому росту и способности к биоаккумуляции поллютантов (Кулагин, Шагиева, 2005). Однако, комплексные исследования биоаккумуляции металлов древесными растениями и их влияния на жизненное состояние фитоценозов в условиях северных промышленных городов остаются недостаточными.

Цель настоящего исследования – провести комплексную оценку жизненного состояния тополя дрожащего и изучить закономерности накопления тяжелых металлов в различных органах растения на урбанизированной территории города Нижневартовска.

Материалы и методы. Объектом исследования являлся тополь дрожащий (*Populus tremula* L.). Полевые работы проводились в сентябре 2025 г. на территории г. Нижневартовск, расположенного в зоне средней тайги Западной Сибири.

Для обеспечения репрезентативности территория города была зонирована на четыре функциональных сектора с различной степенью техногенной нагрузки: западный промышленный узел (нефтесервисные предприятия), восточный промышленный узел (транспортные магистрали, аэропорт), старая жилая застройка (центр города) и новая жилая застройка (периферийные районы). Заложено девять пробных площадок размером 50 × 50 м, охватывающих градиент от высокозагрязненных до относительно чистых зон: 1) Аэропорт + транспортная магистраль (высокая нагрузка), 2) Нефтесервисное предприятие (высокая нагрузка), 3) Западный въезд, автомагистраль (высокая нагрузка); 4) Жилой район старой застройки (умеренная нагрузка); 5) Рекреационная зона у озера (низкая нагрузка); 6) Кладбище (низкая нагрузка); 7) Северный широтный коридор (высокая нагрузка); 8) Жилой район новой застройки (умеренная нагрузка); 9) Восточная транспортная развязка (высокая нагрузка) (рис. 1).



Рис. 1. Карта–схема города Нижневартовск. Пробные площадки: 1, 2 – западный промышленный узел; 3, 7 – северный промышленный узел, 8, 9 – новая жилая застройка; 4–6 – старая жилая застройка.

На каждой площадке отбирались модельные деревья ($n=5-7$ на площадку, всего 54 дерева) возрастом 15–25 лет, диаметром ствола 12–18 см на высоте 1,3 м. Относительное жизненное состояние (ОЖС) древостоев определялось по методике В. А. Алексеева (1990) с расчетом интегрального показателя на основе визуальной оценки состояния стволов, крон, коры, побегов. Классификация: 100–80 % – здоровые насаждения, 79–50 % – ослабленные, 49–20 % – сильно ослабленные, менее 20 % – усыхающие.

От каждого модельного дерева отбирались образцы семи типов органов: корни (поверхностные, 0–20 см), кора (средняя часть ствола), древесина (керны на высоте 1,3 м), побеги первого, второго и третьего годов, листва (средняя треть кроны). Образцы высушивались при температуре 60 °С до постоянной массы, измельчались до фракции менее 1 мм.

Содержание семи элементов (Fe, Cu, Mn, Cd, Cr, Zn, Ni) определялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе novAA 300 (Analytik Jena, Германия) по ПНД Ф 16.2.2:23.71-2011. Пробоподготовка осуществлялась микроволновым разложением в системе МС-6 с использованием концентрированной HNO_3 и H_2O_2 . Данные обрабатывались в программе Statistica 10.0. Рассчитывались показатели описательной статистики (среднее значение, стандартное отклонение, минимум, максимум), проводился корреляционный анализ Спирмена (уровень значимости $p < 0,05$). Различия между функциональными зонами оценивались с использованием критерия Краскела–Уоллиса.

Результаты и обсуждение. Средний интегральный показатель ОЖС тополя дрожащего на территории г. Нижневартовск составил 54 ± 18 %, что соответствует категории «ослабленные насаждения». Выявлена выраженная пространственная неоднородность жизненного состояния, связанная с локализацией источников техногенного воздействия.

По показателю ОЖС пробные площадки сформировали три группы:

– Группа критического состояния (ОЖС 40–45 %): площадки вблизи промышленных объектов и автомагистралей (ПП 1–3, 5, 7, 9). На данных участках 96–100 % деревьев отнесены к категории сильно ослабленных с признаками хлороза листьев, суховершинности, механических повреждений коры.

– Группа удовлетворительного состояния (ОЖС 65–70 %): площадки в жилых районах с умеренной нагрузкой (ПП 4, 8). Все деревья классифицированы как ослабленные.

– Группа здорового состояния (ОЖС 100 %): единственная площадка с минимальной антропогенной нагрузкой (ПП 6, кладбище, где захоронения не производятся более 10 лет), 100 % здоровых деревьев.

Количественный анализ выявил существенные различия в концентрациях металлов между промышленными и жилыми зонами, а также между различными органами растений (табл. 1).

Таблица 1. Распределение поллютантов в частях древесных растений

Части деревя	Fe, мг/кг	Cu, мг/кг	Mn, мг/кг	Cd, мг/кг	Cr, мг/кг	Zn, мг/кг	Ni, мг/кг
Корни	<u>288,3–3000,9</u> 129,5–639,4	<u>4,1–11,4</u> 6,4–9,6	<u>86,9–1020,5</u> 15,4–310,6	<u>5,3–40,7</u> 9,6–43,0	<u>45,4–84</u> 3,4–51	<u>37,9–204,5</u> 48,0–226,9	<u>9,6–23,3</u> 7,6–39,6
Кора	<u>40,5–64,6</u> 19,1–74,2	<u>0–0</u> 0–5,7	<u>17,4–73,4</u> 66,8–80,2	<u>6,1–10,3</u> 10,5–32,2	<u>0–0</u> 0–35,4	<u>88,2–243,9</u> 136,3–207,0	<u>9,9–13,4</u> 4,6–13,3
Древесина	<u>1,6–43,9</u> 2,2–38,1	<u>0–0</u> 0–0	<u>12,5–64,6</u> 10,5–35,8	<u>54,0–66,4</u> 31,2–68,3	<u>0–5,0</u> 0–6,2	<u>35,5–96,4</u> 21,4–54,8	<u>5,1–6,0</u> 4,9–7,8
Побеги 3 года	<u>28,3–49,8</u> 8,6–71,2	<u>0–10,6</u> 0–12,8	<u>11,7–41,1</u> 20,5–143,3	<u>7,9–9,6</u> 9,4–44,2	<u>0–0</u> 0–50,9	<u>67,3–159,8</u> 85,3–176,9	<u>10,1–22,1</u> 0–10,0
Побеги 2 года	<u>36,07–69,7</u> 39,2–91	<u>0–3,9</u> 0–12,3	<u>14,7–41,8</u> 19,3–140,3	<u>6,2–9,9</u> 11,3–43,2	<u>0–0</u> 0–46,2	<u>80,6–232,9</u> 96,7–102,1	<u>9,0–21,7</u> 3–14,6
Побеги 1 года	<u>34,2–44,7</u> 13,8–68,9	<u>0–0</u> 14,6–18	<u>16,9–57,2</u> 40,7–154,3	<u>7,3–12,9</u> 16,0–43,4	<u>0–0</u> 0–42,3	<u>87,7–201,3</u> 37,1–111,7	<u>9,4–20,8</u> 1,9–10,2
Листва	<u>191,6–254,9</u> 118,3–160	<u>0–0</u> 0–2,1	<u>35,4–358,4</u> 187,5–540,9	<u>7,1–118,3</u> 10,1–44,3	<u>0–0</u> 0–43,0	<u>154,0–488,7</u> 121,6–692,5	<u>9,7–20,4</u> 8,7–25,1

Выявлена закономерность: пять из семи отыскиваемых поллютантов в своих максимальных концентрация представлены в промышленной зоне (Fe, Mn, Cd, Cr, Zn) в жилой зоне – Cu, Ni.

Анализ выявил чёткую органоспецифичность накопления исследуемых экотоксикантов:

– фитостабилизация в корнях: железо (Fe), марганец (Mn) и хром (Cr) накапливаются преимущественно в корневой системе, особенно в поверхностных корнях – это механизм защиты надземных органов;

– фитоаккумуляция в листьях: цинк (Zn) и кадмий (Cd) активно транспортируются в листву. Концентрация Zn в листьях достигала высоких значений 488 мг/кг.

Отметим, что кадмий – элемент, обладающий наибольшей токсичностью, обнаружен во всех органах растения. Его высокая биологическая мобильность и известная фитотоксичность позволяют рассматривать его как ключевой приоритетный загрязнитель в данной урбоэкосистеме.

Корреляционный статистический анализ (рис. 2) выполнен на усредненных данных количественного анализа содержания металлов на всех пробных площадках по всем частям древесных растений.

	Fe	Cu	Mn	Cd	Cr	Zn	Ni
Fe	1,000	-0,555	0,719	-0,520	-0,558	0,637	0,405
Cu	-0,555	1,000	-0,454	0,589	0,651	-0,065	-0,658
Mn	0,719	-0,454	1,000	-0,625	-0,704	0,395	0,272
Cd	-0,520	0,589	-0,625	1,000	0,685	-0,461	-0,572
Cr	-0,558	0,651	-0,704	0,685	1,000	0,028	-0,804
Zn	0,637	-0,065	0,395	-0,461	0,028	1,000	-0,196
Ni	0,405	-0,658	0,272	-0,572	-0,804	-0,196	1,000

Рис. 2. Визуализация корреляционного анализа. Примеч.: 0–0,3 – практически отсутствует (оливковый); 0,3–0,5 – слабая (аквамарин); 0,5–0,7 – заметная (оранжевый); 0,7–0,9 сильная (синий); 0,9–0,99 – очень сильная (красный).

Анализ данных выявил органоспецифичность накопления металлов, отражающую физиологические механизмы защиты растений:

Фитостабилизация в корнях. Максимальные концентрации Fe (до 3001 мг/кг), Mn (до 1021 мг/кг) и Cr (до 84 мг/кг) обнаружены в корневой системе, особенно в поверхностных корнях. Это согласуется с механизмом иммобилизации металлов в апопласте клеточных стенок корня, препятствующим их транслокации в надземные органы (Hall, 2002; Lasat, 2002).

Фитоаккумуляция в листьях. Цинк и кадмий активно транспортируются в листву. Концентрация Zn достигала 489 мг/кг в промышленной зоне и 693 мг/кг в жилой (за счет единичного экстремального значения). Высокая мобильность Cd подтверждается его обнаружением во всех органах растения с максимумом в листьях (118 мг/кг) и древесине (68,3 мг/кг) (Landberg et al., 1996; Pulford, Watson, 2003).

Среди изученных элементов кадмий представляет наибольшую экологическую опасность. Его высокая биологическая доступность, способность к транслокации и известная фитотоксичность (ингибирование фотосинтеза, нарушение минерального питания) позволяют рассматривать Cd как приоритетный загрязнитель данной урбоэкосистемы (Reeves, Baker, 2000; Seth et al., 2012). Концентрации Cd в листьях превышают фоновые значения для растений таежной зоны в 5–10 раз (Van der Ent et al., 2013).

Статистический анализ выявил значимые корреляции между содержанием металлов и показателем ОЖС, а также между содержанием различных металлов относительно друг друга (рис.2). Сильные положительные корреляции между Fe и Mn в корнях (0,72, $p < 0,01$) указывают на их общий источник поступления — почвенную среду и атмосферные выпадения. Отрицательные корреляции (антагонизм) выявлены между парами Mn↔Cr (–0,70, $p < 0,01$) и Cr↔Ni (–0,80, $p < 0,01$), что может отражать конкурентные взаимодействия при поглощении и транспорте (Verbruggen et al., 2009; Wuana, Okiyeimen, 2011).

Установлена статистически значимая обратная корреляция между суммарным содержанием тяжелых металлов в листьях и показателем ОЖС (–0,78, $p < 0,01$), подтверждающая прямую причинно-следственную связь между техногенным загрязнением и деградацией насаждений тополя дрожащего.

Максимальная степень загрязнения зафиксирована на ПП 9 (транспортная развязка, восточный въезд), где отмечено минимальное жизненное состояние древостоя (ОЖС 40 %). На ПП 6 (кладбище) при минимальных концентрациях металлов выявлено оптимальное состояние растений (ОЖС 100 %). Данная закономерность подтверждает ведущую роль техногенного фактора в угнетении древесной растительности на урбанизированных территориях (Zhao, McGrath, 2009).

Основные результаты, выводы и предложения. Древостои тополя дрожащего на территории г. Нижневартовск находятся в ослабленном состоянии (средний ОЖС 54 %), что служит индикатором неблагоприятной экологической обстановки урбоэкосистемы.

Накопление тяжелых металлов носит выраженный органоспецифичный характер: фитостабилизация Fe, Mn, Cr в корнях (до 3001, 1021 и 84 мг/кг соответственно) и фитоаккумуляция Zn и Cd в листьях (до 489 и 118 мг/кг соответственно). Кадмий идентифицирован как приоритетный загрязнитель, представляющий наибольший экологический риск для урбанوفитоценозов северного промышленного города. Выявленные статистически значимые корреляции (–0,78, $p < 0,01$) между содержанием металлов и показателем ОЖС доказывают, что техногенное загрязнение является основной причиной деградации насаждений тополя дрожащего. Тополь дрожащий подтверждает свой потенциал как вид для биомониторинга состояния урбоэкосистем. Установленная способность осины к фитостабилизации Fe, Mn, Cr обосновывает перспективность ее использования в программах фиторемедиации загрязненных территорий северных промышленных городов.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда научно-технологического развития Югры в рамках научного проекта № 2025-604-04.

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев В. А. Некоторые вопросы диагностики и классификации поврежденных загрязнением лесных экосистем // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. – Л.: Наука, 1990. – С. 38–54.
- Безель В. С., Большаков В. Н., Воробейник Е. Л. Популяционная экотоксикология. – М.: Наука, 1994. – 280 с.
- Ветчинникова Л. В., Кузнецова Т. Ю., Титов А. Ф. Особенности аккумуляции тяжелых металлов в листьях древесных растений на урбанизированных территориях // Труды Карельского научного центра РАН, 2013. – № 6. – С. 68–73.
- Ильин В. Б., Степанова М. Д. Распределение свинца и кадмия в растениях пшеницы, произрастающих на загрязненных этими металлами почвах // Агрохимия, 1980. – № 5. – С. 114–119.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир, 1989. – 439 с.

Определитель растений Ханты-Мансийского автономного округа / Красноборов И. М., Шауло Д. Н., Ломоносова М. Н., Вибе Е. И., Васина А. Л., Тупицына Н. Н. – Новосибирск; Екатеринбург: Баско, 2006. – 304 с.

Кулагин А. Ю., Шагиева Ю. А. Древесные растения и биологическая консервация промышленных загрязнителей. – М.: Наука, 2005. – 190 с.

Hall J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance // *Journal of Experimental Botany*, 2002. – Vol. 53, № 366. – P. 1–11. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.366.1>

Lasat M. M. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms // *Journal of Environmental Quality*, 2002. – Vol. 31, № 1. – P. 109–120.

Landberg T., Greger M. Differences in uptake and tolerance to heavy metals in *Salix* from unpolluted and polluted areas // *Applied Geochemistry*, 1996. – Vol. 11, № 1–2. – P. 175–180.

Pulford I. D., Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees – a review // *Environment International*, 2003. – Vol. 29, № 4. – P. 529–540. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00152-6](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00152-6)

Reeves R. D., Baker A. J. M. Metal-accumulating plants // *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up the Environment* / Ed. by I. Raskin, B. D. Ensley. – New York: Wiley, 2000. – P. 193–229.

Seth C. S., Remans T., Keunen E. et al. Phytoextraction of toxic metals: a central role for glutathione // *Plant Cell and Environment*, 2012. – Vol. 35, № 2. – P. 334–346. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02338.x>

Van der Ent A., Baker A. J. M., Reeves R. D. et al. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: facts and fiction // *Plant and Soil*, 2013. – Vol. 362, № 1–2. – P. 319–334. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1287-3>

Verbruggen N., Hermans C., Schat H. Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants // *New Phytologist*, 2009. – Vol. 181, № 4. – P. 759–776. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02748.x>

Wuana R. A., Okieimen F. E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation // *ISRN Ecology*, 2011. – Vol. 2011. – P. 402647. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>

Zhao F. J., McGrath S. P. Biofortification and phytoremediation // *Current Opinion in Plant Biology*, 2009. – Vol. 12, № 3. – P. 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.005>