

**Зольность и содержание металлов в тканях листьев
Betula pendula Roth в условиях городской среды
(на примере проспекта Карла Маркса города Новосибирска)**

**Ash and metal content in leaf tissues of *Betula pendula* Roth in urban
environments: Novosibirsk case (Marx Avenue)**

Захарова Л. А.

Zakharova L. A.

Новосибирский государственный педагогический университет, г. Новосибирск, Россия. E-mail: zakharova1904@mail.ru
Novosibirsk State Pedagogical University, Novosibirsk, Russia

Реферат. Древесные растения, произрастающие на территории крупных промышленных городов, безусловно подвержены влиянию металлосодержащих выбросов. При этом основным органом, ответственным за поглощение и аккумуляцию поллютантов, у данной группы растительных организмов является лист. В работе впервые проведено изучение зольности и содержания металлов (ванадий, кобальт, медь, мышьяк, никель, свинец, кадмий, марганец, цинк) в листьях растений вида *Betula pendula* Roth, произрастающих вдоль автомагистрали проспекта Карла Маркса г. Новосибирска – территории с высоко опасной экологической обстановкой (высоким экологическим риском для здоровья населения); в качестве контрольных использовали растения ул. Золотодолинская – района с условно опасной экологической обстановкой (низким экологическим риском для здоровья населения). Анализ полученных результатов свидетельствует о наличии достоверной прямой корреляционной зависимости между показателем зольности листьев и содержанием в их тканях большинства исследуемых металлов (за исключением кадмия, цинка и меди). Вместе с тем, можно говорить, о наличии параллельного накопления таких элементов как ванадий, кобальт, мышьяк, никель, свинец. Увеличение содержания в листьях меди сопровождается возрастанием в их тканях концентрации мышьяка, никеля и марганца. Установлено, что содержание кадмия и цинка в листьях растений на территории всех пробных площадей достоверно ниже или не отличается от контрольного значения; тогда как концентрация ванадия и свинца в аналогичных условиях всегда достоверно выше контроля. Следует отметить аномально высокую концентрацию ванадия и мышьяка в тканях листьев березы повислой на пробной площади № 2, превышающую контрольное значение в 8,5 и 22 раза соответственно. При этом величина содержания ванадия ниже уровня его растительного кларка (2,3 мг/кг), а величина содержания мышьяка превосходит его растительный кларк более чем в 10 раз (0,2 мг/кг). Это свидетельствует, с одной стороны, о достаточно высоком содержании указанных химических элементов в атмосферном воздухе пробной площади № 2, с другой – о высоком уровне поглотительной и накопительной способности тканей листьев березы повислой по отношению к мышьяку.

Ключевые слова. Береза, ванадий, городская среда, зольность, кобальт, листья, марганец, медь, мышьяк, никель, свинец, цинк.

Summary. Woody plants growing in large industrial cities are certainly exposed to metal-containing emissions. The main organ responsible for the absorption and accumulation of pollutants in this group of plants is the leaf. In this work, we have studied for the first time the ash content and metal content (vanadium, cobalt, copper, arsenic, nickel, lead, cadmium, manganese, zinc) in the leaves of *Betula pendula* Roth growing along the Karl Marx Avenue highway in Novosibirsk, an area with a highly hazardous environmental situation (high environmental risk to public health); plants from Zolotodolinskaya Street, an area with a conditionally hazardous environmental situation (low environmental risk to public health), were used as controls. The analysis of the obtained results indicates the presence of a reliable direct correlation between the ash content of leaves and the content of most of the metals studied in their tissues (except cadmium, zinc and copper). At the same time, we can talk about the presence of parallel accumulation of such elements as vanadium, cobalt, arsenic, nickel, lead. An increase in the content of copper in leaves is accompanied by an increase in the concentration of arsenic, nickel and manganese in their tissues. It was found that the content of cadmium and zinc in plant leaves in all test plots is significantly lower or does not differ from the control value; while the concentration of vanadium and lead in similar conditions is always significantly higher than the control. It should be noted that the concentration of vanadium and

arsenic in the tissues of silver birch leaves on sample plot No. 2 is abnormally high, exceeding the control value by 8.5 and 22 times, respectively. At the same time, the vanadium content is below its plant clarke (2.3 mg/kg), and the arsenic content exceeds its plant clarke by more than 10 times (0.2 mg/kg). This indicates, on the one hand, a sufficiently high content of the indicated chemical elements in the atmospheric air of sample plot No. 2, and on the other hand, a high level of absorption and accumulation capacity of silver birch leaf tissues in relation to arsenic.

Key words. Arsenic, ash content, birch, cobalt, copper, lead, leaves, manganese, nickel, urban environment, vanadium, zinc.

Введение. Древесные растения, произрастающие на территории крупных промышленных городов, безусловно подвержены влиянию металлосодержащих выбросов. При этом основным органом, аккумулирующим металлы, является лист, поскольку именно фоллиарный путь поступления загрязнителей в древесные городские растения считается основным (зона всасывания корневой системы деревьев расположена на большой глубине, в то время как загрязнители, поступающие в почву из антропогенных источников, локализуются в верхнем 5–20 см слое; именно листья нижней части кроны деревьев, адсорбируют большую часть загрязняющих веществ, входящих в состав выбросов автотранспорта), а после поглощения некоторые металлы включаются в состав в малоподвижных соединений. Микроэлементы (кобальт, медь, никель, марганец, цинк) участвуют в большинстве физиологических процессов клетки (энергетический обмен, первичный и вторичный метаболизм, гормональная регуляция, передача сигнала и др.). Следует также отметить, что 25–50 % всех белков работают только в присутствии ионов металлов, из них наибольшее количество (более 1200) функционально связаны с цинком. Физиологическое значение мышьяка и ванадия для растений остается на сегодняшний день малоизученным. Для многих металлов определена их средняя концентрация в листьях растительности; для меди, никеля и цинка установлены ПДК для растений; рассчитаны растительные кларки для ванадия и мышьяка.

На территории г. Новосибирска проводились работы по исследованию влияния городской среды на состояние аборигенных и интродуцированных древесных растений (Барахтенова, Захарова, 2005; Захарова, 2011, 2021; Артамонова, 2011), дикорастущих (Зубарева и др., 2011) и декоративных (Седельникова, Цандекова, 2015) травянистых растений, почвенных водорослей (Бачура, Благодатнова, 2015). Однако изучение содержания металлов в листьях растений вида *Betula pendula* Roth, повсеместно используемого в озеленении г. Новосибирска, не осуществлялось. Вместе с тем, согласно литературным данным (Кузнецова, 2009; Еремеева, Денисова, 2011; Ташекова, Торопов, 2017), растения данного вида в условиях аэротехногенного загрязнения обладают высокой аккумулярующей способностью.

Цель работы: изучить зольность и содержание металлов в тканях листьев растений *B. pendula*, произрастающих вдоль автомагистрали проспекта Карла Маркса г. Новосибирска.

Материалы и методы. Исследовали растения, произрастающие вдоль автомагистрали проспекта Карла Маркса Ленинского района г. Новосибирска, относящегося согласно данным «Интегральной экологической карты Новосибирска» к территориям с высоко опасной экологической обстановкой (высокий экологический риск для здоровья населения). Исследуемая автомагистраль характеризуется повышенной интенсивностью движения автотранспорта, при юго-западном направлении ветра (преобладающем на территории Новосибирской области) подвергается воздействию выбросов большинства предприятий, расположенных в Ленинском районе города. Закладку пробных площадей реализовывали согласно МУ 2.1.7.730-99: с учетом протяженности автомагистрали проспекта Карла Маркса (≈ 1500 м) было заложено 4 пробные площади. В качестве контрольных (фоновых) условий была выбрана ул. Золотодолинская (Советский район г. Новосибирска, Академгородок); согласно данным «Интегральной экологической карты Новосибирска» – район с условно опасной экологической обстановкой (низкий экологический риск для здоровья населения). В качестве биообъекта использовали березу повислую (*B. pendula*). Исследовали растения в конце вегетации (стадия «начало пожелтения», конец августа): в одно время суток (утренние часы), в аналогичных погодных условиях брали побеги из нижней части кроны, обращенной в сторону автомагистрали (с учетом розы ветров). Биологическая повторность равнялась пяти. Для биохимического анализа использовали средние пробы (ГОСТ 24.027.0-80) обеспыленных листьев. Зольность определяли согласно ГОСТ 13973.6-69, содержание металлов (ванадий, кобальт, медь, мышьяк, никель, свинец, кадмий, марганец, цинк) – методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Статистическую обработку данных осуществляли стандартными

методами: рассчитывали среднюю арифметическую (M), стандартную ошибку средней арифметической (m), оценки значимости различий средних арифметических по критерию t Стьюдента, коэффициент корреляции (r).

Результаты и обсуждение. Косвенным показателем, характеризующим уровень загрязнения атмосферы поллютантами, содержащими зольные элементы, может служить зольность листьев. Растения березы повислой по величине указанного показателя в сравнении с контролем можно расположить в следующий ряд: растения пробной площади № 4 (достоверно не отличается от уровня контроля) < растения пробной площади № 1 (136 % от уровня контроля) < растения пробной площади № 3 (146 % от уровня контроля) < растения пробной площади № 2 (157 % от уровня контроля).

Содержание металлов в тканях листьев березы повислой, произрастающей вдоль автомагистрали проспекта Карла Маркса, представлено в таблице 1.

Таблица 1

Содержание металлов в тканях листьев березы повислой, произрастающей в различных условиях г. Новосибирска (в сравнении с их средними концентрациями в листьях растительности и ПДК для растений)

Хим. эл.	Условия произрастания					Средняя конц. в листьях, мг/кг	ПДК для растений, мг/кг
	пробная площадь № 1	пробная площадь № 2	пробная площадь № 3	пробная площадь № 4	контроль		
V	$0,56^* \pm 0,010$ 350,0	$1,40^* \pm 0,024$ 875,0	$0,82^* \pm 0,015$ 512,5	$0,53^* \pm 0,012$ 331,3	$0,16 \pm 0,020$	0,2–1,5	–
Co	$0,20^* \pm 0,001$ 142,9	$0,32^* \pm 0,003$ 228,6	$0,21^* \pm 0,001$ 150,0	$0,13 \pm 0,010$ 92,6	$0,14 \pm 0,001$	0,02–1,00	–
Cu	$5,30 \pm 0,206$ 94,6	$7,20^* \pm 0,120$ 128,6	$4,30^* \pm 0,084$ 76,8	$3,30^* \pm 0,060$ 58,9	$5,60 \pm 0,102$	5–30	15–20
As	$0,10 \pm 0,001$ 100,0	$2,20^* \pm 0,030$ 2200,0	$0,10 \pm 0,001$ 100,0	$0,10 \pm 0,002$ 100,0	$0,10 \pm 0,001$	1,0–1,7	–
Ni	$1,60^* \pm 0,020$ 123,1	$2,90^* \pm 0,042$ 223,1	$1,70^* \pm 0,024$ 130,8	$0,95^* \pm 0,020$ 73,1	$1,30 \pm 0,011$	0,1–5,0	20–30
Pb	$1,00^* \pm 0,02$ 185,2	$1,60^* \pm 0,03$ 296,3	$1,10^* \pm 0,01$ 203,7	$1,10^* \pm 0,02$ 203,7	$0,54 \pm 0,01$	5–10	–
Cd	$0,05 \pm 0,001$ 100,0	$0,05 \pm 0,002$ 100,0	$0,05 \pm 0,001$ 100,0	$0,05 \pm 0,002$ 100,0	$0,05 \pm 0,001$ 100,0	0,05–0,20	–
Mn	$301,00^* \pm 6,01$ 218,1	$263,00^* \pm 5,26$ 190,6	$175,00^* \pm 3,44$ 126,8	$45,00^* \pm 0,84$ 32,6	$138,00 \pm 2,75$	20–300	–
Zn	$41,00^* \pm 0,82$ 45,6	$57,00^* \pm 1,12$ 63,3	$77,00^* \pm 1,54$ 85,6	$29,00^* \pm 0,58$ 32,2	$90,00 \pm 1,76$	27–150	150–300

Примеч.: числитель – мг/кг воздушно-сухой массы ($M \pm m$); знаменатель – процент от контроля; * – достоверное различие в сравнении с контролем ($p \leq 0,05$); темной заливкой выделено значение показателя выше средней концентрации в листьях.

В тканях листьев березы повислой на территории пробной площади № 2 содержание **семи** из девяти исследуемых химических элементов превышает уровень контроля (ванадий, кобальт, медь, мышьяк, никель, свинец, марганец), при этом для шести из них зафиксированы максимальные значения (ванадий, кобальт, медь, мышьяк, никель, свинец), в то время как содержание цинка ниже фона. В тканях листьев березы повислой, произрастающей на территории пробной площади № 1 содержание **пяти** из девяти исследуемых металлов превышает уровень контроля (ванадий, кобальт, никель, свинец, марганец), при этом марганец зарегистрирован в максимальной концентрации, а содержание микроэлемента цинка ниже фона. В тканях листьев березы повислой, произрастающей на территории пробной площади № 3 содержание также **пяти** из девяти исследуемых металлов превышает уровень контроля (ванадий, кобальт, никель, свинец, марганец), однако, максимальной концентрации ни для одного из исследуемых металлов отмечено не было, а содержание двух микроэлементов (медь и цинк) ниже фонового значения. В тканях листьев березы повислой, произрастающей на территории пробной площади № 4 содержание **двух** из девяти исследуемых металлов превышает уровень контроля (вана-

дий, свинец), однако, максимальной концентрации также ни для одного из исследуемых металлов отмечено не было, в то время как содержание четырех микроэлементов (медь, никель, марганец, цинк) ниже фонового значения, при этом их концентрация минимальна. Следует отметить, что максимальное значение микроэлемента цинка зафиксировано в тканях листьев березы повислой, произрастающей в условиях контроля. Анализ вышеизложенного позволяет расположить растения березы повислой по уровню накопления в тканях их листьев исследуемых химических элементов в следующий ряд (максимальная концентрация металла в сравнении с контролем): растения пробной площади № 4 (V, Pb) < растения пробной площади № 3 (V, Co, Ni, Pb, Mn) < растения пробной площади № 1 (V, Co, Ni, Pb, Mn) < растения пробной площади № 2 (V, Co, Cu, As, Ni, Pb, Mn). Можно предположить, что последовательность расположения пробных площадей по мере возрастания уровня загрязнения атмосферы в сравнении с контролем будет аналогичной (от меньшего к большему): пробная площадь № 4 < пробная площадь № 3 < пробная площадь № 1 < пробная площадь № 2. Следует отметить аномально высокую концентрацию ванадия и мышьяка в тканях листьев березы повислой на пробной площади № 2, превышающую контрольное значение в 8,5 и 22 раза соответственно. При этом величина содержания ванадия ниже уровня его растительного кларка (2,3 мг/кг), а величина содержания мышьяка превосходит его растительный кларк более чем в 10 раз (0,2 мг/кг). Это свидетельствует, с одной стороны, о достаточно высоком содержании указанных химических элементов в атмосферном воздухе пробной площади № 2, с другой – о высоком уровне поглотительной и накопительной способности тканей листьев березы повислой по отношению к мышьяку.

Вместе с тем, исследуемые металлы по уровню их содержания в тканях листьев березы повислой на территории разных пробных площадей можно подразделить на следующие группы: 1 группа (кадмий, цинк) – металлы, содержание которых в тканях листьев березы повислой на территории **всех** пробных площадей достоверно ниже, либо достоверно не отличается от контрольного значения; 2 группа (ванадий, свинец) – металлы, содержание которых в тканях листьев березы повислой на территории **всех** пробных площадей достоверно выше контроля.

Сопоставление полученных цифровых данных с величиной их ПДК для растений косвенно характеризует уровень загрязнения (фитотоксичности) окружающей среды медь-, никель- и цинксодействующими поллютантами как низкий.

Сравнение уровня содержания исследуемых химических элементов в тканях листьев березы повислой с диапазоном их средних концентраций в листьях для растительности показало, что большинство из них не выходят за пределы указанных значений. Исключение составляют свинец и мышьяк, содержание которых в условиях контроля и на территории **всех** (свинец) или большинства (мышьяк) пробных площадей ниже величины их средней концентрации в листьях для растительности. При этом уровень мышьяка в тканях листьев березы повислой пробной площади № 2 в 1,3 раза превышает верхние границы диапазона его средней концентрации в листьях растительности. Это свидетельствует о том, что атмосфера пробной площади № 2 загрязнена мышьяком в концентрациях, являющихся фитотоксичными.

Результаты проведенного корреляционного анализа подтверждают наличие статистически значимой корреляционной связи между некоторыми показателями состава листьев березы повислой, произрастающей в различных условиях. В частности, повышение зольности листьев березы повислой, произрастающей вдоль автомагистрали проспекта Карла Маркса, сопровождается достоверным увеличением содержания в листьях **всех** исследуемых металлов за исключением меди и цинка. Это еще раз подтверждает известный факт (Зубарева и др., 2011) о том, что в условиях загрязнения выбросами автотранспорта зольность листового аппарата растений преимущественно повышается за счет накопления элементов-поллютантов, а не элементов-биофилов. Вместе с тем, можно говорить, о наличии параллельного накопления таких элементов как ванадий, кобальт, мышьяк, никель, свинец. Увеличение содержания в листьях меди сопровождается возрастанием в их тканях концентрации мышьяка, никеля и марганца.

Таким образом, результаты фитоиндикации состояния атмосферного воздуха вдоль автомагистрали ул. «Проспект им. К. Маркса» с помощью растений березы повислой свидетельствуют о максимальной фитотоксичности пробной площади № 2. Лимитирующим параметром состояния окружающей среды может служить концентрация в тканях листьев березы повислой мышьяка, величина которой превышает не только фоновое значение, но и среднюю концентрацию в листьях растительности, а также растительный кларк.

Благодарности. Автор выражает благодарность С. А. Недовесовой за участие в экспериментальной части работы на этапе определения зольности листьев исследуемых растений.

ЛИТЕРАТУРА

- Артамонова С. Ю.** Экология городов: анализ и оценка с помощью РФА-СИ на примере Новосибирска // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2011. – № 11. – С. 66–71.
- Барахтенова Л. А., Захарова Л. А.** Изменчивость обмена веществ и повреждаемость аборигенных и интродуцированных видов рода *Salix* L. в условиях аэротехногенного загрязнения // Сибирский экологический журнал, 2005. – Т. 12, № 4. – С. 763–769.
- Бачура Ю. М., Благодарнова А. Г.** Фитоценотическая структура группировок почвенных водорослей и цианобактерий городских газонов (на примере г. Новосибирска и г. Гомеля) // Вестник Новосибирского государственного педагогического университета, 2015. – № 3 (25). – С. 82–93.
- Еремеева В. Г., Денисова Е. С.** Газоустойчивость древесных растений Западной Сибири // Сибирский экологический журнал, 2011. – № 2. – С. 263–271.
- Захарова Л. А.** Использование зольности в качестве индикационного показателя условий произрастания древесных растений // Биологическая наука и образование в педагогических вузах: Материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. (31 марта–02 апреля 2011 г.). – Т. 7. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного педагогического университета, 2011. – С. 170–172.
- Захарова Л. А.** Фитоиндикация загрязнения воздуха выбросами автотранспорта по показателям зольности березы повислой // Экологические чтения–2021: Материалы XII национальной науч.-практ. конф. с междун. участием (04–05 июня 2021 г.). – Омск: Изд-во Омского аграрного ун-та, 2021. – С. 220–225.
- Зубарева К. Э., Качкин К. В., Сиромля Т. И.** Влияние выбросов автомобильного транспорта на элементный состав подорожника большого // Химия растительного сырья, 2011. – № 2. – С. 159–164.
- Кузнецова Т. Ю.** Влияние тяжелых металлов на некоторые физиолого-биохимические показатели растений рода *Betula* L.: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Петрозаводск, 2009. – 23 с.
- Седельникова Л. Л., Цандекова О. Л.** Аккумулирующая способность листьев декоративных растений в городской среде // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2015. – № 7 (129). – С. 80–83.
- Ташекова А. Ж., Торопов А. С.** Использование листьев растений как биогеохимических индикаторов состояния городской среды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2017. – Т. 328, № 5. – С. 114–124.