

УДК 581.192:633.878.32(571.54)

## Изменение микроэлементного состава листьев и коры гибридов тополя в промышленном городе

### Changes in trace element composition of poplar hybrids in industrial city

Н. Е. Кошелева<sup>1</sup>, М. Ф. Дорохова<sup>1</sup>, Ф. Г. Курбанова<sup>2</sup>

N. E. Kosheleva, M. F. Dorokhova, F. G. Kurbanova

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: natalk@mail.ru; dorochova@mail.ru

<sup>2</sup>Московское городское отделение Русского географического общества, 109017, г. Москва, Старомонетный пер., 29. E-mail: Kurbanova.Fatima@rgo.ru

**Реферат.** Представлены геохимические данные, полученные в 2014 году, характеризующие широкую группу тяжелых металлов и металлоидов в коре и листьях гибридов тополей, растущих в г. Улан-Удэ (Бурятия). Обнаружена техногенная трансформация микроэлементного состава городских деревьев, а также различия в содержании микроэлементов в разных органах растений. Выявлены приоритетные загрязнители окружающей среды города.

**Summary.** Geochemical data obtained in 2014 which characterize a large group of heavy metals and metalloids in the bark and leaves of poplar hybrids growing in Ulan-Ude (Buryatia) are presented. Technogenic transformation of trace element composition of urban trees in relation to the background contents has been identified including the differences between the plant organs. Priority pollutants in the city have been discovered.

#### Введение

Гибриды тополя, используемые в озеленении г. Улан-Удэ, обладают высокой адаптационной способностью и растут во всех функциональных зонах города, включая промышленную. Это определяет актуальность изучения их микроэлементного состава для оценки экологического состояния городской среды.

Цель данной работы – выявить особенности микроэлементного состава листьев и коры гибридов тополя (род *Populus*), произрастающих в условиях промышленного города, на примере г. Улан-Удэ. Для ее достижения решались следующие задачи: 1) проанализировать микроэлементный состав листьев и коры гибридов тополя при варьировании техногенной нагрузки в разных функциональных зонах города; 2) установить различия в накоплении микроэлементов (МЭ) между ассимилирующими (листья) и многолетними (кора) органами деревьев; 3) оценить индикаторные возможности листьев и коры тополей.

Город Улан-Удэ находится в Западном Забайкалье в 100 км к востоку от озера Байкал в Иволгино-Удинской межгорной впадине, при слиянии рек Селенги и Уды. Для него характерен резко континентальный климат с большими сезонными колебаниями температур воздуха и атмосферных осадков. Среднегодовая температура воздуха составляет  $-0,1$  °С, в январе она равна  $-23,3$  °С, в июле  $+19,8$  °С; в течение года выпадает в среднем 265 мм осадков с максимальными значениями в августе. В почвенном покрове преобладают каштановые, дерновые лесные и аллювиальные почвы; в пойме р. Селенги встречаются также лугово-болотные и болотные почвы. Большие площади занимают антропогенно преобразованные почвы – урбаноземы, культуроземы (почвы огородов), индустроземы (почвы промышленных зон). В черте города сохранились фрагменты естественной лесной растительности, представленные сосняками рододендровыми, сосняками разнотравно-злаковыми и сосняками остепненными. Однако преобладают искусственно созданные сообщества скверов и газонов с доминированием гибридов тополя в древесном ярусе и большим участием рудеральных видов в составе травяного яруса.

В черте г. Улан-Удэ расположено 49 промышленных предприятий с суммарными выбросами более 30 тонн загрязняющих веществ в год (Петелин, 2010). Крупнейшими являются авиационный, силикатный, вертолетный, локомотиво-вагоноремонтный заводы, а также производство металлических изделий «Улан-Удэстальмост». Город является крупным железнодорожным узлом, через него проходит Транссибирская магистраль в Монголию и Китай. Территорию г. Улан-Удэ пересекают автомагистрали Иркутск – Улан-Удэ –

Чита и Улан-Удэ – Кяхта. Автопарк столицы Бурятии насчитывает около 800 тыс. машин. Значительный вклад в загрязнение города вносят две ТЭЦ, работающие на каменном угле и дающие огромную массу твердых отходов. Зола углей по сравнению с земной корой обогащена В, Мо, As, Be, Pb, W, Ge, Sb (Геохимия..., 1990).

### Материалы и методы

Отбор проб растительного материала на территории города проведен во второй половине июля 2014 г. с шагом 0,7–1 км (рис. 1). В этих же точках отобраны пробы почв из поверхностного (0–10 см) горизонта. Листья и кора отбирались с деревьев приблизительно одного возраста, с диаметром стволов 20–30 см. Согласно методике (Терехина, 2010), листья без черешков собирали на высоте 1,5–2,0 м по периметру кроны с нескольких деревьев. Пробы коры толщиной 1–1,5 см срезались ножом на высоте 1–1,5 м по окружности ствола, предварительно очищенного жесткой щеткой от пыли и лишайников. Всего было отобрано по 111 проб коры и листьев, из них 7 – на окраинах города, в относительно незагрязненных районах, представляющих собой местный (урбанизированный) фон.

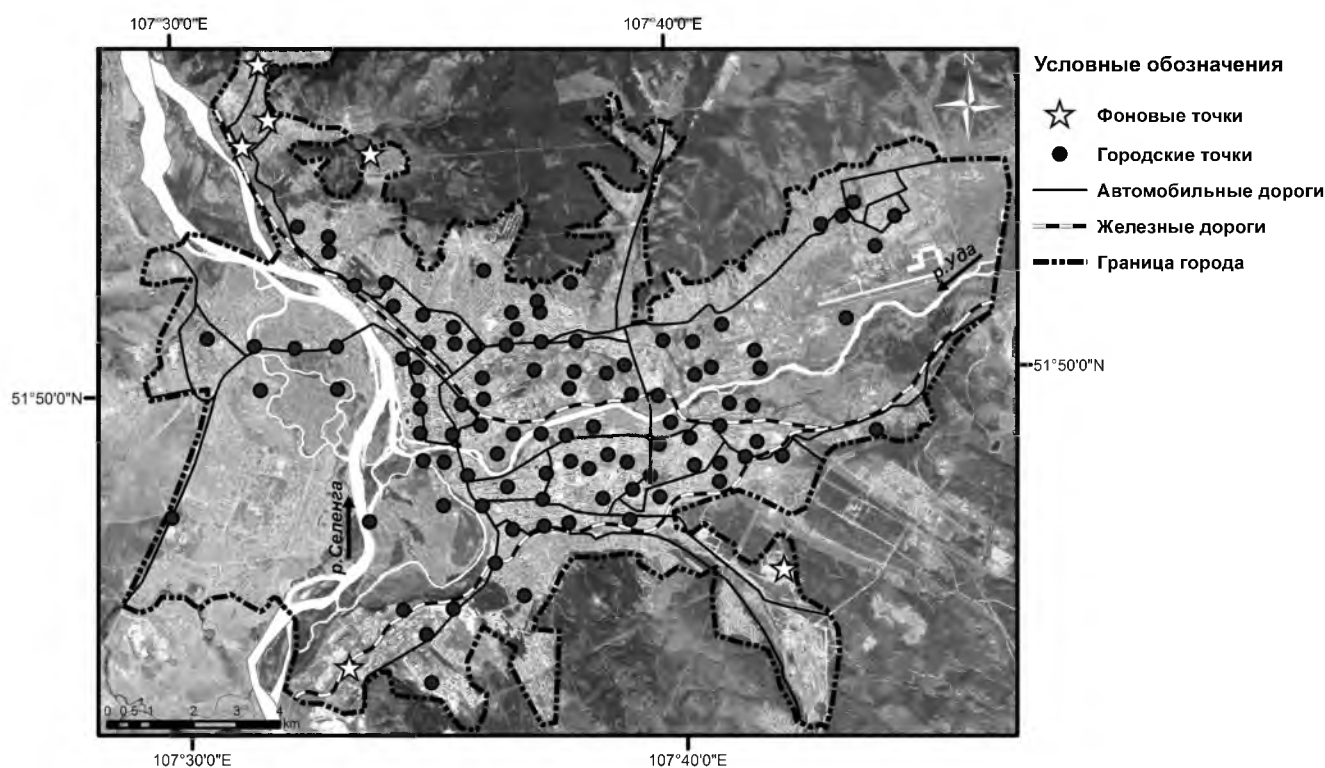


Рис. 1. Карта отбора проб (белые звездочки – фоновые точки, кружки – городские).

Так как на поверхности листьев осаждаются частицы пыли и почвы, они промывались под водопроводной водой, затем споласкивались дистиллированной (Sæbo et al., 2012). Пробы высушивались в бумажных пакетах до абсолютно сухого состояния в сушильном шкафу при +70 °С в течение 6–7 часов. МЭ в растительном материале и в почвах определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой во ВНИИ минерального сырья. Для определения зольности проведено сухое озоление растительного материала, основанное на сжигании проб с кислородом при высоких температурах (Баргальи, 2005).

Для выявления биогеохимических особенностей гибридов тополя фоновых территорий состав их листьев сравнивался со средними концентрациями МЭ в ежегодном приросте растительности суши (Добровольский, 2003). Геохимическая специализация тополей определялась формулой, в числителе которой приводятся концентрирующиеся элементы с их кларками концентрации  $KK$ , в знаменателе – деконцентрирующиеся с кларками рассеяния  $KP$ .

На основе средних содержаний МЭ в листьях и коре городских тополей для разных функциональных зон рассчитывались коэффициенты концентрации  $Kc$  и рассеяния  $Kp$ , позволяющие оценить накопление или

рассеяние МЭ по сравнению с фоном:  $Kc = Ca/C\phi$  и  $Kp = C\phi/Ca$ , где  $C\phi$ ,  $Ca$  – концентрации элемента в фоновых и городских образцах соответственно.

Различия в содержании МЭ между органами гибридов тополя характеризовались акропетальным коэффициентом (АК), который рассчитывался как отношение содержания МЭ в сухом веществе коры  $C_k$  к их содержанию в сухом веществе листьев  $C_l$ :  $AK = C_k/C_l$ .

### Результаты и обсуждение

При оценке техногенной трансформации микроэлементного состава городских растений эталоном сравнения обычно служат данные, полученные в фоновых (ненарушенных хозяйственной деятельностью) условиях. Однако в г. Улан-Удэ тополь представлен только искусственными насаждениями и практически не встречается за пределами города. В этой связи местный геохимический фон определен нами по пробам, собранным на окраинах города, где отсутствует интенсивное антропогенное воздействие. Таким образом, речь идет не о природном, а об урбанизированном фоне. Для выявления геохимических особенностей состава гибридов тополя в городских посадках на территории Улан-Удэ содержание МЭ в их листьях сопоставлялось с микроэлементным составом ежегодного прироста растительности суши (Добровольский, 2003) и со средним содержанием в *Populus nigra*, произрастающем в фоновых условиях в Европе (Djingova et al., 2004) (табл. 1).

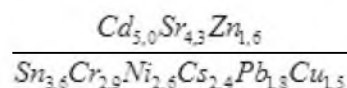
Таблица 1

Среднее содержание МЭ (мкг/г сухого вещества) в листьях гибридов тополя урбанизированного фона г. Улан-Удэ в сравнении с глобальными кларками

Показатели	Cd	Sr	Zn	Co	Mo	Pb	Ni	Cu	Sb	Cr	Sn	Cs	W
Фон, г. Улан-Удэ	0,20	150	48,2	0,56	0,40	0,70	0,76	5,25	0,02	0,62	0,07	0,05	0,03
Глобальные кларки <sup>а)</sup>	0,04	35,0	30,0	0,50	0,50	1,25	2,00	8,00	н.д.	1,80	0,25	0,12	н.д.
Содержание в листьях <i>Populus nigra</i> <sup>б)</sup>	0,20	118	н.д.	0,70	н.д.	1,25	1,78	5,05	0,04	0,40	н.д.	0,10	н.д.

<sup>а)</sup> в ежегодном приросте растительности суши по (Добровольский, 2003); <sup>б)</sup> по данным (Djingova et al., 2004); н.д. – нет данных.

Биогеохимическая формула для листьев тополей урбанизированного фона г. Улан-Удэ относительно кларков В.В. Добровольского (2003) имеет вид:



Она показывает выраженное накопление в листьях Cd и Sr. Микроэлементный состав листьев гибридов тополя в фоновых участках г. Улан-Удэ в целом сходен с таковым у *Populus nigra* в незагрязненных районах Европы, отличаясь, главным образом, несколько повышенным содержанием Sr и пониженным – Pb и Ni.

У каждого вида растения химический состав разных органов и тканей может весьма существенно различаться, что обусловлено выполняемыми ими функциями, морфологией, соотношением основных источников поступления вещества, а также физиологической ролью элементов (Ковалевский, 1969). Гибриды тополя в фоновых районах г. Улан-Удэ характеризуются разными уровнями накопления МЭ в листьях и коре. Только три МЭ из изученных нами – Cs, Cu, Cd – в листьях и коре находятся в близких концентрациях. Еще четыре – Sr, Co, Mo и Mn – максимально накапливаются в листьях, т.е. имеют базипетальный тип распределения (Сабинин, 1955). Остальные (Cr, Ni, Zn, Ge, Zr, Sn, Sb, W, Pb, Fe) наиболее интенсивно аккумулируются в коре, т.е. характеризуются акропетальным типом распределения. Накоплению МЭ в листьях препятствует биогеохимический барьер (Ковалевский, 1991), а также вымывание МЭ из листьев с дождевыми осадками, максимум которых в Улан-Удэ приходится на летний период.

Поступление МЭ от транспорта и разнообразных промышленных предприятий в окружающую среду г. Улан-Удэ вызывает изменение микроэлементного состава городских растений. По сравнению с фоновыми значениями в листьях гибридов тополя в г. Улан-Удэ содержится существенно больше W ( $Kc = 2,9$ ), Ni (2,1), Sb (1,8) при незначительном накоплении Ge (1,4), Mo (1,3) и Zn (1,3). W, Sb и Ge поступают глав-

ным образом с выбросами и отходами ТЭЦ. Производство металлических изделий и транспорт поставляют в окружающую среду г. Улан-Удэ основную массу Ni. Источником Sb, помимо сжигания угля, является также строительная индустрия (О состоянии..., 2014).

Еще более разнообразный спектр МЭ накапливается в коре гибридов тополя, растущих в городе: по сравнению с фоновыми значениями в ней существенно больше Cr ( $K_c = 4,3$ ), Ni (2,8), W (1,9), Mo (1,7). В несколько меньших количествах аккумулируются Pb ( $K_c = 1,6$ ), Sn (1,4), Cs (1,4), Ge (1,3), Sr (1,3), Cd (1,3). Основным источником Cr в окружающей среде города является производство готовых металлических изделий, Pb – ТЭЦ и строительная промышленность (О состоянии..., 2014).

Таким образом, кора городских тополей в целом характеризуется более высоким по сравнению с листьями содержанием всех МЭ, за исключением W, Sb и Zn, которые интенсивно накапливаются в листьях.

В условиях промышленного города, несмотря на повышенную аккумуляцию многих МЭ, сохраняются различия в содержаниях МЭ между листьями и корой гибридов тополя, свойственные этим деревьям на незагрязненных территориях, о чем свидетельствуют величины акропетального коэффициента (рис. 2). В листьях и коре городских тополей накапливаются те же МЭ, что и на фоновых территориях; те же МЭ в листьях и коре находятся в близких концентрациях. Однако по сравнению с урбанизированным фоном в г. Улан-Удэ кора гибридов тополя содержит существенно больше Cr, Pb и Ni, поступающих в атмосферу из антропогенных источников (рис. 2).

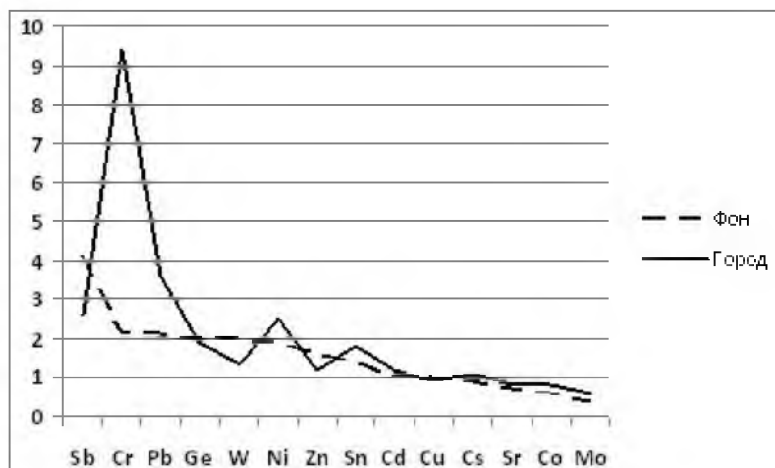


Рис. 2. Акропетальные коэффициенты микроэлементов в гибридах тополя в фоновых условиях и в г. Улан-Удэ.

Микроэлементный состав листьев (табл. 2) и коры тополей значительно варьирует в разных функциональных зонах города, что указывает на воздействие локальных источников загрязнения атмосферы. Для большинства элементов коэффициент вариации  $C_v$  составляет 25–98 %, для Ni и Cr он повышается до 200 % и более.

Максимальное накопление листьями тополя Ni ( $K_c = 8,4$ ), Sb (3,0), Sn (1,6) и Cu (1,5) приходится на транспортную зону, которая подвержена не только воздействию автомобильного транспорта, но и шлама ТЭЦ, перевозимого в открытом виде по дорогам. В листьях тополя вблизи автодорог происходит деконцентрация такого биофильного элемента, как Mn ( $K_p =$

1,6), что может свидетельствовать о ингибировании его поглощения другими МЭ. Промышленная зона отличается наибольшей биоаккумуляцией листьями тополя МЭ с высокой технофильностью: W ( $K_c = 3,9$ ), Ge (2,2), Cd (1,6), а также Zn (1,7) и Sr (1,5) и пониженным относительно фона содержанием Cr ( $K_p = 1,9$ ). В усадебной зоне в листьях накапливается максимальное количество Mo ( $K_c 1,7$ ).

В коре гибридов тополя максимальное накопление Cr ( $K_c = 8,1$ ), Ni (4,7), Mo, W (2,3), Cd (2,0) отмечается в промышленной зоне; Pb (2,0), Sn (1,9) и Ge (1,8) – в усадебной зоне; Sb (1,5) – в транспортной.

Таблица 2

Среднее содержание МЭ (мкг/г сухого вещества) в листьях гибридов тополя на территории г. Улан-Удэ

Функциональная зона (число точек)	Cd	Sr	Zn	Co	Mo	Pb	Ni	Cu	Sb	Cr	Sn	Cs	W
Рекреационная (11)	0,22	153	66,6	0,79	0,55	0,52	1,08	5,79	0,03	0,51	0,07	0,07	0,07
Усадебная (14)	0,19	204	56,3	0,37	0,69	0,58	0,65	4,98	0,04	0,45	0,07	0,04	0,06
Жилая 2-5-этажная (43)	0,19	178	55,9	0,58	0,45	0,70	1,12	5,79	0,03	0,77	0,07	0,06	0,07
Транспортная (11)	0,28	169	74,5	0,57	0,59	0,72	6,41	7,78	0,05	0,50	0,11	0,06	0,09
Промышленная (15)	0,33	224	80,8	0,52	0,46	0,80	0,92	6,53	0,03	0,33	0,07	0,05	0,10
В среднем по городу	0,23	186	62,9	0,55	0,51	0,68	1,62	5,96	0,03	0,60	0,08	0,06	0,07

Источником МЭ в коре деревьев является атмосфера, тогда как в листья МЭ поступают также из почвы (Баргальи, 2005), поэтому на накопление МЭ в листьях в большой степени влияет содержание их подвижных форм в почвах. Таким образом, элементный состав устойчивых в условиях промышленного города растений дает возможность оценить состояние, как воздушной среды, так и почвы. Полученные данные по микроэлементному составу гибридов тополя в г. Улан-Удэ позволяют выделить приоритетные загрязнители окружающей среды города – W, Sb, Cr, Ni, Mo, Cd, Pb. Кора городских тополей имеет более высокое по сравнению с листьями содержание почти всех МЭ, ее состав отражает многолетнее загрязнение атмосферы города.

### **Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-27-00083).

### **ЛИТЕРАТУРА**

- Баргальи Р.* Биогеохимия наземных растений. – М.: ГЕОС, 2005. – 457 с.
- Геохимия окружающей среды / Сост. Ю.Е. Саев, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
- О состоянии и охране окружающей среды Республики Бурятия в 2013 году: Государственный доклад. – Улан-Удэ: Издательский дом “ЭКОС”, 2014. – 134 с.
- Добровольский В. В.* Основы биогеохимии. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 400 с.
- Ковалевский А. Л.* Биогеохимия растений. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1991. – 294 с.
- Ковалевский А. Л.* Основные закономерности формирования химического состава растений // Биогеохимия растений: Труды Бурятского ин-та естеств. наук БФ СО АН СССР, 1969. – Вып. 2. – С. 6–28.
- Петелин С. М.* Улан-Удэ и Байкальский целлюлозно-бумажный завод – главные загрязнители озера Байкал // Экологические проблемы Байкальского региона: Мат-лы Респ. науч.-практ. конф. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского гос. ун-та, 2010. – С. 168–172.
- Сабинин Д. А.* Физиологические основы питания растений. – М.: АН СССР, 1955. – 514 с.
- Терехина Н. В.* Методические указания к проведению фитогеохимических исследований: учеб.-метод. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2010. – 25 с.
- Djingova R., Kuleff I., Markert B.* Chemical fingerprinting of plants // Ecological Research, 2004. – Vol. 19. – P. 3–11.
- Sæbo A., Poppek R., Nawrot B., Hanslin H. M., H. Gawronski S. W.* Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces // Science of the Total Environment, 2012. – No. 427–428. – P. 347–354.