

## Влияние транспортно-промышленного загрязнения на морфометрические параметры и элементный состав *Potentilla fruticosa*

А. Ю. ЛУГОВСКАЯ<sup>1</sup>, Е. П. ХРАМОВА<sup>2</sup>, О. В. ЧАНКИНА<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий  
630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10  
E-mail: aulyg@mail.ru

<sup>2</sup> Центральный сибирский ботанический сад СО РАН  
630090, Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101  
E-mail: khramova@ngs.ru

<sup>3</sup> Институт химической кинетики и горения СО РАН  
630090, Новосибирск, ул. Институтская, 3  
E-mail: chankina@kinetics.nsc.ru

Статья поступила 03.07.2017

Принята к печати 24.07.2017

### АННОТАЦИЯ

Проанализированы изменения морфологических показателей листа и элементного состава надземных органов растений *Potentilla fruticosa* L., произрастающих в условиях транспортно-промышленного загрязнения г. Новосибирска. Установлено, что содержание тяжелых металлов – железа, никеля, ванадия и титана – в наземных органах растений из уличной посадки возросло в 1,3–9,5 раза по сравнению с контролем. В ответ на техногенное воздействие у растений *P. fruticosa* уменьшились размеры ассимиляционных органов листа, возросло значение показателя флуктуирующей асимметрии конечной доли листа по сравнению с фоновыми растениями. По показателю флуктуирующей асимметрии конечной доли листа *P. fruticosa* качество окружающей среды урбанизированной территории соответствует высокому уровню загрязнения, фоновой – низкому.

**Ключевые слова:** *Potentilla fruticosa* L., транспортно-промышленное загрязнение, элементный состав, морфологические показатели, флуктуирующая асимметрия.

Новосибирск – один из крупнейших городов-миллионников России со сложной экологической обстановкой, где одним из факторов, неблагоприятно влияющих на экологическую ситуацию, является загрязнение воздушной среды и почвы тяжелыми металла-

ми и поллютантами [Ильин, Сысо, 2001; Пивкин, Чиндяева, 2002; Государственный доклад..., 2013]. Известно, что их избыток в среде приводит к накоплению в растениях и, как следствие, к повреждению последних, выпадению чувствительных видов и нарушению

растительных сообществ [Устойчивость..., 1991]. Проблема существования растений в условиях техногенного загрязнения актуальна для крупных промышленных городов. При этом городская растительность может использоваться в качестве индикатора загрязнения среды. Поступающие в растительный организм вредные компоненты выбросов промышленных предприятий и автотранспорта вызывают широкий спектр изменений, которые можно характеризовать как стресс-индуцируемые. Для исследования растений в условиях техногенного воздействия применяют различные подходы, в том числе, изучение изменения морфологических показателей, в качестве индикаторов стрессового состояния используют показатели флуктуирующей асимметрии (FA). Обнаружение и оценка этих изменений дает достоверную картину условий места произрастания растений и отражает состояние городской среды.

Хорошо известно, что явление флуктуирующей асимметрии связано с нарушением стабильности развития организма в результате воздействия внешних факторов, в первую очередь – антропогенного [Захаров, 1987; Klingenberg, 2012]. Степень выраженности FA зависит от силы воздействия фактора: чем сильнее его воздействие, тем большее отклонение от нормы имеет показатель FA, что позволяет на макроскопическом уровне использовать его в качестве меры для оценки стабильности развития организма.

Важным элементом озеленения в декоративном убранстве города выделяются кустарники, выполняющие при этом защитную роль от вредного воздействия выхлопных газов.

*Potentilla fruticosa* L. (лапчатка кустарниковая или курильский чай кустарниковый) из сем. Rosaceae – один из красивоцветущих кустарников, привлекающий внимание своей декоративностью, которая широко используется в зеленом строительстве во многих российских городах, в том числе, в Новосибирске [Пивкин, Чиндяева, 2002; Коропачинский, Встовская, 2005].

Цель работы – сравнительный анализ морфологических показателей листа и элементного состава *Potentilla fruticosa* в условиях промышленно-транспортного воздействия и оценке состояния городской среды в г. Новосибирске.

Для исследования брали растения *P. fruticosa* из Советского, Железнодорожного, Октябрьского и Ленинского городских районов г. Новосибирска, различающихся по уровню транспортно-промышленного загрязнения. Согласно эколого-фитомелиоративному районированию к третьему фитомелиоративному району отнесен Ленинский, характеризующийся критической экологической ситуацией; Октябрьский и Железнодорожный – ко второму, или неблагоприятному; Советский – к первому, или с относительно благоприятной ситуацией [Пивкин, Чиндяева, 2002].

Образцы растений *P. fruticosa* собраны в сквере “Весна” возле ГПНТБ СО РАН, расположенном в 50 м от проезжей части ул. Кирова и 120 м от Новосибирского аффинажного завода (Октябрьский район); в сквере Мемориал Славы по ул. Станиславского в 5 м от проезжей части (Ленинский район), на газоне по ул. Шамшурина (вокзал Новосибирск-Главный) в 2 м от дорожного полотна (Железнодорожный р-н), на интродукционном участке ЦСБС СО РАН, расположенном среди лесного массива, принятом за контроль (Советский р-н, Академгородок). С каждого растения равномерно по всей кроне отбирали по 5–10 годичных побегов в фазе начала плодоношения и разделяли на органы – листья и стебли (4.08.2015 г.). Объем выборки составлял 35–38 особей из каждой из четырех точек отбора. Одновременно взяты образцы почв с каждого участка методом “конверта”.

Навеску воздушно-сухого растительного сырья и почв (1 г) измельчали в агатовой ступке. Затем образцы прессовали в форме таблетки диаметром ~1 см, весом – 30 мг (с поверхностной плотностью 0,04 г/см<sup>2</sup>). Определение элементов проводили методом РФА СИ на станции элементного анализа Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения ИЯФ СО РАН (накопитель ВЭПП-3) [Baryshev et al., 1991]. Основные характеристики экспериментальной станции и методические аспекты работы описаны в работах [Дарьин, Ракшун, 2013; Экспериментальная станция..., 2014]. Измерения образцов проводили при энергии возбуждающего излучения 23 кэВ, время каждого измерения составляло от 300 до 500 с для расти-

тельных навесок и от 200 до 300 с для образцов почв. Первичную математическую обработку полученных спектров (идентификация элементов и определение площадей пиков) проводили при помощи программы AXIL для флуоресцентных спектров. Концентрация элементов определена с применением метода “внешнего стандарта”. Основным требованием при использовании внешнего стандарта является близость химического состава матриц исследуемого и стандартного образца, а также уровней содержания элементов в них. В качестве образцов сравнения взяты российские стандарты травно-злаковой смеси ГСО СОРМ1 и байкальского ила БИЛ-1 как наиболее близкие по составу к определяемым образцам [Арнаутов, 1990]. Величина относительного стандартного отклонения (Sr, %) – воспроизводимость результатов анализа, полученная путем 20 параллельных измерений образца сравнения, для большинства элементов в растительных и почвенных пробах колеблется в пределах 5–15 %, за исключением циркония – 40 % в образцах растений и 20 % для почвенных образцов. Предел обнаружения составлял от  $10^{-7}$  г/г в зависимости от элемента.

Для измерения морфометрических параметров с каждого годичного побега брали нижний лист и на свежесобранном материале проводили метрические измерения методом компьютерного анализа изображений. Для измерения метрических параметров листа проводили съемку цифровой камерой в режиме “макро”. Обработку снимков проводили с помощью программного продукта MapInfo с интерпретацией результатов в Excel [Трубина, 2006].

Для вычисления флуктуирующей асимметрии конечной доли листа *P. fruticosa* измеряли морфологические признаки, такие как ширина левой и правой половинок листа (от границы центральной жилки до края листа); длина жилки второго порядка, второй от основания листа; расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка; расстояние между концами этих же жилок.

Расчет интегрального показателя флуктуирующей асимметрии (FA) комплекса морфологических признаков листовой пластинки проводили с использованием алгоритма нормированной разности [Захаров и др., 2000]:

$$FA_{ij} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{|L_{ij} - R_{ij}|}{(L_{ij} + R_{ij})},$$

где  $L_{ij}$  и  $R_{ij}$  – значение  $j$ -го признака у  $i$ -го листа соответственно слева и справа от плоскости симметрии;  $m$  – количество анализируемых признаков;  $n$  – объем выборки листьев.

Для характеристики уровня загрязнения окружающей среды в точках отбора образцов проводили учет автотранспорта, проходящего по автомагистрали, по одному часу непрерывно три раза в день с 7.00 до 8.00; с 13.00 до 14.00; с 18.00 до 19.00 часов в течение недели. Легковые и грузовые автомобили учитывали отдельно. Последующий расчет пробегового выброса и расчет концентрации загрязнителей проводили в соответствии с методикой определения выбросов автотранспорта [Методика..., 1999]. В транспортном потоке на исследуемых участках преобладали легковые автомобили, на долю которых приходилось 88–96 % всего потока (табл. 1). Следует отметить,

Т а б л и ц а 1

**Общая интенсивность транспортного потока, авт/ч**

Дни недели	Район		
	Железнодорожный (ул. Шамшурина)	Ленинский (ул. Станиславского)	Октябрьский (ул. Кирова)
Понедельник	1300	2230	2203
Вторник	1298	2210	2058
Среда	1194	2239	2114
Четверг	1212	2384	2432
Пятница	1287	2720	2112
Суббота	968	1730	1882
Воскресенье	961	1788	1822

Т а б л и ц а 2

## Средняя скорость транспортного потока, км/ч

Дни недели	Район		
	Железнодорожный (ул. Шамшурина)	Ленинский (ул. Станиславского)	Октябрьский (ул. Кирова)
Понедельник	20,1	18,0	17,5
Вторник	19,8	17,9	21,1
Среда	23,6	16,7	15,4
Четверг	24,1	15,3	19,3
Пятница	23,7	14,1	14,1
Суббота	30,3	23,1	30,2
Воскресенье	30,2	30,1	31,3

что выбранные участки улиц чрезвычайно перегружены в течение всего дня, о чем свидетельствует средняя скорость автотранспорта (табл. 2).

Полученные данные обработаны методами вариационной статистики с использованием пакетов прикладных статистических программ Excel и Statistica. Для выявления значимости результатов использовали непараметрический критерий Манна – Уитни ( $U$ ) при уровне значимости  $p \leq 0,05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ выбросов автотранспорта показал, что участки магистралей ул. Станиславского (Ленинский р-н) и ул. Кирова (Октябрьский р-н) в точках отбора образцов относятся к категории значительной степени загрязнения атмосферного воздуха, ул. Шамшурина – к умеренной, Советский р-н – к легкой [Методика..., 1999]. Выбросы оксида углерода в единицу времени составили на ул. Станиславского 28,5 мг · м/с; ул. Кирова – 27,4 мг · м/с и ул. Шамшурина – 14,5 мг · м/с (табл. 3). По

выбросам углеводородов выделяются участки магистрали по ул. Станиславского и по ул. Кирова, дополнительно по оксиду азота – ул. Станиславского [Методика..., 1997].

Анализ элементного состава почв из четырех точек отбора образцов *P. fruticosa* показал, что состав идентичен, обнаружено 18 элементов (табл. 4). Содержание большинства элементов в почве контрольного участка (Советский р-н) не превышало фоновых значений в г. Новосибирске [Ильин, Сысо, 2001] и кларков [Алексеев, 1990], за исключением Zr и Pb.

В почвах городских участков наблюдалось повышенное содержание большинства тяжелых металлов и As по сравнению с контролем.

Так, по наибольшему содержанию Ti, V, Fe, Co, As, Rb, Y выделялись почвы точки отбора из Октябрьского р-на. Содержание Ca, Sr и Br выше в почвах Ленинского р-на. Mn, Fe, Ni, Cu, Zn и Pb преобладали в почвах участка Железнодорожного р-на. На контрольном участке обнаружено повышенное содержание Zr.

Т а б л и ц а 3

## Выбросы оксида углерода, углеводородов и оксида азота в единицу времени на участке магистралей от транспортного потока в одном направлении, мг · м/с

Район	Вещество		
	углеводороды (СН)	оксид углерода (СО)	оксиды азота (NO <sub>x</sub> )
Железнодорожный (ул. Шамшурина)	0,8	14,5	0,3
Ленинский (ул. Станиславского)	1,3	28,5	1,06
Октябрьский (ул. Кирова)	1,2	27,4	0,4
Советский (ЦСБС СО РАН)	0,01	0,02	0,01

Содержание элементов в почвах из точек отбора *Potentilla fruticosa* в городских и фоновых условиях

Элемент	Точки отбора в разных районах города				ПДК*, кларк**, фоновое содержание***
	Советский (контроль)	Октябрьский	Ленинский	Железнодорожный	
K	14 ± 0,3 <sup>1</sup>	17 ± 0,3	12 ± 0,2	16 ± 0,3	25**
Ca	16 ± 0,3	18 ± 0,3	80 ± 1,6	36 ± 0,7	30**
Ti	3208 ± 289	4188 ± 377	2159 ± 194	3549 ± 319,4	5000*
V	70 ± 7	96 ± 9,6	46 ± 4,6	78 ± 7,8	150* (60***)
Mn	602 ± 6	788 ± 8	677 ± 6,8	826 ± 8,3	1500* (750***)
Fe	19 ± 0,2	31 ± 0,3	20 ± 0,2	30 ± 0,3	38**
Co	<b>9 ± 0,8<sup>2</sup></b>	<b>14 ± 1</b>	<b>9 ± 0,8</b>	<b>12 ± 1,1</b>	5* (12***)
Ni	<b>27 ± 5</b>	<b>48 ± 10</b>	<b>28 ± 5,5</b>	<b>49 ± 9,7</b>	4* (35***)
Cu	<b>16 ± 0,5</b>	<b>38 ± 1</b>	<b>26 ± 0,8</b>	<b>57 ± 1,7</b>	3* (30***)
Zn	<b>58 ± 0,9</b>	<b>84 ± 1</b>	<b>73 ± 0,7</b>	<b>99 ± 1</b>	23* (70***)
As	<b>4 ± 0,1</b>	<b>49 ± 10</b>	<b>12 ± 2,5</b>	<b>12 ± 2,4</b>	2* (15***)
Br	6 ± 0,1	15 ± 0,2	26 ± 0,3	20 ± 0,2	5**
Rb	53 ± 1,1	78 ± 2	46 ± 0,9	65 ± 1,3	60**
Sr	176 ± 2	176 ± 2	323 ± 3	221 ± 2,2	300** (170***)
Y	20 ± 8	28 ± 11	18 ± 7,3	26 ± 10,5	20**
Zr	326 ± 65	269 ± 54	144 ± 29	225 ± 45	300** (250***)
Mo	1,5 ± 0,03	0,6 ± 0,01	0,5 ± 0,01	0,8 ± 0,02	0,1-40** (3***)
Pb	<b>47 ± 19</b>	<b>94 ± 38</b>	<b>66 ± 26,4</b>	<b>151 ± 60,4</b>	32* (15***)

Примечание. <sup>1</sup> Среднее значение ± стандартное отклонение; <sup>2</sup> жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК; \* значение ПДК [ГН 2.1.7.2041-06]; \*\* кларк элемента [Алексеев, 1990]; \*\*\* фоновое содержание тяжелых металлов в почвах г. Новосибирска [Ильин, Сысо, 2001]. К, Са, Fe приведены в мг/г, остальные элементы – в мкг/г.

Следует отметить, что содержание Pb, Co, Ni, Cu, Zn в почвах всех исследуемых участков превышает ПДК, что связано с полиметаллическим загрязнением почвенного покрова г. Новосибирска, являющимся следствием многоотраслевой структуры местной индустрии и разнообразием производственных направлений [Ильин, Сысо, 2001].

Для оценки уровня техногенного загрязнения почвы, взятой с газона в месте произрастания *P. fruticosa*, рассчитан суммарный показатель загрязнения  $Z_c$  по формуле Ю. Е. Саета:

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1),$$

где  $K_c$  – коэффициент концентрации  $i$ -го химического элемента, вычисленный как отношение концентрации данного элемента в загрязненной почве к его фоновой концентрации;  $n$  – число основных металлов [Сае, 1990].

Установлено, что в Ленинском р-не значение  $Z_c$  равняется 11, в Железнодорожном – 15, что соответствует низкому загрязнению почв, а в Октябрьском оно максимально

( $Z_c = 19$ ) и оценивается как среднее загрязнение [Методические указания..., 1987]. Повышенное накопление тяжелых металлов и мышьяка в почве из точки отбора в сквере “Весна”, скорее всего, объясняется выбросами в атмосферу загрязняющих веществ с Новосибирского аффинажного завода, в состав пыли которых могут входить некоторые металлы и их летучие соединения: Pb, Hg, Cd, Se, Zn, Ni, As [ИТС..., 2016].

Таким образом, уровень загрязненности почв убывает в ряду: Октябрьский > Железнодорожный > Ленинский > Советский р-ны.

В надземной части *P. fruticosa* из разных точек отбора обнаружено 19 элементов (табл. 5). При этом Se отмечен только в листьях и стеблях растений из Октябрьского р-на, что, по видимому, связано с расположением точки отбора в непосредственной близости от аффинажного производства.

Суммарное накопление макроэлементов (K + Ca) в листьях растений *P. fruticosa*, произрастающих в Железнодорожном, Ленинском и Октябрьском районах выше в 1,3–

Содержание элементов в растениях *Potentilla fruticosa*, произрастающей в различных районах г. Новосибирска в 2015 г.: Ленинский (Л), Железнодорожный (Ж), Октябрьский (О) и Советский (С), мкг/г

Элемент	Точки отбора в разных районах											
	С			О			Л			Ж		
	лист	стебли	листья	лист	стебли	листья	лист	стебли	листья	лист	стебли	листья
K	9933 ± 149 <sup>1</sup>	14 065 ± 211	16 886 ± 254	10 395 ± 156	12 566 ± 189	5581 ± 84	6982 ± 105	4311 ± 65				
Ca	12 279 ± 196	7473 ± 119	13 040 ± 208	7786 ± 124	21 759 ± 347	13 793 ± 220	26 109 ± 416	13 035 ± 208				
Ti	37 ± 3	34 ± 3	122 ± 11	64 ± 6	105 ± 10	45 ± 4	170 ± 15	106 ± 10				
V	1,1 ± 0,1	0,8 ± 0,1	1,4 ± 0,1	1,4 ± 0,1	1,5 ± 0,2	1,6 ± 0,2	1,4 ± 1	1,3 ± 0,1				
Mn	88 ± 1	34 ± 0,5	82 ± 1	45 ± 1	78 ± 1	60 ± 1	119 ± 2	58 ± 1				
Fe	271 ± 4	145 ± 2	1293 ± 18	454 ± 6	899 ± 13	241 ± 3	1835 ± 26	810 ± 11				
Co	0,10 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,49 ± 0,01	0,17 ± 0,01	0,32 ± 0,01	0,09 ± 0,001	0,67 ± 0,1	0,26 ± 0,001				
Ni	3 ± 0,7	2 ± 0,3	9 ± 2	5 ± 1	5 ± 1	4 ± 1	15 ± 3	5 ± 1				
Cu	7 ± 0,2	7 ± 0,2	10 ± 0,3	7 ± 0,2	5 ± 0,2	5 ± 0,2	11 ± 0,3	6 ± 0,2				
Zn	24 ± 0,3	31 ± 0,4	54 ± 1	47 ± 0,7	19 ± 0,3	31 ± 0,4	37 ± 0,5	27 ± 0,4				
As	0,02 ± 0,001	0,001 ± 0,001	0,5 ± 0,1	0,1 ± 0,01	0,6 ± 0,1	—	0,6 ± 0,1	0,2 ± 0,001				
Se	— <sup>2</sup>	—	0,29 ± 0,01	0,08 ± 0,001	—	—	—	—				
Br	1 ± 0,01	2 ± 0,01	2 ± 0,01	2 ± 0,01	5 ± 0,1	2 ± 0,01	4 ± 0,1	1 ± 0,001				
Rb	4 ± 0,1	3 ± 0,1	9 ± 0,1	6 ± 0,1	4 ± 0,1	2 ± 0,01	5 ± 0,1	2 ± 0,001				
Sr	62 ± 0,5	57 ± 0,5	73 ± 1	66 ± 1	163 ± 1	106 ± 1	126 ± 1	97 ± 0,8				
Y	1,5 ± 0,6	1,3 ± 0,5	14 ± 6	2,8 ± 1	6,0 ± 2	0,7 ± 0,3	12 ± 5	4,4 ± 2				
Zr	7 ± 1,4	4 ± 0,7	49 ± 10	12 ± 2	27 ± 6	5 ± 1	45 ± 9	31 ± 6				
Mo	0,7 ± 0,01	0,2 ± 0,01	0,8 ± 0,001	0,1 ± 0,01	0,3 ± 0,01	0,04 ± 0,001	0,3 ± 0,01	0,1 ± 0,001				
Pb	2 ± 0,7	1 ± 0,6	4 ± 2	3 ± 1	3 ± 1	4 ± 2	10 ± 4	3 ± 1				
Сумма макроэлементов (К + Са)	22 212	21 537	29 926	18 181	34 325	19 374	33 091	17 346				
Сумма микроэлементов	514	323	1745	724	1336	509	2414	1163				

Примечание: <sup>1</sup> Среднее значение ± стандартное отклонение; <sup>2</sup> содержание компонента находится ниже предела обнаружения (0,01 мкг/г).

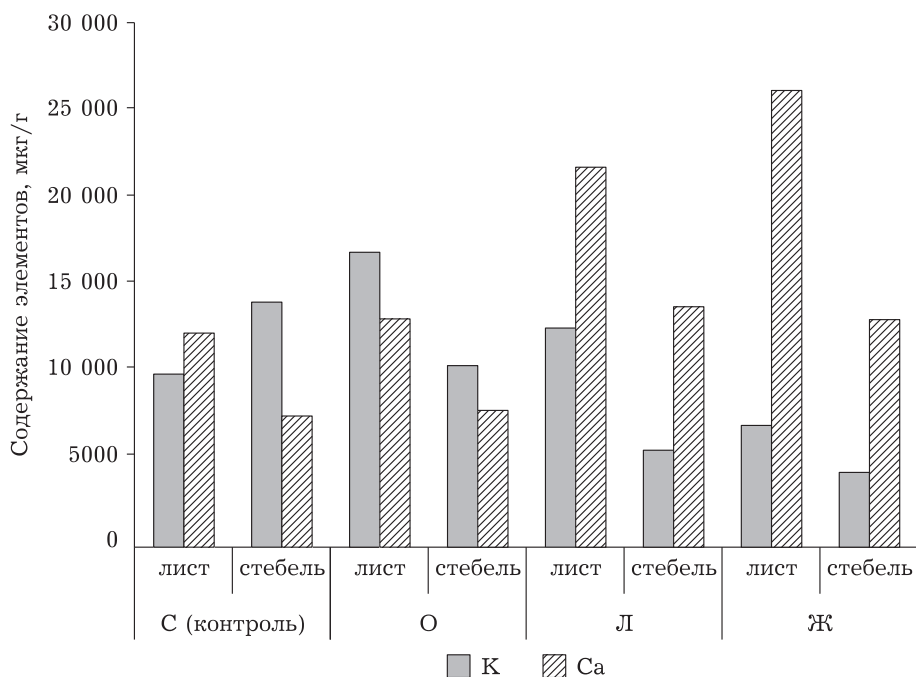


Рис. 1. Содержание К и Са в листьях и стеблях *Potentilla fruticosa*, произрастающей в различных районах г. Новосибирска в 2015 г.: Ленинский (Л), Железнодорожный (Ж), Октябрьский (О) и Советский (С)

1,5 раза, чем в контроле. Напротив, в стеблях их содержание ниже – максимум К и Са (21 537 мкг/г) выявлен в растениях из Советского р-на (контроль), минимум – из Железнодорожного (17 346 мкг/г).

Наиболее высоким содержанием К выделяются листья растений (17 мг/г) из Октябрьского р-на и стебли контрольных особей (14 мг/г) (рис. 1). Повышенное накопление Са в листьях и стеблях растений из Железнодорожного и Ленинского р-нов связано, по-видимому, с его высоким содержанием в почвах точек отбора. При этом отмечено, что в листьях растений из Железнодорожного р-на содержание Са на 20 % выше, чем из Ленинского, где содержание в почвах в 2 раза выше.

Сравнительный анализ суммарного содержания микроэлементов в надземных органах *P. fruticosa* из городских посадок выявил, что их максимум установлен в листьях и стеблях растений, произрастающих в Железнодорожном р-не (2391 и 1152 мкг/г соответственно) (рис. 2). Наименьшее содержание микроэлементов в растениях, растущих под техногенной нагрузкой, установлено в особях из Ленинского р-на (1323 и 509 мкг/г),

что, возможно, обусловлено повышенным содержанием в почве из этой точки отбора Са – элемента, уменьшающего подвижность и доступность большинства микроэлементов [Алексеева-Попова, Дроздова, 2013]. Минимум их содержания выявлен в контрольных растениях *P. fruticosa*, что согласуется с общеизвестным фактом, что в промышленных центрах имеется два основных способа поступления избыточных химических элементов – из воздуха и почвы.

В целом содержание практически всех элементов выше в растениях в городских посадках по сравнению с контролем. Существенно возрастает в них концентрация As: в листьях и стеблях его количество увеличивается в 25–100 раз. Содержание Ti, Fe, Co, Y, Zr, Pb, Ni и Br в городских растениях в 4–9,5 раза выше, чем в контроле. Количество V, Mn, Cu, Zn, Rb и Sr возрастает в 2–2,8 раза. Только содержание Mo и K в больших количествах накапливается в стеблях контрольных растений.

Следует отметить, что по наибольшей концентрации большинства тяжелых металлов и мышьяка выделяются растения *P. fruticosa*, произрастающие в Железнодорожном

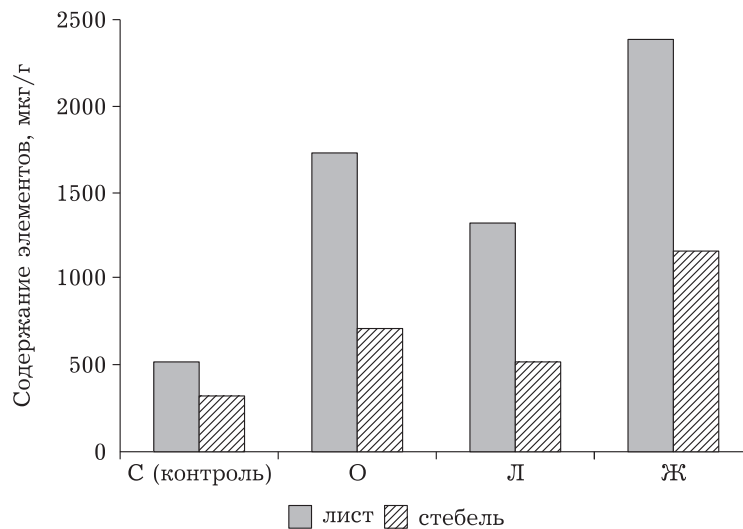


Рис. 2. Суммарное содержание микроэлементов в листьях и стеблях *Potentilla fruticosa*, произрастающей в различных районах г. Новосибирска в 2015 г.: Ленинский (Л), Железнодорожный (Ж), Октябрьский (О) и Советский (С)

р-не, что, вероятно, связано с расположением точки отбора образцов в непосредственной близости от дорожного полотна по сравнению с другими участками. Повышенное накопление Zn, Rb в листьях и стеблях *P. fruticosa*, а также Cu, Ni в стеблях и Zr, Pb в листьях растений из Октябрьского р-на объясняется близостью аффинажного производства. Изучаемые растения из Ленинского р-на содержат максимальное количество Sr, по-видимому, повышенное содержание Ca в почве этой точки отбора снижает подвижность и доступность большинства микроэлементов [Алексеева-Попова, Дроздова, 2013].

О неблагоприятных условиях произрастания растений может свидетельствовать сдвиг в соотношениях между отдельными элементами [Кабата-Пендиас, Пендиас Х., 1989; Ильин, Сысо, 2001]. Он выявлен в соотношении Fe/Mn в пользу Fe для городских растений. Его величина составила для листьев растений из Октябрьского р-на 16, Железнодорожного – 15, Ленинского – 12 и Советского (контроля) – 3. Подобные сдвиги в соотношении Fe/Mn известны и в большинстве случаев связаны с повышением содержания железа на фоне резкого падения уровня марганца [Устойчивость..., 1991; Carreras, Pignata, 2002; Giniyatullin et al., 2002; Храмова и др., 2007]. Кроме того, доступность Mn для растений, произрастающих на городских почвах под техногенным воздействием, снижена

из-за пониженной влажности почвы и более щелочной реакции среды в связи со значительным содержанием Ca и Sr [Парибок и др., 1982].

Антагонистические взаимоотношения между цинком и медью проявляются в торможении поглощения одного элемента другим [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989]. Значение отношения цинка и меди в листьях варьирует от 3,2 до 5,4, стеблях – от 4,5 до 6,4. Максимальное значение соотношения Zn/Cu отмечено в стеблях растений из Октябрьского р-на и составило 6,4, а минимальное – в листьях *P. fruticosa* из Советского р-на (контроля) – 3,2.

Взаимодействие цинка и мышьяка также носит антагонистический характер. Величина их отношения в листьях растений из Ленинского р-на составляет 34,2, Октябрьского – 108,5, Железнодорожного – 58,8 и Советского р-на – 1200.

Изучение морфологических показателей растений *P. fruticosa* выявило, что площадь и периметр листа в образцах, собранных в Ленинском р-не, сократились в 3,8 и 4,5 раза по сравнению с контролем, Железнодорожном – в 4,9 и 4,4 раза, Октябрьском – в 4,5 раза. Длина и ширина листа *P. fruticosa* из городских посадок в Ленинском р-не меньше в 2,2 раза, в Железнодорожном – в 2,2–3,1 раза, в Октябрьском – в 2,2–3,4 раза, чем в контроле. Анализ соотношения длины/



**Морфологические показатели растений *Potentilla fruticosa*, произрастающих в различных районах г. Новосибирска в 2015 г.: Ленинский (Л), Железнодорожный (Ж), Октябрьский (О) и Советский (С)**

Морфологический показатель	Точка отбора			
	Л	Ж	О	С
Площадь листа, мм <sup>2</sup>	116 ± 53 <sup>1, 5</sup>	88 ± 61 <sup>7</sup>	97 ± 77 <sup>6</sup>	437 ± 111
Периметр листа, мм	46 ± 21 <sup>5</sup>	47 ± 33 <sup>7</sup>	48 ± 61 <sup>6</sup>	209 ± 52
Длина листа, мм	19 ± 7	13 ± 4 <sup>7</sup>	18 ± 9 <sup>6</sup>	40 ± 7
Ширина листа, мм	18 ± 5 <sup>5</sup>	19 ± 6 <sup>7</sup>	12 ± 9 <sup>6</sup>	41 ± 5
Площадь конечной доли, мм <sup>2</sup>	78 ± 11 <sup>5</sup>	80 ± 17 <sup>3</sup>	53 ± 19	87 ± 222
Периметр конечной доли, мм	41 ± 8 <sup>5</sup>	43 ± 6 <sup>3, 7</sup>	33 ± 7	49 ± 7
Длина конечной доли, мм	16 ± 4 <sup>2, 5</sup>	16 ± 3 <sup>3, 7</sup>	15 ± 34 <sup>4, 6</sup>	17 ± 4
Ширина конечной доли, мм	10 ± 2 <sup>5</sup>	9 ± 4 <sup>7</sup>	5 ± 3	14 ± 2
Длина черешка, мм	9 ± 1 <sup>5</sup>	9 ± 2 <sup>7</sup>	13 ± 5 <sup>6</sup>	11 ± 3
Длина листа/ширина листа	1,1	0,68	1,5	0,98
Длина конечной доли/ ширина конечной доли	1,6	1,8	3	1,2

П р и м е ч а н и е. <sup>1</sup> Среднее значение ± стандартное отклонение; <sup>2</sup> различия статистически незначимы между выборками уличной посадке (Ленинский р-н) и контролем ( $U_{\text{эмпр.}} = 3 > U_{\text{крит.}} = 0$  при  $p \leq 0,05$ ); <sup>3</sup> различия статистически незначимы между выборками уличной посадки (Железнодорожный р-н) и контролем ( $U_{\text{эмпр.}} = 0,5 - 3,5 > U_{\text{крит.}} = 0$  при  $p \leq 0,05$ ); <sup>4</sup> различия статистически незначимы между выборками уличной посадки (Октябрьский р-н) и контролем ( $U_{\text{эмпр.}} = 2 > U_{\text{крит.}} = 0$  при  $p \leq 0,05$ ); <sup>5</sup> различия статистически незначимы между выборками уличных посадок: Ленинский и Железнодорожный р-ны ( $U_{\text{эмпр.}} = 2 - 4 > U_{\text{крит.}} = 0$  при  $p \leq 0,05$ ); <sup>6</sup> различия статистически незначимы между выборками уличных посадок: Ленинский и Октябрьский р-ны ( $U_{\text{эмпр.}} = 0,5 - 4 > U_{\text{крит.}} = 0$  при  $p \leq 0,05$ ); <sup>7</sup> различия статистически незначимы между выборками уличных посадок: Октябрьский и Железнодорожный р-ны ( $U_{\text{эмпр.}} = 0,5 - 3 > U_{\text{крит.}} = 0$  при  $p \leq 0,05$ ).

ширины листа и длины/ширины конечной доли показал, что наибольшее его значение (3) отмечено у растений из Октябрьского р-на, а наименьшее (1,2) – из Советского (контроля) (табл. 6). На основании полученных данных можно заключить, что наибольшему угнетению в условиях техногенного воздействия подвергаются растения *P. fruticosa*, произрастающие в сквере “Весна” (Октябрьский р-н).

Одним из подходов к анализу стабильности системы морфологических признаков является метод определения флуктуирующей асимметрии (ФА). Сравнительный анализ ФА выявил достоверные отличия в оценке ста-

бильного развития конечной доли листа *P. fruticosa* в условиях транспортно-промышленного загрязнения.

Максимальное значение показателя ФА (0,202) установлено у образцов *P. fruticosa*, произрастающих в Октябрьском р-не (сквер “Весна”) вблизи аффинажного производства и вдоль наиболее загруженной автотранспортом магистрали ул. Кирова. Несколько ниже этот показатель у образцов *P. fruticosa* из Ленинского р-на – 0,196. Высокое значение установлено (0,178) в образцах из Железнодорожного р-на, что можно объяснить примыканием точки отбора к дорожному полотну. В контроле значение ФА равняется 0,046 (табл. 7).

Т а б л и ц а 7

**Качество окружающей среды в биотопах с различным уровнем техногенного загрязнения, оцениваемое по величине флуктуирующей асимметрии конечной доли растений *Potentilla fruticosa* в 2015 г. (г. Новосибирск)**

Место произрастания	Величина интегрального показателя ФА	Балл
Контроль (Советский р-н)	0,046 ± 0,1 <sup>1</sup>	1
Уличная посадка (Ленинский р-н)	0,196 ± 0,04	5
(Железнодорожный р-н)	0,178 ± 0,03	5
(Октябрьский р-н)	0,202 ± 0,02	5

<sup>1</sup> Среднее значение ± стандартное отклонение.

Для определения уровня загрязнения окружающей среды использована 5-балльная шкала оценки стабильности развития яблони [Кузнецов, Гольшшин, 2008], согласно которой за норму принимается  $FA < 0,100$  (1 балл), переход от нормы к загрязнению  $0,100 < FA < 0,119$  (2 балла), загрязнение  $0,120 < FA < 0,139$  (3 балла), сильное загрязнение  $0,140 < FA < 0,159$  (4 балла), критическое загрязнение  $FA > 0,159$  (5 баллов).

Таким образом, значение  $FA$  в контроле равняется одному баллу (норма), в городских условиях – пяти баллам, что соответствует критическому уровню загрязнения.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования определен элементный состав лапчатки кустарниковой *P. fruticosa*, произрастающей в уличных посадках в крупном промышленном городе (г. Новосибирск) и в фоновых условиях (интродукционный участок Центрального сибирского ботанического сада). Выявлены особенности накопления элементов в различных органах растений в зависимости от условий произрастания.

Показано, что растения *P. fruticosa*, находящиеся вблизи дорожного полотна и промышленного предприятия, накапливают тяжелые металлы и мышьяк в 2–9,5 раза больше по сравнению с фоновыми.

Установлено, что в условиях транспортно-промышленного загрязнения уменьшается площадь, периметр, длина и ширина листовая пластинки в 4–5 раз по сравнению с контролем. Изменяется соотношение длины и ширины листа и конечной доли.

Рассчитан показатель флуктуирующей асимметрии ( $FA$ ), согласно которому экологическая ситуация в обследованных участках г. Новосибирска оценивается как критическая.

Элементный состав и морфологические показатели листа *P. fruticosa* в условиях города могут использоваться для фитоиндикации загрязнения среды тяжелыми металлами и мышьяком.

Использован растительный материал из коллекции ЦСБС СО РАН.

- Алексеева-Попова Н. В., Дроздова И. В. Микроэлементный состав растений полярного Урала в контрастных геохимических условиях // Экология. 2013. № 2. С. 90–98.
- Алексеев В. В. Геохимия ландшафта и окружающая среда. М.: Наука, 1990. 142 с.
- Арнаутов Н. А. Стандартные образцы химического состава природных минеральных веществ: методические рекомендации. Новосибирск, 1990. 220 с.
- ГН 2.1.7.2041–06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. С. 3.
- Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Новосибирской области в 2013 году. Новосибирск, 2011. 141 с.
- Дарьин А. В., Ракшун Я. В. Методика выполнения измерений при определении элементного состава образцов горных пород методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 // Науч. вестн. НГТУ. 2013. № 2 (51). С. 112–118.
- Захаров В. М., Чубинишвили А. Т., Дмитриев С. Г., Баранов А. С. Здоровье среды: практика оценки. М.: Центр экологической политики России, 2000. 320 с.
- Захаров В. М. Асимметрия животных. М.: Наука, 1987. 216 с.
- Ильин В. Б., Сысо А. И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск, 2001. 228 с.
- ИТС 14-2016. Производство драгоценных металлов. М.: Бюро НДТ, 2016. 182 с.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М., 1989. 439 с.
- Коропачинский И. Ю., Ветовская Т. Н. Древесные растения Азиатской России. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 707 с.
- Кузнецов М. Н., Гольшшин Л. В. Сравнительная характеристика особенности флуктуирующей асимметрии листьев яблони в разных экологических условиях // С.-х. биология. 2008. № 3. С. 72–77.
- Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов. М., 1999. 9 с.
- Методика расчетов выбросов в атмосферу загрязняющих веществ автотранспортом на городских магистралях. М.: НИИАТ, 1997. 92 с.
- Методические указания по оценке степени опасности загрязнения почвы химическими веществами. М., 1987. 23 с.
- Парибок Т. А., Сазыкина В. А., Тэмп Г. А. и др. Содержание металлов в листьях деревьев в городе // Ботан. журн. 1982. Т. 67, № 11. С. 1533–1539.
- Пивкин В. М., Чиндяева Л. Н. Экологическая инфраструктура сибирского города (на примере Новосибирской агломерации). Новосибирск: Сибпринт, 2002. 184 с.
- Сагт Ю. Е. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 336 с.
- Трубина Л. К. Стереомодели в изучении биологических объектов. Новосибирск: СГГА, 2006. 136 с.

- Устойчивость к тяжелым металлам дикорастущих видов / под ред. Н. В. Алексеевой-Поповой. Л.: Ботан. ин-т им. В. Л. Комарова АН СССР, 1991. 214 с.
- Храмова Е. П., Куценогий К. П., Чанкина О. В. Макро- и микроэлементный состав *Pentaphylloides fruticosa* (Rosaceae) в условиях техногенного загрязнения в г. Новосибирске // Раст. ресурсы. 2007. Т. 43, вып. 1. С. 102–111.
- Экспериментальная станция рентгенофлуоресцентного элементного анализа. <http://ssrc.inp.nsk.su/СКР/stations/passport/3/> (дата обращения 10.06.2014).
- Baryshev V. B., Kulipanov G. N., Skrinsky A. N. Handbook of Synchrotron Radiation / eds. G. Brown, D. Moncton. Amsterdam: Elsevier, 1991. Vol. 3. P. 639.
- Carreras H. B., Pignata M. L. Biomonitoring of heavy metals and air quality in Cordoba City, Argentina, using transplanted lichens // Environ. Pollution. 2002. Vol. 117. P. 77–87.
- Giniyatullin R. Kh., Kulagin A. A., Zaitsev G. A., Boiko A. A. Metal accumulation by *Betula pendula* Roth. leaves under conditions of the Sterlitamak Industrial Center // Trace Elements in Medicine. 2002. Vol. 3, N 2. P. 24.
- Klingenberg C. P., Duttke S., Whelan S., Kim M. Developmental plasticity, morphological variation and evolvability: a multilevel analysis of morphometric integration in the shape of compound leaves // J. Evolutionary Biol. 2012. Vol. 25, N 1. P. 115–129.

## Technogenic Effect on Morphometric Parameters and Element Content of *Potentilla fruticosa*

A. Yu. LUGOVSKAYA<sup>1</sup>, E. P. KHRAMOVA<sup>2</sup>, O. V. CHANKINA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies  
630108, Novosibirsk, Plakhotnogo str., 10  
E-mail: aulyg@mail.ru

<sup>2</sup> Central Siberian Botanical Garden, SB RAS  
630090, Novosibirsk, Zolotodolinskaya str., 101,  
E-mail: khramova@ngs.ru

<sup>3</sup> Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, SB RAS  
630090, Novosibirsk, Institutskaya str., 3  
E-mail: chankina@ns.kinetics.nsc.ru

The changes in morphological characteristics of leaf and elemental composition of the above-ground organs of *Potentilla fruticosa* L. plants growing in the conditions of transport and industrial pollution in Novosibirsk were analyzed. The content of heavy metals – iron, nickel, vanadium and titanium in the above-ground organs of plants of street plantings increased by 1.3–9.5 times compared with the control. In response to the technogenic effect the size of the leaf assimilative organs decreased, and the value of fluctuating asymmetry index of the leaf terminal lobe compared to that of the background *P. fruticosa* plants increased. According to this index, environmental quality of the urban zone corresponds to the high level of pollution, of the background one to the low level.

**Key words:** *Potentilla fruticosa* L., morphometric parameters, fluctuating asymmetry, transport and industrial pollution.