

УДК 581.192.1:574.24

DOI: 10.15372/ChUR2021283

Особенности элементного состава сортов *Syringa vulgaris* в урбоэкосистеме г. Новосибирска

Е. П. ХРАМОВА¹, Е. М. ЛЯХ¹, О. В. ЧАНКИНА²¹Центральный сибирский ботанический сад СО РАН,
Новосибирск (Россия)

E-mail: khramova@ngs.ru

²Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН,
Новосибирск (Россия)

(Поступила 28.10.19; после доработки 02.09.20)

Аннотация

Представлены данные по содержанию 20 элементов, определенных методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ), в листьях и стеблях растений *Syringa vulgaris* трех сортов – ‘Надежда’, ‘Олимпиада Колесникова’, ‘Память о Кирове’, произрастающих в условиях транспортно-промышленного загрязнения в г. Новосибирске и фоновых условиях (контроль). В результате техногенного воздействия концентрации Mn, Fe, Co, Cr, Br, Rb, Nb в растениях повышались, а Zn и Mo – снижались (по сравнению с контролем). В городских условиях по содержанию микроэлементов выделялись растения сорта ‘Надежда’. Вследствие загрязнения окружающей среды в листьях и стеблях растений наблюдалось изменение соотношений физиологически важных химических элементов. Наименее существенные различия отмечены в соотношениях Fe/Mn и Zn/Cu у сирени сорта ‘Память о Кирове’. Выявлено, что величина соотношения K/Rb у сирени сортов ‘Олимпиада Колесникова’ и ‘Память о Кирове’ в условиях техногенной нагрузки снижалась за счет повышения содержания Rb в листьях и стеблях, а у сирени сорта ‘Надежда’, напротив, повышалось по сравнению с контролем. На основании рассчитанного коэффициента биогеохимической трансформации наиболее существенные изменения в микроэлементном составе зафиксированы для листьев и стеблей сирени сорта ‘Надежда’, что свидетельствует о ее меньшей устойчивости к техногенному загрязнению по сравнению с остальными сортами. Сирень ‘Память о Кирове’ толерантна к неблагоприятным факторам городской среды.

Ключевые слова: *Syringa vulgaris*, техногенное воздействие, РФА СИ, элементный состав

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований урбоэкосистемы обусловлена остротой проблемы загрязнения окружающей среды, характерной для многих крупных российских городов [1].

Новосибирск – третий по величине город России, важный промышленный центр Западной Сибири, экологическая ситуация в котором в последние 20–30 лет остается напряженной. Более того, просматривается тенденция к ее ухудшению, в основном, за счет

увеличения количества автотранспорта и предприятий энергетики, выбросы от которых в атмосферу непрерывно растут [2]. Взвешенные вещества (пыль), оксиды азота, аммиак, оксида углерода (II), формальдегид, 3,4-бенз(а)пирен – основные загрязнители воздуха, содержание которых в Новосибирске превышает предельно допустимые концентрации (ПДК) [3, 4]. В целом уровень загрязнения атмосферы города оценивается как “повышенный”, однако отмечается, что Новосибирск не входит в приоритетный список городов России

с наибольшим уровнем загрязнения воздуха с 1996 г. [3].

Для сохранения здоровья населения в условиях значительного техногенного воздействия необходим постоянный мониторинг качества окружающей среды. С увеличением поступления поллютантов в городскую среду стали активно использоваться биогеохимические данные компонентов для индикации ее состояния. Информация о микроэлементном составе растений важна, прежде всего, для оценки их жизнеспособности и ранней диагностики стрессового состояния [5]. Объективная информация о состоянии городской среды позволяет выявить и проанализировать ответную реакцию биоты на техногенное загрязнение. Многими авторами для исследования урбанизированной среды в качестве биоиндикаторов используются древесные растения или их части [6–9]. В зависимости от вида растения проявляют разную устойчивость к действию поллютантов, поэтому важной задачей является поиск видов и сортов растений как толерантных к присутствию загрязнителей, так и чувствительных к техногенному стрессу для выявления влияния антропогенного фактора на растительные объекты.

Виды рода *Syringa* экологически пластичны, газоустойчивы, хорошо растут и цветут в условиях городской среды [10]. В ряде работ отмечены их биоиндикаторные свойства для оценки загрязнения окружающей среды [7, 9–12].

В Центральном сибирском ботаническом саду СО РАН (ЦСБС СО РАН, Новосибирск) в лаборатории дендрологии с 1986 г. ведутся работы с сортами сирени обыкновенной для создания коллекции с последующим отбором наиболее перспективных сортов, устойчивых к антропогенному загрязнению в урбоэкосистеме. За период работы испытано 126 сортов зарубежной и отечественной селекции *Syringa vulgaris*. В настоящее время в коллекции *Syringa vulgaris* насчитывается 26 сортов, рекомендуемых для озеленения сибирских городов [13, 14]. Они характеризуются высокой зимостойкостью, газоустойчивостью, экологической пластичностью и могут быть использованы в озеленении городов холодных климатических зон России.

В 2003 г. в качестве научного эксперимента сотрудниками ЦСБС СО РАН Лях Е. М. и Чиндаевой Л. Н. были высажены 17 кустарников в сквере у Монумена Славы (Новосибирск). В трех пейзажных группах были представлены три наиболее перспективных сорта сирени обыкновенной – ‘Надежда’, ‘Память о Кирове’ и

‘Олимпиада Колесникова’. В результате ежегодных наблюдений эти сорта показали устойчивость к городским условиям и рекомендуются для использования в формировании насаждений проектируемых и строящихся общественных пространств [14].

Цель работы – определение изменений элементного состава растений *Syringa vulgaris* трех сортов под влиянием техногенного стресса, выявлении ответной реакции растений на загрязнение для оценки качества окружающей среды и рекомендаций в озеленении.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования служили древесные растения рода *Syringa* (сем. Oleaceae) – *Syringa vulgaris* L. (сирень обыкновенная) трех сортов: ‘Надежда’, ‘Память о Кирове’ и ‘Олимпиада Колесникова’, входящие в список наиболее перспективных сортов по хозяйственно-биологическим признакам [14].

Для исследования выбраны растения, произрастающие в Ленинском районе г. Новосибирска (сквер Славы) – одном из наиболее неблагоприятных районов с экологической точки зрения (городские условия). По данным ФГБУ “Западно-Сибирское УГМС”, Ленинский район – один из лидирующих по выбросам оксида углерода (II), диоксида серы, оксидов азота, твердых загрязняющих веществ в атмосферу воздуха в результате технологических и иных процессов. Наибольший вклад в загрязнение окружающей среды внесли бенз(а)пирен, взвешенные вещества, формальдегид, аммиак и диоксид азота. Следует отметить, что максимальные значения среднемесячных концентраций металлов не превысили допустимых санитарно-гигиенических нормативов, но при этом уровень загрязнения атмосферы города оценивается как “повышенный” [3]. Сквер находится в центре Ленинского района вблизи от ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3, с трех сторон расположены автомагистрали (улицы Станиславского, Плахотного, Пархоменко) с интенсивным автомобильным движением, относящиеся к категории опасного загрязнения атмосферного воздуха [4]. Сирени высажены на участке в 15–17 м от проезжей части ул. Пархоменко и отделены от нее газоном, тротуаром и кустарниковой изгородью. В качестве контрольных растений взяты кустарники того же возраста, произрастающие среди лесного массива на территории ЦСБС СО РАН, расположенного в от-

носителем благоприятном по экологической обстановке Советском районе г. Новосибирска (Академгородок).

Отбор растительных образцов проводился в генеративную фазу в конце августа 2017 г. равномерно по периметру кроны и одновременно на обоих участках.

С каждого растения отбирали по 10 годичных побегов и формировали среднюю пробу. Анализировали листья и стебли растений, а также образцы почв из их местообитаний. Средний растительный образец включал сборы с 5–10 растений в стадии плодоношения. Образцы почвы взяты из корнеобитаемого слоя (10–25 см) методом “конверта”.

Определение элементов в растительных и почвенных образцах проводили методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ) на станции элементного анализа (накопитель ВЭПП-3) ЦКП “Сибирского Центра Синхротронного и Терагерцового Излучения” на базе ИЯФ СО РАН (Новосибирск). 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/см²). Измерения образцов проводились при энергии возбуждающего излучения 23 кэВ. Время каждого измерения для растительных и почвенных навесок составляло от 300 до 500 с. Монохроматизацию синхротронного излучения осуществляли при помощи монохроматора на основе кремниевого кристалла типа “бабочка” с рабочими плоскостями (111). Регистрацию флуоресцентного излучения выполняли при помощи детектора PentaFET (Oxford Instruments, Великобритания) с энергетическим разрешением ~135 эВ (на K_α линии железа – 5.9 кэВ). Основные характеристики экспериментальной станции и методические аспекты описаны в [15–17].

Обработка полученных спектров проводилась в программе AXIL, предназначенной для энергодисперсионного спектрометрического анализа, с использованием нелинейного метода наименьших квадратов. Концентрацию элементов определяли с помощью метода “внешнего стандарта”. Предел обнаружения составлял от 10⁻⁸ г/г. В качестве образцов сравнения использовали российские стандарты травно-злаковой смеси ГСО СОРМ1 и байкальского ила БИЛ-1 [18]. Величина ошибки (воспроизводимость результатов анализа) рассчитана путем десяти параллельных измерений стандартного образца СОРМ1 и пяти

измерений стандартного образца БИЛ-1 в трех повторностях. Для большинства элементов воспроизводимость по образцу СОРМ1 колебалась, в основном, в пределах 5–11 %; для титана, ванадия и иттрия – 19–26 %; для свинца, кобальта, ниобия и никеля она составила 35–40 %, для хрома – 64 %. Предел обнаружения для Co, Br, Mo, Rb и Pb составлял 0.01–0.07 м. д., для Sr, Cu, Zn, Ni, Zr, Fe, Mn – 0.1–0.9 м. д., для остальных элементов – свыше 1 м. д. Для стандартного образца БИЛ-1 воспроизводимость варьировала для большинства элементов 3–12 %, для Pb и Mo – 14 %, Zr – 16 %. Предел обнаружения Mo, Nb, Co, Zr, Sr, Br, Y, Rb и Pb составил 0.1–0.5 м. д., для остальных элементов – свыше 1 м. д.

Накопление и рассеяние элементов для растений, произрастающих в городских условиях, по сравнению с фоновыми оценивалось путем расчета коэффициентов концентрации (K_c) и рассеяния (K_p): K_c = C_a/C_ф и K_p = C_ф/C_a, где C_ф, C_a – концентрации элемента в фоновых и городских образцах соответственно [19].

Для выявления изменений в химическом составе растений под воздействием пылегазовых эмиссий в городских условиях использовался комплексный показатель – коэффициент биогеохимической трансформации Z_v [19], который рассчитывался по формуле:

$$Z_v = \sum_1^{n_1} K_c + \sum_1^{n_2} K_p - (n_1 + n_2 - 1),$$

где n₁, n₂ – количество элементов с K_c > 1.5 и с K_p > 1.5 соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ почвы из точек отбора растительных образцов показал, что различия в концентрациях элементов незначительны (табл. 1). Отмечено незначительное превышение по содержанию ванадия, цинка, брома, свинца и снижение содержания марганца в городских почвах по сравнению с контролем. В целом можно отметить, что содержание химических элементов в исследуемых почвенных образцах практически не превышает фоновый уровень в почвах г. Новосибирска и Новосибирской области, представленный в работах [20–23]. Исключение составляет бром, концентрация которого в точках отбора выше в 1.9 раза по сравнению с фоновыми показателями, а также на 10–30 % возрастает концентрация ванадия и свинца. Это, скорее всего, связано с расположением точки отбора образцов вблизи от предприятий те-

ТАБЛИЦА 1

Содержание элементов в почвах из точек отбора образцов *Syringa vulgaris* в городских и фоновых условиях

Элемент	Содержание элементов в почвах, мкг/г от воздушно-сухой массы		
	Город	Контроль (ЦСБС СО РАН)	Фоновое значение по литературным данным [20–23]
K	13 430±671 ¹	13 335±667	– ²
Ca	30 336±2427	31 087±2487	–
Ti	3558±178	3213±161	4100 ⁴
V	73±4	64±3	60 ³
Cr	37±2	41±2	80 ³
Mn	715±36	931±47	750 ³
Fe	20 300±1015	22 380±1119	38 000 ⁶
Co	9±1	10±1	12 ³
Ni	31±3	34±3	35 ³
Cu	17±1	21±1	30 ³
Zn	73±5	46±3	70 ³
As	3.4±0.3	3.0±0.3	15 ³
Br	7±1	7±1	1.2–3.6 ⁵
Rb	52±6	49±6	–
Sr	163±21	158±20	170 ³
Y	20±3	20±3	–
Zr	166±33	228±46	250 ³
Nb	10±3	8±2	15 ³
Mo	0.5±0.2	0.7±0.2	3 ³
Pb	19±2	18±2	15 ³

¹ Среднее значение±стандартное отклонение.

² Прочерк означает, что нет данных.

³ Фоновое содержание тяжелых металлов в почвах юга Западной Сибири [21].

⁴ Фоновое содержание тяжелых металлов в почвах юга Западной Сибири [22].

⁵ Фоновое содержание галогенов в почвах Западной Сибири [20].

⁶ Фоновое содержание элементов в почвах Новосибирской области [23].

плоэнергетики и автомагистралей. По мнению Г. А. Конарбаевой [24], повышенное содержание брома связано с выбросами, которые происходят при сжигании угля на ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 – наиболее старыми энергетическими предприятиями города, работающими более 60 лет. Также повышенное содержание брома в почвах возможно вдоль автомагистралей: в виде дибромэтана его добавляют к бензину, чтобы образующийся при сгорании тетраэтилсвинца оксид свинца превращался в летучий бромистый свинец, который далее из атмосферы поступает в почву [24].

Исследование содержания макро- и микроэлементов в надземных органах сортов *S. vulgaris* показало, что концентрация макроэлементов (калия и кальция) выше в листьях, чем в стеблях вне зависимости от сорта и места произрастания (табл. 2). В листьях наибольшее содержание К обнаружено у сирени сорта ‘Па-

мять о Кирове’, при этом в городских образцах оно выше в 1.2 раза, чем в фоновых. В листьях сирени двух других сортов содержание К варьировало практически на одном уровне вне зависимости от условий произрастания, но было ниже в 1.4–1.7 раза, чем у сорта ‘Память о Кирове’ (рис. 1). В побегах калий преимущественно накапливался в растениях сорта Надежда (11–12 мг/г). Содержание Са, как правило, выше в листьях сирени из городских условий вне зависимости от сорта. Так, в городе максимальная концентрация кальция отмечена в листьях сорта ‘Олимпиада Колесникова’ (19 мг/г), у растений двух других сортов – несколько ниже (16–17 мг/г). В побегах сирени разных сортов различия в содержании Са статистически не значимы.

Суммарное содержание микроэлементов выше в листьях сирени, чем в стеблях (рис. 2) вне зависимости от уровня техногенной нагруз-

ТАБЛИЦА 2

Содержание элементов в листьях (л) и стеблях (ст) растений *Syringa vulgaris* разных сортов, произрастающих в городских и фоновых условиях в г. Новосибирске

Элемент	Орган растения	Содержание, мг/кг от воздушно-сухой массы					
		Город			Контроль (ЦСБС СО РАН)		
		1	2	3	1	2	3
Ti	Л	8±0.4 ^a	9±0.5	4±0.2	14±1	8±0.4	2±0.1
	Ст	13±1	8±0.4	4±0.2	27±1	9±0.4	2±0.1
V	Л	0.18±0.01	0.56±0.05	0.27±0.02	0.70±0.1	0.36±0.03	0.16±0.01
	Ст	0.56±0.05	0.39±0.03	0.25±0.02	1.01±0.1	0.45±0.04	0.16±0.01
Cr	Л	0.2±0.01	2.9±0.16	3.1±0.18	Н. о. ^б	0.7±0.04	1.3±0.08
	Ст	0.3±0.02	Н. о.	2.6±0.15	2.7±0.2	Н. о.	Н. о.
Mn	Л	152±6	189±7	261±10	74±3	54±2	75±3
	Ст	62±2	103±4	59±2	42±2	61±2	41±2
Fe	Л	173±8	228±10	169±8	93±4	127±6	75±3
	Ст	179±8	73±3	67±3	156±7	73±3	44±2
Co	Л	0.08±0.01	0.08±0.01	0.08±0.01	0.05±0.005	0.05±0.01	0.05±0.004
	Ст	0.07±0.01	0.05±0.01	0.07±0.01	0.06±0.01	0.04±0.00	0.03±0.003
Ni	Л	0.7±0.03	0.8±0.04	1.0±0.04	0.9±0.04	0.6±0.03	0.5±0.02
	Ст	1.1±0.05	0.9±0.04	1.0±0.04	1.3±0.06	1.0±0.04	0.6±0.02
Cu	Л	10±1	11±1	11±1	10±1	4.6±0.24	4.4±0.230
	Ст	11±1	12±1	12.5±1	12±1	8.6±0.45	9.5±0.495
Zn	Л	35±2	25±1	74±4	101±5	61±3	80±4
	Ст	36±2	40±2	48±2	44±2	57±3	54±3
As	Л	0.6±0.02	0.6±0.02	0.0±0.0004	0.5±0.02	0.6±0.02	0.4±0.01
	Ст	0.4±0.01	0.7±0.02	1.2±0.0363	0.6±0.02	0.4±0.01	0.6±0.02
Br	Л	6±0.5	9±1	8.8±1	2.0±0.2	4.4±0.3	2.5±0.2
	Ст	0.2±0.02	0.4±0.03	1.5±0.1	0.2±0.02	0.4±0.03	0.3±0.02
Rb	Л	12±1	14±1	9±1	7±1	7±1	12±1
	Ст	6±1	13±1	10±1	3±0.3	7±1	12±1
Sr	Л	117±8	79±6	61±4	131±9	68±5	60±4
	Ст	64±5	74±5	76±5	76±5	68±5	62±4
Y	Л	0.39±0.04	0.33±0.04	0.17±0.02	0.30±0.03	0.11±0.01	0.6±0.1
	Ст	Н. о.	0.17±0.02	0.31±0.04	Н. о.	0.14±0.02	0.9±0.1
Zr	Л	1.0±0.2	1.5±0.2	1.2±0.2	0.8±0.1	0.5±0.1	0.4±0.1
	Ст	0.4±0.1	0.5±0.1	0.5±0.1	0.6±0.1	0.5±0.1	0.4±0.1
Nb	Л	1.9±0.2	2.3±0.2	1.6±0.1	0.5±0.0	1.1±0.1	0.5±0.0
	Ст	0.8±0.1	1.1±0.1	1.6±0.1	2.9±0.3	Н. о.	1.0±0.1
Mo	Л	0.2±0.03	0.5±0.1	0.9±0.1	2.0±0.3	3.6±0.5	2.9±0.4
	Ст	0.2±0.02	0.2±0.03	0.3±0.04	0.7±0.1	1.5±0.2	1.5±0.2
Pb	Л	1.5±0.2	1.5±0.2	1.0±0.1	1.3±0.2	1.6±0.2	1.3±0.2
	Ст	1.0±0.1	1.1±0.1	1.5±0.2	1.3±0.2	1.0±0.1	1.2±0.2
Fe/Mn	Л	1.1	1.2	0.6	1.3	2.4	1.0
	Ст	2.9	0.7	1.1	3.7	1.2	1.1
Zn/Cu	Л	3.3	2.2	6.9	10.0	13.4	18.3
	Ст	3.2	3.4	3.8	3.7	6.7	5.7
Ca/Sr	Л	144	247	260	125	215	217
	Ст	128	116	90	94	131	129
K/Rb	Л	1995	1109	1738	3128	2229	1412
	Ст	1650	809	1135	2635	1487	994

Примечание. Растения *S. vulgaris* cv.: 'Память о Кирове' (1); 'Олимпиада Колесникова' (2); 'Надежда' (3).

^a Среднее значение±стандартное отклонение.

^б Н. о. – содержание ниже предела обнаружения.

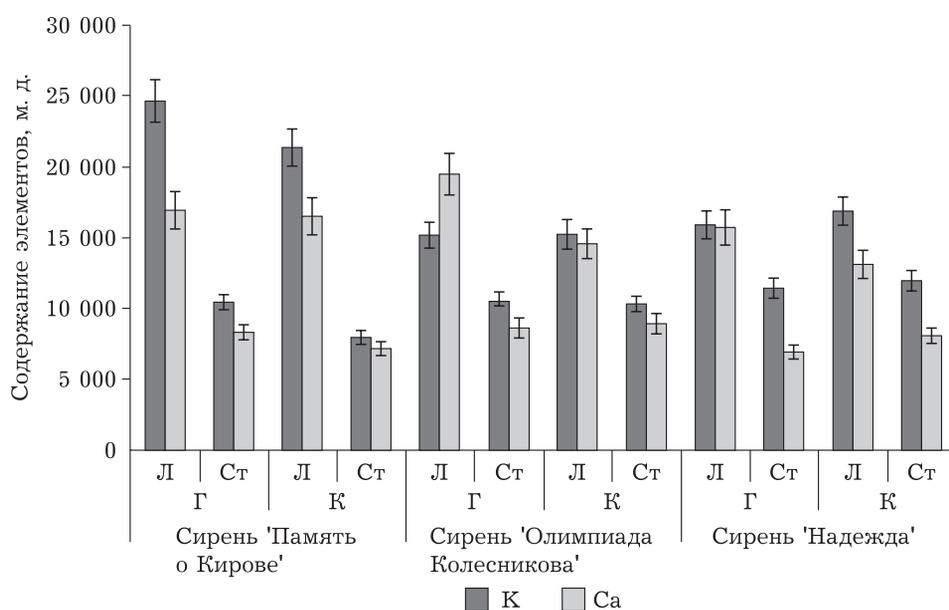


Рис. 1. Содержание К и Са в листьях (л) и стеблях (ст) растений сортов *Syringa vulgaris*, произрастающих в городских (Г) и фоновых (К) условиях.

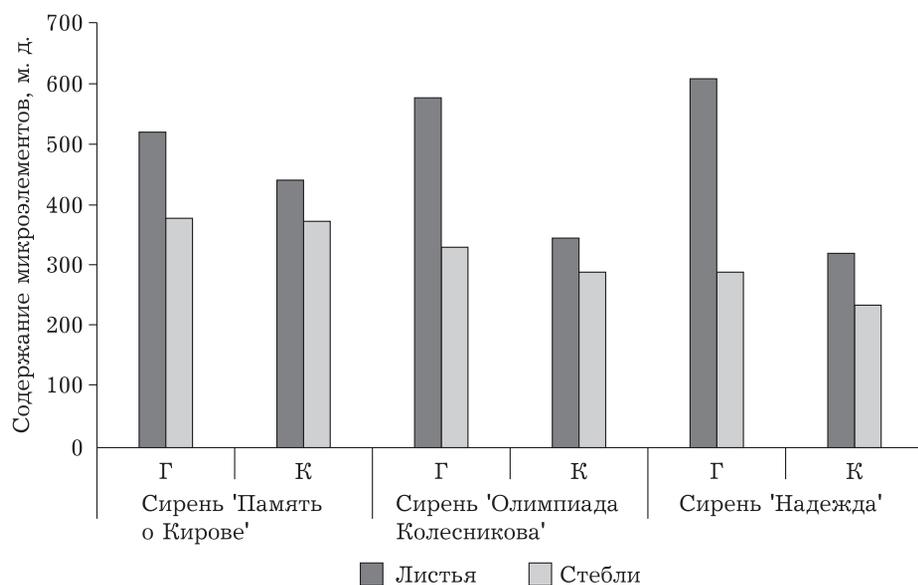


Рис. 2. Суммарное содержание элементов в листьях и стеблях растений сортов *Syringa vulgaris*, произрастающих в городских (Г) и фоновых (К) условиях.

ки. В листьях максимум (607 мг/кг) обнаружен у сирени сорта 'Надежда' из городских условий, минимум (317 мг/кг) – у этого же сорта из контроля. Следует отметить, что в зависимости от условий произрастания по суммарному содержанию микроэлементов в большей мере различались листья растений, чем стебли. Так, содержание микроэлементов в листьях сирени сорта 'Надежда' из городских условий в 1.9 раз выше, чем в контроле, в стеблях – в 1.2 раза больше. В зависимости от условий произраста-

ния наименее заметны изменения в суммарном содержании микроэлементов в листьях и стеблях сирени сорта 'Память о Кирове' по сравнению с растениями других сортов.

Анализ содержания отдельных микроэлементов в надземных органах сирени разных сортов выявил повышение концентрации Mn, Fe, Co, Cr, Br, Nb и снижение Zn и Mo в растениях из городских условий по сравнению с фоновыми (см. табл. 2). Для остальных десяти элементов такой четкой связи с условиями произрастания

не выявлено. Так, например, у сирени сорта 'Память о Кирове' Ti и V максимально накапливались в стеблях и листьях из фонового участка, при этом содержание этих элементов в стеблях в 2–3 раза выше, чем в листьях. В городе их содержание снизилось в листьях в 1.8–3.9 раза, в побегах – в 2 раза по сравнению с фоном. Для двух других сортов существенных изменений в содержании Ti и V не установлено. Содержание Cu возросло в 1.3–2.5 раза в листьях и стеблях сортов 'Олимпиада Колесникова' и 'Надежда', произрастающих в условиях антропогенной нагрузки, при этом оставаясь практически на одном уровне у сорта 'Память о Кирове'. Подобная тенденция отмечена для Ni. Наибольшее накопление As выявлено в стеблях сорта 'Надежда' из городских условий, при этом в листьях он не обнаружен. Содержание Rb возрастало в два раза в листьях и стеблях сортов 'Память о Кирове' и 'Олимпиада Колесникова' в городе, при этом у сорта 'Надежда' отмечено снижение его концентрации по сравнению с фоном. Наибольшее содержание Sr отмечено в листьях и стеблях сорта 'Память о Кирове' из фоновых условий, под техногенным воздействием оно незначительно снизилось, у остальных сортов изменения статистически не значимы. Наибольшее содержание Y найдено в стеблях фоновых образцов сорта 'Надежда', для остальных сортов отмечено накопление этого элемента в городских образцах. Содержание Zr выше в листьях городских растений. В содержании Pb изменения статистически не значимы.

Физиологически важными являются изменения соотношений биофильных элементов. О неблагоприятных условиях произрастания растений может свидетельствовать сдвиг в соотношениях между отдельными элементами [19, 25–29]. Соотношение Fe/Mn снизилось в листьях растений сортов 'Олимпиада Колесникова' и 'Надежда' из городских условий по сравнению с контролем, при этом в листьях растений сорта 'Память о Кирове' оно практически не изменилось ($Fe/Mn = 1.1–1.3$), что свидетельствует о нормальном протекании процессов фотосинтеза (см. табл. 2). Хорошо известны антагонистические взаимоотношения между цинком и медью, которые проявляются в торможении поглощения одного элемента другим [26]. Значение соотношения Zn/Cu в листьях варьирует от 2.2 до 18.3, в стеблях – от 3.2 до 6.7. Максимальное значение соотношения Zn/Cu отмечено в листьях растений 'Надежда' из контроля, в городских условиях его величина снизилась до 6.9. Наименее существенные различия

в соотношении Zn/Cu характерны растениям сорта 'Память о Кирове'. Большое значение имеет соотношение Ca/Sr в почвах и растениях [28]. Его используют в качестве дополнительного показателя для биогеохимической оценки экологического состояния территории. При значении Ca/Sr в укосах растений <100 ситуация оценивается как относительно удовлетворительная, $1 < Ca/Sr < 10$ – чрезвычайная экологическая ситуация, $Ca/Sr < 1$ – экологическое бедствие [30]. Значение Ca/Sr в обследованных нами почвах и растениях выше 100, что свидетельствует об относительно удовлетворительной ситуации в точке отбора. Исключение составили стебли сирени сорта 'Память о Кирове' из контрольного участка и сирени сорта 'Надежда' из городских условий, в которых значения соотношения Ca/Sr несколько ниже 100 и составили 90 и 94 соответственно. По мнению ряда авторов, соотношение K/Rb, возможно, связано с балансом питания у древесных растений [26, 27, 31]. Рубидий может частично замещать калий в растениях, но не в процессах метаболизма, в связи с этим высокие концентрации рубидия токсичны для растений [26]. Авторы [27] отмечают, что для деревьев из более загрязненной местности величина соотношения K/Rb в два раза больше и остается постоянной для отдельного дерева. По нашим данным следует, что имеются различия в соотношении K/Rb в зависимости от сорта сирени. В листьях и стеблях сирени сортов 'Олимпиада Колесникова' и 'Память о Кирове' из городских условий значение соотношения K/Rb в 1.6–2 раза ниже, а у сирени сорта 'Надежда', напротив, – выше, чем в контроле.

На ухудшение состояния окружающей среды растения реагируют как накоплением, так и деконцентрацией микроэлементов, что обусловлено изменениями интенсивности биологических процессов [1, 19, 25, 26].

Коэффициент биогеохимической трансформации (Z_p) отражает нарушение нормальных соотношений элементов в органах растений, характерных для их филогенетической и онтогенетической специализации, и количественно описывает дисбаланс микроэлементов, возникающий в результате усиления антропогенной нагрузки [1, 17, 19, 25]. В условиях техногенной нагрузки к элементам рассеяния отнесен Mo: его наибольшее рассеяние отмечено в листьях сирени сорта 'Память о Кирове' ($K_p = 9$), а минимальное – у сорта 'Надежда' ($K_p = 3$). К элементам рассеяния также отнесен Zn. Так, в листьях сорта 'Память о Кирове' и 'Олимпиада Колесникова' из городских условий его содержание снижается в

ТАБЛИЦА 3

Коэффициенты биогеохимической трансформации (Z_v) для надземных органов растений *Syringa vulgaris* разных сортов, произрастающих в г. Новосибирске

Культивары <i>Syringa vulgaris</i>	Z_v	
	Листья	Стебли
<i>S. vulgaris</i> cv. 'Память о Кирове'	22.8	8.3
<i>S. vulgaris</i> cv. 'Олимпиада Колесникова'	23.6	9.4
<i>S. vulgaris</i> cv. 'Надежда'	26.3	15.1

2.4–2.9 раз по сравнению с фоновыми. Для стеблей и листьев сирени сорта 'Надежда' уменьшение концентрации цинка также отмечено, но изменения менее значительны.

К приоритетным загрязнителям в листьях сирени всех изучаемых сортов отнесены Nb, Mn и Br, коэффициент концентрации которых, как правило, превышает 3. В листьях установлено повышенное содержание Fe и Co ($K_c > 1.5$). Дополнительно в листьях сортов 'Олимпиада Колесникова' и 'Надежда' накапливаются Sr, Zr, V и Cu, сортов 'Олимпиада Колесникова' и 'Память о Кирове' – Rb, сорта 'Надежда' – Ni и Ti. Накопление элементов в стеблях, в основном, свойственно растениям сорта 'Надежда' (Br, Co, As, Ni, V, Fe).

Коэффициент биогеохимической трансформации (Z_v) формируется преимущественно из величин K_c и характеризуется значениями от 22.8 до 26.3 в листьях и от 8.3 до 15.1 в стеблях сирени (табл. 3), что соответствует высокому (25–35), среднему (15–25) и низкому (<15) уровню биогеохимической трансформации согласно градации для древесных растений, приведенной в монографии [19]. Более существенные изменения элементного состава листьев сирени под техногенным воздействием отмечены у сорта 'Надежда'. Значения Z_v листьев и стеблей растений этого сорта в 1.1–1.8 раз выше, чем у двух других сортов. По рассчитанному значению Z_v более устойчивы к загрязнению растения сорта 'Память о Кирове', которые могут быть рекомендованы для широкого использования в зеленом строительстве, а более чувствителен к антропогенному фактору сорт 'Надежда'. В целом уровень накопления элементов в листьях сирени сопоставим с результатами ряда авторов, полученных для других видов городских растений, и характерен для селитебной зоны [19, 25].

Различия в содержании элементов *S. vulgaris* трех сортов коррелируют с результатами, полученными нами ранее для этих же образцов по морфометрическим показателям. Наибольшие изменения морфометрических параметров ли-

стовой пластинки и увеличение значения коэффициента флуктуирующей асимметрии листа установлены у растений *S. vulgaris* сорта 'Надежда', а наименьшие – у сорта 'Память о Кирове' [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования представлены данные по содержанию 20 элементов в листьях и стеблях трех сортов сирени обыкновенной, произрастающей в условиях транспортно-промышленного загрязнения и фоновых условиях. Установлено, что в растениях под техногенным воздействием повышалась концентрация Nb, Br, Mn, Fe, Co, Sr и снижалось содержание Zn и Mo по сравнению с контролем. Особенностью сирени сорта 'Надежда' является более интенсивное накопление микроэлементов, суммарное содержание которых в листьях растений из транспортно-промышленного участка увеличилось в 1.9 раза по сравнению с фоновым.

Вследствие произрастания в условиях антропогенной нагрузки в листьях и стеблях растений наблюдалось изменение соотношений физиологически важных химических элементов. Наименее существенные различия в соотношении Fe/Mn, Zn/Cu характерны для растений сорта 'Память о Кирове'. Выявлено, что под техногенным воздействием сирени сортов 'Олимпиада Колесникова' и 'Память о Кирове' свойственно снижение значения соотношения K/Rb за счет повышения содержания Rb в листьях и стеблях, а сирени сорта 'Надежда', напротив, – повышение этого соотношения в городских условиях по сравнению с контролем.

Биогеохимическая трансформация микроэлементного состава листьев сирени разных сортов характеризуется средним и высоким уровнем с $Z_v = 22.8–26.3$. Наибольшее значение коэффициента биогеохимической трансформации зафиксировано для сирени сорта 'Надежда', что свидетельствует о более существенных изменениях в микроэлементном составе для этого сорта, чем для двух остальных. Выявлено, что более толерантным к загрязнению окружающей среды является сорт 'Память о Кирове', который может быть рекомендован для широкого использования в зеленом строительстве; более чувствительным к действию поллютантов – сорт 'Надежда'.

Работа выполнена в рамках государственного задания ЦСБС СО РАН по проектам АААА-А21-121011290025-2, АААА-А21-121011290027-6 при использовании оборудования ЦКП "СЦСТИ" на базе

ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН, поддержанного Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0012).

В статье использованы материалы “Биоресурсной коллекции ЦСБС СО РАН”, УНУ “Коллекции живых растений в открытом и закрытом грунте”, USU_440534.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Касимов Н. С., Битюкова В. Р., Кислов А. В., Кошелева Н. Е., Никифорова Е. М., Малхазова С. М., Шартова Н. В. Проблемы экогеохимии крупных городов // Разведка и охрана недр. 2012. № 7. С. 8–13.
- Пивкин В. М., Чиндяева Л. Н. Экологическая инфраструктура сибирского города (на примере Новосибирской агломерации). Новосибирск: Сибпринт, 2002. 184 с.
- О состоянии и об охране окружающей среды Новосибирской области в 2017 году / под ред. Ю. Ю. Марченко. Новосибирск, 2018. 235 с.
- Lugovskaya A. Yu., Khramova E. P., Chankina O. V. Effect of transport and industrial pollution on morphometric parameters and element composition of *Potentilla fruticosa* // Contemporary Problems of Ecology. 2018. Vol. 11, No. 1. P. 89–98.
- Касимов Н. С., Кошелева Н. Е., Сорокина О. И., Гунин П. Д., Бажа С. Н., Энх-Амгалан С. Эколого-геохимическая оценка состояния древесной растительности в г. Улан-Батор (Монголия) // Аридные экосистемы. 2011. Т. 17, № 4 (49). С. 14–31.
- Рихванов Л., Юсупов Д., Барановская Н., Ялалтдинова А. Элементный состав листьев тополя как биогеохимический индикатор промышленной специализации урбисистем // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19, № 6. С. 58–63.
- Ташекова А. Ж., Торопов А. С. Использование листьев растений как биогеохимических индикаторов состояния городской среды // Изв. Томск. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 5. С. 114–124.
- Patel K. S., Sharma R., Dahariya N. S., Yadav A., Blazhev V., Matini L., Hoinkis J. Heavy metal contamination of tree leaves // American Journal of Analytical Chemistry. 2015. Vol. 6, No. 8. P. 687–693.
- Terekhina N. V., Ufimtseva M. D. Leaves of trees and shrubs as bioindicators of air pollution by particulate matter in Saint Petersburg // Geography, Environment, Sustainability. 2020. Vol. 13, No. 1. P. 224–232.
- Чиндяева Л. Н., Томошевич М. А., Беланова А. П., Банаев Е. В. Древесные растения в озеленении сибирских городов. Новосибирск: Гео, 2018. 455 с.
- Масленников П. В., Дедков В. П., Куркина М. В., Ващейкин А. С., Журавлев И. О., Бавтрук Н. В. Аккумуляция металлов в растениях урбоэкосистем // Вестн. БФУ им. И. Канта. 2015. № 7. С. 57–69.
- Луговская А. Ю., Храмова Е. П., Лях Е. М., Карпова Е. А. Использование геоинформационных технологий для биоиндикации городских территорий // Вестн. СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 1. С. 173–185.
- Бакулин В. Т., Банаев Е. В., Встовская Т. Н., Киселева Т. И., Коропачинский И. Ю., Лаптева Н. П., Лоскутов Р. И., Лях Е. М., Потемкин О. Н., Чиндяева Л. Н. Древесные растения для озеленения Новосибирска. Новосибирск: Гео, 2008. 303 с.
- Лях Е. М., Воробьева И. Г., Томошевич М. А. Хозяйственно-биологическая оценка сортов *Syringa vulgaris* L. в коллекции ЦСБС СО РАН (г. Новосибирск) // Плодоводство и ягодоводство России. 2016. Т. 47. С. 201–204.
- 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.
- Piminov P. A., Baranov G. N., Bogomyagkov A. V., Berkaev D. E., Borin V. M., Dorokhov V. L., Karnaeв S. E., Kiselev V. A., Levichev E. B., Meshkov O. I., Mishnev S. I., Nikitin S. A., Nikolaev I. B., Sinyatkin S. V., Vobly P. D., Zolotarev K. V., Zhuravlev A. N. Synchrotron radiation research and application at VEPP-4 // Physics Procedia. 2016. Vol. 84. P. 19–26.
- Трунова В. А. Рентгенофлуоресцентный анализ с возбуждением синхротронным излучением – методология для исследования специфических объектов: дис. ... докт. хим. наук. Иркутск, 2017. 215 с.
- Арнаутов Н. А. Стандартные образцы химического состава природных минеральных веществ. Методические рекомендации. Новосибирск, 1990. 220 с.
- Касимов Н. С., Власов Д. В., Кошелева Н. Е., Никифорова Е. М. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы. М.: АПР, 2016. 276 с.
- Конарбаева Г. А. Оценка содержания галогенов в почвах Западной Сибири с позиций экологии // Материалы Всерос. научн. конф. с международ. участием, посвященной 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН “Почвы в биосфере”, 10–14 сентября 2018. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2018. С. 269–275.
- Ильин В. Б., Сысо А. И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 231 с.
- Ильин В. Б., Сысо А. И., Байдина Н. Л., Конарбаева Г. А., Черевко А. С. Фоновое количество тяжелых металлов в почвах юга Западной Сибири // Почвоведение. 2003. № 5. С. 550–556.
- Семендяева Н. В., Галеева Л. П., Мармулев А. Н. Почвы Новосибирской области и их сельскохозяйственное использование: учеб. пособие. Новосибирск: Новосиб. гос. аграр. ун-т. Новосибирск, 2010. 187 с.
- Конарбаева Г. А. Бром и йод в почвах г. Новосибирск // Агрохимия. 2012. № 7. С. 62–67.
- Кошелева Н. Е., Касимов Н. С., Сорокина О. И., Гунин П. Д., Бажа С. Н., Энх-Амгалан С. Геохимия ландшафтов Улан-Батора // Известия РАН. Серия географическая. 2013. № 5. С. 109–124.
- Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2010. 548 p.
- Larsson C., Helmisaari H. S. Accumulation of elements in the annual rings of Scots pine trees in the vicinity of a copper-nickel smelter measured by scanning EDXRF // X-ray Spectrometry. 1998. Vol. 27. С. 133–139.
- Ермаков В. В., Гуляева У. А., Тютюков С. Ф., Кузьмина Т. Г., Сафонов В. А. Биогеохимия кальция и стронция в ландшафтах Восточного Забайкалья // Геохимия. 2017. № 12. С. 1115–1127.
- Боярских И. Г., Сысо А. И., Васильев В. Г., Сиромля Т. И. Содержание полифенольных соединений, микро- и макроэлементов в стеблях и листьях *Lonicera caerulea* subsp. *Pallasii* (Caprifoliaceae) // Растительные ресурсы, 2016. Т. 52, № 1. С. 135–150.
- Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. Утв. Минприроды РФ 30.11.1992. 52 с.
- Чупарина Е. В., Гуничева Т. Н. Состояние и проблемы рентгенофлуоресцентного анализа растительных материалов // Аналитика и контроль, 2004. Т. 8, № 3. С. 211–226.