

УДК 543.427.4:581.192:58.02

# РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИБИРСКИХ КУСТАРНИКОВ УРБОЭКОСИСТЕМЫ

© 2023 г. Е. М. Лях<sup>1</sup>, \*, Е. П. Храмова<sup>1</sup>, А. Ю. Луговская<sup>1, 2</sup>, Я. В. Ракшун<sup>3</sup>, Д. С. Сороколетов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Центральный сибирский ботанический сад Сибирского отделения Российской академии наук”, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования

“Сибирский государственный университет геосистем и технологий”, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук”,  
Новосибирск, Россия

\*E-mail: llyakh@rambler.ru

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

После доработки 15.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Исследован элементный состав трех кустарников двух родов *Spiraea* и *Myricaria*, растущих в урбоэкосистеме г. Новосибирска и фоновых условиях методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения. Установлено не менее 20 элементов. Наиболее сильное загрязнение тяжелыми металлами в городских условиях отмечено у растений *Myricaria bracteata*. Более толерантная к загрязнению в городских условиях *Spiraea chamaedryfolia* может быть рекомендована для использования в качестве стандарта, а *M. bracteata* рекомендуется в качестве растения биоиндикатора загрязнения окружающей среды. Данные, полученные по элементному составу образцов растений и почв, могут быть включены в базы данных.

DOI: 10.31857/S0367676522701198, EDN: AADOAY

## ВВЕДЕНИЕ

Рентгенофлуоресцентная (РФА) спектроскопия является хорошо зарекомендовавшим себя аналитическим методом для качественной и количественной оценки химических элементов. Это многоэлементный, одновременный, недеструктивный метод, который в полной мере подходит для анализа объектов окружающей среды и растений в том числе [1]. Кроме того, использование синхротронного излучения (СИ) существенно улучшает возможности метода: высокая яркость источников СИ позволяет значительно сократить время набора экспериментального спектра, повышая экспрессность метода и чувствительность. Возможность перестройки энергии возбуждения в диапазоне рабочих энергий станции [2] открывает дополнительные перспективы при анализе концентраций тех химических элементов, которые могут служить маркерами различных видов растений и загрязнений. Возможность одновременного определения многих элементов с достаточно высокой чувствительностью, хорошей точностью [3, 4] в соединении с относительной простотой обработки экспериментальных спек-

тров позволяют достаточно оперативно получать данные о составе образцов. Однако сравнительно редкое использование метода РФА для анализа растительного материала связано, главным образом, с недостаточным количеством паспортизованных образцов, которые могут служить образцами сравнения при анализе методом “внешнего стандарта” [5]. В связи с чем, расширение базы данных по химическому составу растений и поиск оптимальных образцов сравнения (стандартов) может послужить решению проблемы применения метода РФА СИ в ботанических и экологических исследованиях. Кроме того, метод РФА СИ требует небольшой навески материала для анализа, что особенно актуально при изучении химического элементного состава растительных и почвенных образцов, а также позволяет определить весь комплекс химических элементов в одной пробе материала, давая этим возможность провести адекватный сравнительный анализ. Кроме того, данный метод дает возможность определять содержание элементов в широком диапазоне и не требует химической подготовки проб,

что исключает погрешности за счет привноса или удаления элементов вместе с реактивами.

Анализ микроэлементов является фундаментальной задачей в экологических науках. Оценка качества и безопасности экосистем и уровня антропогенного загрязнения проводится по содержанию микроэлементов, превышающих ПДК в окружающей среде [6]. Многими авторами для исследования урбанизированной среды в качестве биоиндикаторов используются древесные растения или их части [7]. В зависимости от вида растения проявляют разную устойчивость к загрязнению тяжелыми металлами, в связи с чем важной задачей является поиск видов различных растений как толерантных к избытку загрязнителей, так и чувствительных к техногенному стрессу для выявления влияния антропогенного фактора на растительные объекты.

Виды рода *Spiraea* L. и *Myricaria* Desv. экологически пластичны, газоустойчивы, декоративны, хорошо растут и цветут в условиях городской среды, широко используются в зеленом строительстве [8]. Отмечены их биоиндикаторные свойства загрязнения окружающей среды [9]. При этом сведения по содержанию химических элементов растений родов *Spiraea* и *Myricaria*, в литературных источниках, на наш взгляд, носят разрозненный характер и не дают объективного представления о разных таксонах.

Цель работы – определение состава и содержания элементов кустарников родов *Spiraea* и *Myricaria* в урбоэкосистеме г. Новосибирска и фоновых условиях методом РФА СИ, выявление наиболее устойчивых видов к антропогенному загрязнению и определение возможности использования растительных образцов в качестве стандартов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом исследования служили образцы двух видов спиреи – *Spiraea chamaedryfolia* L. (спирея дубравколистная) и *S. media* Schmidt (спирея средняя) из сем. Rosaceae и *Myricaria bracteata* Royle (мирикария прицветниковая) из семейства Tamaricaceae. Для исследования выбраны растения, высаженные в сквере “Мемориал Славы” в Ленинском районе г. Новосибирска, одном из наиболее неблагоприятных районов с экологической точки зрения (городские условия). Ленинский район является одним из лидирующих по выбросам оксида углерода, диоксида серы, оксидов азота, твердых загрязняющих веществ в атмосферу воздуха. В целом, уровень загрязнения атмосферы города Новосибирска оценивается как “повышенный” [10]. В качестве контрольных растений были взяты особи того же возраста, произрастающие среди лесного массива

на территории ЦСБС СО РАН, расположенного в относительно благоприятном по экологической обстановке Советском районе (Академгородок).

Отбор растительных образцов проводился 27.06.2019 г. в генеративную фазу 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 образец составляли из 5–10 особей [11]. Образцы почвы были взяты из корнеобитаемого слоя (10–15 см) общеизвестным 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 (накопитель ВЭПП-3) Сибирского Центра Синхротронного и Терагерцевого Излучения ИЯФ СО РАН. Измерения образцов проводились при энергии возбуждающего излучения 23 кэВ, время каждого измерения составляло от 300 до 500 с для растительных и почвенных навесок. Монохроматизация синхротронного излучения осуществлялась при помощи монохроматора на основе кремниевого кристалла типа “бабочка” с рабочими плоскостями (111). Регистрация флуоресцентного излучения проводилась при помощи детектора PentaFET (Oxford Instruments) с энергетическим разрешением ~135 эВ (на К $\alpha$  линии Fe – 5.9 кэВ). Основные характеристики экспериментальной станции и методические аспекты работы описаны в [3, 4].

Обработка полученных спектров проводилась в программе AXIL. Концентрацию элементов определяли с использованием метода “внешнего стандарта”. В качестве образцов сравнения использовали российские стандарты траво-злаковой смеси ГСО СОРМ1 и байкальского ила БИЛ-1 [12]. Величина ошибки – воспроизводимость результатов анализа получена путем измерения 10 параллельных измерений стандартного образца СОРМ1 и 5 – образца БИЛ-1 в 3 повторностях одинаковых образцов. Пределы обнаружения и относительное стандартное отклонение (Sr) рассчитывалось путем измерения 10 параллельных измерений стандартного образца СОРМ1 и 5 – образца БИЛ-1 в 3 повторностях одинаковых образцов (табл. 1). Как видно из табл. 1, значения  $C_{min}$  варьируются в зависимости от элемента и используемого стандартного образца. В целом, заметно снижение пределов обнаружения при переходе от легких элементов (K) к более тяжелым (Pb).

Накопление и рассеяние элементов для растений, произрастающих в городских условиях, по сравнению с фоновыми оценивалось путем рас-

**Таблица 1.** Пределы обнаружения ( $C_{min}$ ) при энергии возбуждения 23 кэВ для российских стандартов ГСО СОРМ 1 и БИЛ-1, ppm

Элементы	СОРМ 1		БИЛ-1	
	$C_{min}$	$S_r, \%$ <sup>1</sup>	$C_{min}$	$S_r, \%$
K	27	10	206	6
Ca	13	11	106	8
Ti	3	26	31	5
V	0.1	19	8	8
Cr	1.9	64	6	6
Mn	0.9	9	8	4
Fe	0.6	8	5	4
Co	0.03	36	0.3	9
Ni	0.3	39	3	4
Cu	0.15	14	2	5
Zn	0.2	12	1	5
As	н.а. <sup>2</sup>	—	1	3
Br	0.05	11	0.4	8
Rb	0.07	11	0.3	9
Sr	0.1	12	0.3	7
Y	0.6	29	0.4	12
Zr	0.5	58	0.3	16
Nb	1.4	40	0.3	9
Mo	0.07	10	0.1	14
Pb	0.05	35	0.5	14

<sup>1</sup> –  $S_r$  – относительное стандартное отклонение;

<sup>2</sup> – н.а. – концентрация химического элемента не аттестована.

чета коэффициентов концентрации ( $K_c$ ) и рассеяния ( $K_p$ ):  $K_c = C_a/C_\phi$  и  $K_p = C_\phi/C_a$ , где  $C_\phi$ ,  $C_a$  – концентрации элемента в фоновых и городских образцах соответственно. Для выявления изменений в химическом составе растений под воздействием пылегазовых эмиссий в городских условиях использовался комплексный показатель – коэффициент биогеохимической трансформации  $Zv$  [13], который рассчитывался по формуле:

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

где  $n_1$ ,  $n_2$  – 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 несущественны (табл. 2). Отмечено незначительное превышение по содержанию Ca, As, Br, Sr, Mo и снижение Mn

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 Новосибирска и Новосибирской области, представленный в работах [14–17]. Исключение составляет Br, концентрация которого в точке отбора в городе выше в 6 раз по сравнению с “фоновыми” показателями, а также на 30% возрастает концентрация Sr, что, скорее всего, связано с расположением точки отбора образцов вблизи от предприятий теплоэнергетики и автомагистралей. В целом, следует отметить, что загрязнение тяжелыми металлами в точке отбора в городских условиях оценивается как незначительное, что, скорее всего, связано с расположением участка в сквере, удаленном от автомагистралей.

Исследование содержания макро- и микроэлементов в надземных органах растений показало, что концентрация макроэлементов K и Ca выше в листьях, чем в стеблях вне зависимости от

**Таблица 2.** Содержание элементов в почвах из точек отбора растений в городских и фоновых условиях (ppm на воздушно-сухую массу)

Элемент	Город	Контроль	Фоновое содержание элементов в почвах по лит. источникам [13–16]
K	12685 ± 767 <sup>1</sup>	14769 ± 893	— <sup>2</sup>
Ca	44343 ± 3400	15565 ± 1193	—
Ti	2691 ± 133	3482 ± 172	4100 <sup>4</sup>
V	55 ± 5	69 ± 6	60 <sup>3</sup>
Cr	36 ± 2	41 ± 2	80 <sup>3</sup>
Mn	659 ± 26	795 ± 31	750 <sup>3</sup>
Fe	22123 ± 988	22836 ± 1020	38000 <sup>6</sup>
Co	11 ± 1	9 ± 1	12 <sup>3</sup>
Ni	32 ± 1	34 ± 2	35 <sup>3</sup>
Cu	27 ± 1	18 ± 1	30 <sup>3</sup>
Zn	59 ± 3	46 ± 2	70 <sup>3</sup>
As	15 ± 1	4 ± 0	15 <sup>3</sup>
Br	22 ± 2	3 ± 0.2	1.2–3.6 <sup>5</sup>
Rb	46 ± 4	47 ± 4	—
Sr	223 ± 16	142 ± 10	170 <sup>3</sup>
Y	17 ± 2	17 ± 2	—
Zr	177 ± 29	128 ± 21	250 <sup>3</sup>
Nb	7 ± 1	7 ± 1	15 <sup>3</sup>
Mo	0.7 ± 0.1	0.3 ± 0.4	3 <sup>3</sup>
Pb	15 ± 2	16 ± 2	15 <sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> – Прочерк означает, что нет данных.

<sup>3</sup> – Фоновое содержание тяжелых металлов в почвах юга Западной Сибири [14].

<sup>4</sup> – Фоновое содержание тяжелых металлов в почвах юга Западной Сибири [15].

<sup>5</sup> – Фоновое содержание галогенов в почвах Западной Сибири [13].

<sup>6</sup> – Фоновое содержание элементов в почвах Новосибирской области [16].

таксона и места произрастания (табл. 3). В городских условиях среднее содержание K в растениях ниже в 1.5 раза, чем в фоновых условиях, а содержание Ca в листьях городских растений, напротив, возрастает в 1.7 раз. Суммарное содержание микроэлементов растений на загрязненном участке выше, чем на фоновом участке. Наиболее существенные различия установлены в образцах листьев *M. bracteata* (1258 ppm). Так, суммарное содержание микроэлементов в листьях *M. bracteata* из городского участка увеличилось в 2.1 раза по сравнению с фоновым. По уровню накопле-

ния элементов виды располагаются в убывающий ряд: *M. bracteata* > *S. media* > *S. chamaedryfolia*. В стеблях растений изменения в суммарном содержании элементов при росте антропогенной нагрузки менее значительны.

Обнаружено, что в растениях под антропогенным воздействием повышалось содержание Ca, Ti, V, Fe, Co, Br, Sr, Y, Zr, Nb, Pb и снижалось K, Zn и Mo по сравнению с фоном. Наиболее сильное загрязнение тяжелыми металлами в городских условиях отмечено у растений *M. bracteata*.

**Таблица 3.** Содержание элементов в надземных органах растений родов *Spiraea* и *Myricaria*, произрастающих в городских и фоновых условиях в г. Новосибирске (ppm на воздушно-сухую массу)

Элемент	Орган растения	Город			Контроль (ЦСБС СО РАН)		
		1	2	3	1	2	3
K	л	19296 ± 1167 <sup>4</sup>	15289 ± 925	13094 ± 792	27678 ± 1674	17576 ± 1063	28509 ± 1724
	ст	7960 ± 481	7089 ± 429	7455 ± 451	13941 ± 843	7107 ± 430	11456 ± 693
Ca	л	17517 ± 1343	15195 ± 1165	32896 ± 2522	17142 ± 1314	8726 ± 669	16828 ± 1290
	ст	7849 ± 602	15004 ± 1150	4111 ± 315	13351 ± 1024	25509 ± 1956	3929 ± 301
Ti	л	14 ± 1	11 ± 1	32 ± 2	13 ± 1	8 ± 0	5 ± 0
	ст	14 ± 1	8 ± 0	4 ± 0	27 ± 1	14 ± 1	8 ± 0
V	л	0.5 ± 0.0	0.4 ± 0.0	0.4 ± 0.0	0.8 ± 0.1	0.5 ± 0.0	0.2 ± 0.0
	ст	0.4 ± 0.0	0.3 ± 0.0	0.2 ± 0.0	1.2 ± 0.1	0.8 ± 0.1	0.3 ± 0.0
Cr	л	н.д. <sup>5</sup>	1.7 ± 0.1	3.1 ± 0.2	н.д.	0.1 ± 0.0	4.0 ± 0.2
	ст	н.д.	0.8 ± 0.05	1.8 ± 0.1	н.д.	н.д.	1.7 ± 0.1
Mn	л	63 ± 2	92 ± 4	94 ± 4	103 ± 4.0	65 ± 3	158 ± 6
	ст	38 ± 2	104 ± 4	18 ± 1	72 ± 2.8	108 ± 4.3	34 ± 1.3
Fe	л	268 ± 12	222 ± 10	739 ± 33	129 ± 5.7	87 ± 4	192 ± 9
	ст	200 ± 9	112 ± 5	83 ± 4	125 ± 5.6	68 ± 3.0	52 ± 2.3
Co	л	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.3 ± 0.0	н.о. <sup>6</sup>	н.о.	0.1 ± 0
	ст	0.1 ± 0.0	н.о.	0.1 ± 0.0	н.о.	н.о.	н.о.
Ni	л	1.3 ± 0.1	1.3 ± 0.1	1.2 ± 0.1	1.9 ± 0.1	1.2 ± 0.1	1.1 ± 0.1
	ст	0.9 ± 0.0	1.1 ± 0.1	2.5 ± 0.1	1.5 ± 0.1	0.9 ± 0.0	2.2 ± 0.1
Cu	л	4.8 ± 0.3	5.5 ± 0.3	5.2 ± 0.3	6.0 ± 0.3	4.5 ± 0.2	4.8 ± 0
	ст	4.1 ± 0.2	4.6 ± 0.2	6.2 ± 0.3	10.5 ± 0.5	6.3 ± 0.3	5.2 ± 0.3
Zn	л	13 ± 1	24 ± 1	36 ± 2	16 ± 1	39 ± 2	63 ± 3
	ст	67 ± 3	45 ± 2	23 ± 1	73 ± 4	121 ± 6	34 ± 2
As	л	0.1 ± 0.0	1.0 ± 0.0	н.д.	0.5 ± 0.0	0.4 ± 0	н.д.
	ст	0.7 ± 0.0	0.4 ± 0.0	1.4 ± 0.04	0.9 ± 0.0	1.0 ± 0.0	0.2 ± 0.0
Br	л	2.1 ± 0.2	0.9 ± 0.1	37.8 ± 2.9	6.0 ± 0.5	1.5 ± 0.1	20.8 ± 1.6
	ст	0.4 ± 0.0	0.5 ± 0.0	35.1 ± 2.7	2.0 ± 0.2	0.4 ± 0.0	12.3 ± 0.9
Rb	л	5 ± 0	3 ± 0	9 ± 1	5 ± 0	2 ± 0	8 ± 1
	ст	3 ± 0	2 ± 0	3 ± 0	3 ± 0	1 ± 0	2 ± 0
Sr	л	141 ± 10	93 ± 7	274 ± 20	104 ± 7.5	43 ± 3	121 ± 9
	ст	100 ± 7	149 ± 11	64 ± 5	116 ± 8	144 ± 10	46 ± 3
Y	л	0.1 ± 0.0	0.6 ± 0.1	10.1 ± 1.2	0.1 ± 0.0	н.д.	2.2 ± 0.3
	ст	0.9 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.2 ± 0.0	н.д.	0.3 ± 0.0	0.3 ± 0.0
Zr	л	0.8 ± 0.1	0.6 ± 0.1	9.1 ± 1.5	0.5 ± 0.1	0.3 ± 0.0	0.9 ± 0.2
	ст	0.9 ± 0.1	0.6 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.6 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.4 ± 0.1
Nb	л	0.6 ± 0.1	0.3 ± 0.0	2.3 ± 0.2	0.3 ± 0.0	0.9 ± 0	0.1 ± 0.0
	ст	1.9 ± 0.2	0.1 ± 0.0	1.9 ± 0.2	1.0 ± 0.1	н.д.	1.2 ± 0.1
Mo	л	0.7 ± 0.1	0.3 ± 0.0	1.9 ± 0.3	2.0 ± 0.3	4.3 ± 0.6	3.6 ± 0.5
	ст	0.3 ± 0.0	0.2 ± 0.0	0.3 ± 0.0	0.8 ± 0.1	1.6 ± 0.2	0.4 ± 0.1
Pb	л	1.0 ± 0.1	1.7 ± 0.2	2.9 ± 0.4	1.1 ± 0.2	0.9 ± 0.1	1.5 ± 0.2
	ст	1.8 ± 0.2	1.0 ± 0.0	2.0 ± 0.3	1.4 ± 0.2	1.3 ± 0.2	0.8 ± 0.1

Примечание: <sup>1</sup> – *Spiraea chamaedryfolia*;

<sup>2</sup> – *Spiraea media*;

<sup>3</sup> – *Myricaria bracteata*;

<sup>4</sup> – среднее значение ± стандартное отклонение;

<sup>5</sup> – н.д. означает, что нет данных;

<sup>6</sup> – н.о. означает – ниже предела обнаружения (0.01 ppm).

**Таблица 4.** Оценка экологического состояния растений родов *Spiraea* и *Myricaria*, произрастающих в г. Новосибирске

Виды	Zv
<i>Spiraea chamaedryfolia</i>	15.3
<i>Spiraea media</i>	38.4
<i>Myricaria bracteata</i>	65.7

Рассчитан коэффициент биогеохимической трансформации ( $Zv$ ), отражающий нарушение нормальных соотношений элементов в органах растений в результате усиления антропогенной нагрузки. Наиболее существенные изменения элементного состава растений под антропогенным воздействием отмечены у растений вида *M. bracteata*,  $Zv$  листьев которого равно 65.7, что в 1.7–4.3 раза выше, чем у растений рода *Spiraea*. Наиболее устойчивы к антропогенному загрязнению растения *S. chamaedryfolia* ( $Zv = 15.3$ ) (табл. 4). Поскольку более толерантной к загрязнению в городских условиях выделена *S. chamaedryfolia*, то может быть рекомендована для использования в качестве стандарта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования представлены данные по содержанию 20 элементов в урбанизированных и фоновых почвах г. Новосибирска. Отмечено превышение по содержанию Ca, Br, Sr, Cu, Zn, Zr и Mo в урбанизированных почвах по сравнению с фоном.

Установлено не менее 20 элементов в листьях и стеблях двух видов растений рода *Spiraea* – *S. chamaedryfolia* и *S. media* и *Myricaria bracteata*, произрастающих в условиях урбоэкосистемы и фоновых. В растениях под техногенной нагрузкой повышалась концентрация Ca, Ti, V, Fe, Co, Br, Sr, Y, Zr, Nb, Pb и снижалось содержание K, Zn и Mo по сравнению с фоном. Наиболее сильное загрязнение тяжелыми металлами в городских условиях отмечено у растений *M. bracteata*. Более высокие величины коэффициента биогеохимической трансформации ( $Zv$ ) зафиксированы для листьев *M. bracteata*, что свидетельствует о более существенных изменениях в микроэлементном составе, чем для *Spiraea*. Наиболее толерантной к загрязнению в городских условиях выделена *S. chamaedryfolia*, которая может быть рекомендована для использования в качестве стандарта, а также использования в зеленом строительстве. Вид *M. bracteata* рекомендуется в качестве растения биондикатора загрязнения окружающей среды.

Авторы выражают благодарность Ольге Васильевне Чанкиной за выполнение анализов. Работа выполнена в рамках государственного задания ЦСБС СО РАН по проектам AAAA-A21-121011290027-6 и AAAA-A21-121011290025-2 с использованием УНУ коллекции живых растений ЦСБС СО РАН (CSBG SB RAS USU 440534) в ЦКП СЦСТИ на базе УНУ “Новосибирский ЛСЭ”, “Комплекс VEPP-4 -VEPP-2000” Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, поддержанное проектом RFMEFI62119X0022.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rodrigues E.S., Gomes M.H.F., Duran N.M. et al. // Front. Plant Sci. 2018. V. 9. Art. No. 1588.
2. Trunova V.A., Sidorina A.V., Zolotarev K.V. // X-ray Spectrum. 2015. V. 44. No. 4. P. 226.
3. Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V. et al. // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 19.
4. Дарьин А.В., Ракшун Я.В. // Науч. вестн. Новосиб. гос. техн. ун-та. 2013. № 2(51). С. 112.
5. Васильева И.Е., Шабанова Е.В. // ЖАХ. 2021. Т. 76. № 2. С. 99; Vasil'eva I.E., Shabanova E.V. // J. Analyt. Chem. 2021. V. 76. No. 2. P. 137.
6. Terzano R., Denecke M.A., Falkenberg G. et al. // Pure Appl. Chem. 2019. V. 91. No. 6. P. 1029.
7. Terekhina N.V., Ufimtseva M.D. // Geogr. Environ. Sustain. 2020. V. 13. No. 1. P. 224.
8. Чиндеяева Л.Н., Томошевич М.А., Беланова А.П., Банаев Е.В. Древесные растения в озеленении сибирских городов. Новосибирск: Изд-во “Гео”, 2018. 457 с.
9. Луговская А.Ю., Храмова Е.П., Лях Е.М., Карпова Е.А. // Вест. СГУГиТ. 2020. Т. 25. № 1. С. 173.
10. Обзор состояния окружающей среды в городе Новосибирске за 2019 год. Новосибирск, 2020. 100 с.
11. Khramova E., Lyakh E., Chankina O. et al. // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299. Art. No. 070005.
12. Арнаутов Н.А. Стандартные образцы химического состава природных минеральных веществ. Методические рекомендации. Новосибирск, 1990. 220 с.
13. Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы. М.: АПР, 2016. 276 с.
14. Конараева Г.А. // Мат. всерос. научн. конф. с международ. участием “Почвы в биосфере” (Томск, 2018). С. 269.
15. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 231 с.
16. Ильин В.Б., Сысо А.И., Байдина Н.Л. и др. // Почвоведение. 2003. № 5. С. 550.
17. Семендеяева Н.В., Галеева Л.П., Мармулев А.Н. Почвы Новосибирской области и их сельскохозяйственное использование: учеб. пособие. Новосибирск: НГАУ, 2010. 187 с.

## SR-XRFA in research of Siberian shrubs of the urban ecosystem

E. M. Lyakh<sup>a</sup>, \* E. P. Khramova<sup>a</sup>, A. Yu. Lugovskaya<sup>a, b</sup>, Ia. V. Rakshun<sup>c</sup>, D. S. Sorokoletov<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

<sup>b</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, 630090 Russia

<sup>c</sup> Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

\*e-mail: llyakh@rambler.ru

A study has been first made of the element composition of the plants of three species of two genus *Spiraea* and *Myricaria*, growing in the Novosibirsk Urban Ecosystem and the soil samples from their habitat by method of Xray fluorescence analysis using synchrotron radiation (SR-XRFA). The most severe heavy metal pollution in urban conditions was noted in *Myricaria bracteata* plants. The species *Spiraea chamaedryfolia*, the most tolerant to pollution in urban conditions may be recommended as a standard and *M. bracteata* is recommended as a bioindicator plant for environmental pollution. The data obtained on the elemental composition of plant samples and soils may be included in the databases.