

Использование метода РФА СИ в исследовании экологического состояния техногенной среды в Новосибирской области

Л. Л. Седельникова¹, Е. П. Храмова¹, О. В. Чанкина²
Я. В. Ракшун³, Д. С. Сороколетов³

¹Центральный сибирский ботанический сад СО РАН
Новосибирск, Россия

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

³Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

Аннотация

С помощью метода рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ) определен элементный состав в почвах и растениях *Hemerocallis hybrida* hort., произрастающих в местах с разным уровнем загрязнения в Новосибирской области. Выявлено, что основными элементами-загрязнителями в техногенной среде, накапливающимися в избыточной концентрации в листьях и корневищах растений, являются свинец, никель, цинк, железо, титан и хром. Методом РФА СИ получены достоверные данные по содержанию 20 микро- и макроэлементов в растениях *Hemerocallis hybrida* в различных промышленно-транспортных условиях загрязнения.

Ключевые слова

РФА СИ, элементный состав, почва, лист, корневище, *Hemerocallis hybrida*, урбанизированная среда

Источник финансирования

Работа выполнена с использованием инфраструктуры ЦКП «СЦСТИ» на базе ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН, под держанного Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEF 162117X0012). Исследование выполнено в рамках государственного задания ЦСБС СО РАН № АААА-А17-1170126100053-9 с использованием биоресурсной научной коллекции ЦСБС СО РАН USU 440534.

Для цитирования

Седельникова Л. Л., Храмова Е. П., Чанкина О. В., Ракиун Я. В., Сороколетов Д. С. Использование метода РФА СИ в исследовании экологического состояния техногенной среды в Новосибирской области // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 3. С. 97–108. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-97-108

SR XRF Method Used to Study the Ecological State of Technogenic Surroundings in the Novosibirsk Region

L. L. Sedelnikova¹, E. P. Khramova¹, O. V. Chankina²
Ya. V. Rakshun³, D. S. Sorokoletov³

¹ The Central Siberian Botanical Garden SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

² Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

³ Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

The method of X-ray fluorescence analysis involving synchrotron radiation (SR XRAF) is used to determine the element composition of soil and plants *Hemerocallis hybrida* hort., growing in the places of different pollution level in the Novosibirsk Oblast. It has been established that the main element pollutants of a technogenic environment, accumulated in excess concentrations in plant leaves and rhizomes are lead, nickel, iron, titanium, and chromium. The SR XRF method provides the reliable data on the content of 20 micro- and macroelements of the plants *Hemerocallis hybrida*, in the various industrial and transport conditions of pollution.

Keywords

RFA SI, elemental composition, soil, leaf, rhizome, *Hemerocallis hybrida*, urban environment

Funding

The work was carried out using the infrastructure of the CCP "SCS" on the basis of VEPP-3 of the INP SB RAS, supported by the Ministry of education and science of Russia (unique project ID RFMEF 162117X0012). The study was carried out within the framework of the state task of the CSBs SB RAS No. AAAAA 17-1170126100053-9, using the bioresource scientific collection of the CSBs SB RAS USU 440534.

For citation

Sedelnikova L. L., Khramova E. P., Chankina O. V., Rakshun Ya. V., Sorokoletov D. S. SR XRF Method Used to Study the Ecological State of Technogenic Surroundings in the Novosibirsk Region. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 3, p. 97–108. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-97-108

Исследование элементного состава растений, произрастающих в крупных мегаполисах, при использовании современного метода РФА СИ [1; 2] дает объективную оценку состояния экологического загрязнения, поскольку растения выполняют важную роль в биосфере, аккумулируя макро- и микроэлементы из окружающей среды. В современных условиях урбанизированная среда подвержена комбинированному промышленно-транспортному загрязнению [3–7]. В ее очищении от избытка элементов, к числу которых относятся тяжелые металлы – наиболее распространенные и опасные для биоты загрязнители, решающее значение имеют зеленые насаждения. Экспрессность, панорамность, недеструктивность использования метода РФА СИ позволяет выявить специфику накопления химических элементов органами растений, что вносит в исследование новизну и актуальность на современном этапе развития техногенных территорий.

Цель работы заключалась в определении элементного состава растений *Hemerocallis hybrida* и почвы в местах их выращивания с разным уровнем загрязнения в Новосибирской области методом РФА СИ.

Пробоподготовка и эксперимент

Материалом исследования служили растения *Hemerocallis hybrida* hort. (сем. *Hemerocallidaceae* R. Br.) (сорт *Speak to me*), произрастающие на семи участках в 50 м от проезжих дорог в городах Новосибирск (Советский район), Бердск (город-спутник Новосибирска) и поселке городского типа Кольцово (Новосибирская обл.), различающихся по уровню про-

мышленно-транспортного загрязнения. Участок 1 – ул. Белокаменная, микрорайон Южный (Бердск); 2 – ул. Боровая (Бердск); 3 – ул. Векторное шоссе вблизи Научно-производственного объединения «Вектор» (п.г.т. Кольцово); 4 – ул. Промзона (п.г.т. Кольцово); 5 – ул. Софийская (левый берег в районе Новосибирской ГЭС вблизи ФГУП Опытный завод СО РАН, Новосибирск, Советский район); 6 – пересечение ул. Русской и Бердского шоссе (микрорайон Шлюз, Новосибирск, Советский район); 7 – ул. Плотинная (вблизи завода железобетонных изделий (ЗЖБИ), Новосибирск, Советский район); контроль – участок ЦСБС СО РАН, расположенный в зоне благоприятной экологической ситуации. Образцы почв взяты из слоя 0–15 см – основной зоны минерального питания, по общепринятой методике [8].

Для определения содержания элементов осенью одновременно брали среднюю пробу листьев, корневищ и почвы из каждого участка. Навеску воздушно-сухого растительного сырья и почв (1 г) измельчали в агатовой ступке. Далее образцы прессовали в форме таблетки диаметром ~ 1 см, весом 30 мг (с поверхностной плотностью 0,04 г/см²). Определение элементов проводили методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ) на станции элементного анализа (накопитель ВЭПП-3) Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН [9]. Данный метод имеет ряд преимуществ при исследовании элементов: возможность монохроматизации, наличие поляризации пучка и малой его угловой расходимости, поляризации СИ, что значительно ускоряет время проведения данного эксперимента и уменьшает радиационную нагрузку на образцы, ведет к значительному уменьшению фона (до 10⁻¹⁰ г/г) и тем самым значительно повышает достоверность эксперимента [1; 2; 10]. Традиционные методы (ААС, АЭС, ИСП-МС) анализа химических элементов почв и растений имеют ряд недостатков и отличаются длительностью эксперимента, при котором происходит полное разрушение матрицы образца минеральными кислотами. Измерения образцов проводились при энергии возбуждающего излучения 23 кэВ, время каждого измерения составляло от 300 до 500 с. Монохроматизация синхротронного излучения осуществлялась при помощи монохроматора на основе кремниевого кристалла типа «бабочка» с рабочими плоскостями (111). Регистрация флуоресцентного излучения осуществлялась при помощи детектора PentaFET (Oxford Instruments) с энергетическим разрешением ~ 135 эВ (на K α линии Fe – 5,9 кэВ). Основные характеристики экспериментальной станции и методические аспекты работы описаны в [11–12]¹.

Обработка полученных спектров проводилась в программе AXIL методом наименьших квадратов. Концентрация элементов была определена с использованием метода «внешнего стандарта». Предел обнаружения составлял от 10⁻⁷ г/г. В качестве образцов сравнения использовали российские стандарты травно-злаковой смеси ГСО СОРМ1 и байкальского ила БИЛ-1 [13]. Величина ошибки – воспроизводимость результатов анализа получена путем 15-ти параллельных измерений 5-ти одинаковых образцов. Относительное стандартное отклонение для большинства элементов варьировало от 1 до 13 %, Ni, As и Zr – 20 %, Y и Pb – 40 %, Cr – более 50 %. Статистический анализ данных выполнен с использованием пакета прикладных программ Statistica 6.1 и Microsoft Office Excel 2007.

Результаты и обсуждение

В почвах обнаружено 20 элементов, содержание которых отличалось в зависимости от техногенного воздействия на данных участках (табл. 1). Наиболее загрязнена тяжелыми металлами почва на участке 6, где содержание Pb превышало фоновое значение в 45 раз, а ПДК – в 21 раз; Cu, Ni и Zn выше в 1,3–6,5 раза, чем фоновое, а Zn превышало ПДК². Концентрация

¹ См. также: Экспериментальная станция рентгенофлуоресцентного элементного анализа. URL: <http://ssrc.inp.nsk.su/СКР/stations/passport/3/> (дата обращения 10.06.2014).

² Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. ГН 2.17.2041-06. М., 2006. 15 с.

Са в почвах участков 2, 6 и 7 превышает фоновое значение в 10 раз. По шкале техногенного загрязнения почвы химическими веществами [14] установлено, что на участке 6 значение величины суммарного показателя концентрации (Z_c) [15] составляет 33, что соответствует высоко-опасному загрязнению почв, превышающему ПДК. На участке 2 показатель $Z_c > 16$, что соответствует умеренно-опасному, так как выше ПДК. На остальных участках $Z_c < 16$, что оценивается как допустимое загрязнение, превышающее фоновое содержание элементов, но не достигающее ПДК.

Исследование уровней накопления макроэлементов в надземных и подземных органах *H. hybrida* показало, что концентрация Са всегда выше в листьях растений, чем в корневищах. Наиболее высоким содержанием Са (24 мг/г) выделяются листья растений с участка 4 и корневища из участка 6 (16 мг/г). Калий в больших концентрациях накапливался в листьях растений (участки 1–3, 7) по сравнению с корневищами. В остальных точках отбора содержание К выше в корневищах. Распределение таких микроэлементов, как Pb, Cr, Y, As, сильно зависит от уровня техногенного стресса (табл. 2, 3). Отмечено равномерное распределение Cu, Sc и Sr по органам, Вг и Мо в больших концентрациях отмечаются в листьях, а содержание Fe, Ti, Mn, Zn, Zr, V, Ni значительно выше в корневищах.

Суммарное содержание микроэлементов выше в корневищах, чем в листьях *H. hybrida* (рис. 1), наибольшее их значение отмечено у растений, выращенных на участках 7 (7738 мг/кг), 4 (7497 мг/кг) и 5 (6896 мг/кг), где их содержание в 5,5–6,2 раза выше, чем в контроле. Максимальное накопление Fe, Ti, V, Mn, Co, Sr и Nb обнаружено в корневищах *H. hybrida* на участке 7, где основной вклад в загрязнение окружающей среды вносит ЗЖБИ (см. табл. 2). Содержание Pb, Zn, Ni и Мо в корневищах растений из участка 6, где заметное загрязнение атмосферы и почвы происходит за счет автотранспорта, возрастает в 2–5 раз по сравнению с контрольными растениями и превышает нормальные пределы. Обнаружено повышенное накопление Cr в корневищах растений на участках 2 и 3. Содержание Zr практически во всех образцах в 7–33 раза выше, чем в контроле, максимум (549 мг/кг) наблюдался в корневищах растений из участка 4 в окрестности п.г.т. Кольцово.

Наибольшее суммарное содержание микроэлементов выявлено в листьях растений из участка 5 (5696 мг/кг), несколько ниже – из участка 6 (3412 мг/кг), что в 3,5–6 раз выше, чем в контроле. В условиях усиленного техногенного стресса в листьях растений из участков 5–7 отмечено значительное накопление тяжелых металлов и As. Так, на участке 5 уровень накопления Fe возрастает в 5 раз, Mn – в 3,5 раза, Ti – в 7 раз, Zr – в 8 раз, Y – в 23 раза по сравнению с контролем. По повышенному содержанию Pb, Cu, Sc и Zn в листьях выделяются растения из участка 6. Содержание Ni повышено в листьях растений из участка 7. В селитебных зонах (участки 1 и 2) суммарное содержание микроэлементов в листьях растений сопоставимо с контролем.

При выявлении связи накопления микро- и макроэлементов с условиями выращивания *H. hybrida* установлено, что соотношения между отдельными элементами (Fe/Mn, Ca/Fe, Zn/Cu, Sr/Ca) претерпевают изменения. Выявлен сдвиг в соотношении Fe/Mn в пользу Fe для растений, подвергнутых техногенному стрессу. Его величина составила для листьев растений из наиболее загрязненных участков (5–7) от 15 до 19, тогда как в контроле равнялась 13. Подобные сдвиги в соотношении Fe/Mn известны [4; 16–18] и в большинстве случаев связаны с повышением содержания Fe. Согласно полученным данным, концентрация Mn в листьях *H. hybrida* на загрязненных участках выше, чем в контроле. Величина отношения Ca/Fe в листьях растений также зависит от условий произрастания, и в контроле она составляет 19, на наиболее загрязненных местообитаниях снижена до 3 (участок 5), 11–12 (участок 6), что связано с повышением уровня Fe в этих образцах. В листьях из участка 2 содержание Fe сопоставимо с фоновым, но возрастает содержание Са, в результате значение соотношения Ca/Fe достигает 28. Установлено, что с увеличением уровня техногенного стресса возрастает

Таблица 1

Содержание элементов в почвах в местах выращивания *Heimerocallis hybrida* в Новосибирской области в условиях техногенного загрязнения (K, Ca, Fe даны в мг/г, остальные элементы – в мг/кг)

Table 1

The content of elements in soils in places of cultivation of *Heimerocallis hybrida* in the Novosibirsk region in the conditions of technogenic pollution (K, Ca, Fe are given in mg/g, other elements – in mg/kg)

Элемент	Участок							контрольный
	1	2	3	4	5	6	7	
K	17 ± 0,3*	14 ± 0,3	14 ± 0,3	12 ± 0,3	15 ± 0,3	17 ± 0,3	11 ± 0,2	14 ± 0,3
Ca	14 ± 0,3	132 ± 3	18 ± 0,3	33 ± 0,7	26 ± 0,5	107 ± 2	123 ± 2	13 ± 0,2
As	2,9 ± 0,6	2,9 ± 0,6	2,1 ± 0,4	1,6 ± 0,3	2,2 ± 0,4	1,2 ± 0,2	0,8 ± 0,2	1,5 ± 0,3
Br	9 ± 0,1	3,3 ± 0,0	4,7 ± 0,0	6,6 ± 0,1	6,4 ± 0,1	6,7 ± 0,1	0,6 ± 0,0	4,5 ± 0,0
Co	14 ± 1	6 ± 1	12 ± 1	8 ± 1	11 ± 1	9 ± 1	5 ± 0	11 ± 1
Cr	69 ± 35	19 ± 10	49 ± 25	40 ± 20	47 ± 24	47 ± 24	21 ± 11	40 ± 20
Cu	27 ± 1	20 ± 1	24 ± 1	20 ± 1	29 ± 1	40 ± 1	13 ± 0	17 ± 1
Fe	31 ± 0,3	11 ± 0,1	28 ± 0,3	16 ± 0,2	24 ± 0,2	19 ± 0,2	9 ± 1	21 ± 0,2
Mn	764 ± 8	271 ± 3	735 ± 7	536 ± 5	655 ± 7	541 ± 5	230 ± 2	705 ± 7
Mo	0,30 ± 0,01	0,00	0,10 ± 0,00	0,30 ± 0,01	0,30 ± 0,01	0,50 ± 0,01	0,01 ± 0,00	0,40 ± 0,01
Nb	13 ± 7	4 ± 2	10 ± 5	6 ± 3	9 ± 5	5 ± 3	2 ± 1	12 ± 6
Ni	48 ± 10	18 ± 4	42 ± 8	27 ± 5	44 ± 9	49 ± 10	15 ± 3	32 ± 6
Pb	71 ± 28	160 ± 64	99 ± 40	161 ± 64	170 ± 68	675 ± 270	66 ± 26	96 ± 38
Rb	74 ± 1	51 ± 1	66 ± 1	47 ± 1	60 ± 1	53 ± 1	43 ± 1	59 ± 1
Sc	5 ± 1	57 ± 9	6 ± 1	14 ± 2	6 ± 1	50 ± 8	44 ± 7	5 ± 1
Sr	175 ± 2	161 ± 2	173 ± 2	153 ± 2	187 ± 2	160 ± 2	117 ± 1	174 ± 2
V	88 ± 9	28 ± 3	80 ± 8	48 ± 5	67 ± 7	49 ± 5	27 ± 3	67 ± 7
Ti	4001 ± 360	1128 ± 102	3885 ± 350	2104 ± 189	3353 ± 302	1807 ± 163	1051 ± 95	4009 ± 361
Y	31 ± 10	21 ± 7	27 ± 8	15 ± 5	20 ± 6	12 ± 4	5 ± 2	20 ± 6
Zn	67 ± 1	66 ± 1	57 ± 1	59 ± 1	85 ± 1	461 ± 5	29 ± 0	41 ± 0
Zr	368 ± 74	68 ± 14	298 ± 60	211 ± 42	229 ± 46	70 ± 14	37 ± 7	304 ± 61

* В табл. 1–3: среднее значение ± стандартное отклонение.

Таблица 2

Содержание элементов в корневищах растений *Heimerocallis hybrida*, выращиваемых в Новосибирской области в условиях техногенного загрязнения (К, Са даны в мг/г, остальные элементы – в мг/кг)

Table 2

The content of elements in the rhizomes of plants *Heimerocallis hybrida* grown in the Novosibirsk region under conditions of anthropogenic pollution (K, Ca are given in mg/g, the remaining elements – in mg/kg)

Элемент	Участок						
	1	2	3	4	5	6	7
К	12 ± 0,2	15 ± 0,3	12 ± 0,2	12 ± 0,2	8 ± 0,2	12 ± 0,2	11 ± 0,2
Са	7 ± 0,1	10 ± 0,2	8 ± 0,2	11 ± 0,2	8 ± 0,2	16 ± 0,3	11 ± 0,2
As	0,09 ± 0,02	0,06 ± 0,01	0,20 ± 0,04	0,2 ± 0,05	0,24 ± 0,05	0,12 ± 0,02	0,20 ± 0,04
Br	0,5 ± 0,0	0,8 ± 0,0	1,4 ± 0,0	2,3 ± 0,0	1,7 ± 0,0	2,2 ± 0,0	1,3 ± 0,0
Co	0,3 ± 0,0	0,2 ± 0,0	1,2 ± 0,1	1,6 ± 0,1	1,4 ± 0,1	1,5 ± 0,1	1,7 ± 0,1
Cr	23 ± 12	189 ± 95	83 ± 41	121 ± 60	127 ± 64	106 ± 53	143 ± 71
Cu	5,7 ± 0,2	6,4 ± 0,2	6,5 ± 0,2	5,7 ± 0,2	8,3 ± 0,3	7,9 ± 0,2	6,1 ± 0,2
Fe	924 ± 9	918 ± 9	3913 ± 39	5569 ± 56	5251 ± 53	4480 ± 45	5958 ± 60
Mn	51 ± 0,1	72 ± 0,1	163 ± 0,2	239 ± 0,2	201 ± 0,2	181 ± 0,2	235 ± 0,2
Mo	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,5 ± 0,0	0,1 ± 0,0
Nb	2 ± 1	3 ± 2	11 ± 5	21 ± 10	20 ± 10	13 ± 6	21 ± 11
Ni	3,5 ± 0,7	1,8 ± 0,4	6,7 ± 1,3	6,7 ± 1,3	7,6 ± 1,5	8,4 ± 1,7	7,8 ± 1,6
Pb	н.о.*	4 ± 2	2 ± 1	6 ± 2	5 ± 2	17 ± 7	5 ± 2
Rb	6,0 ± 0,1	7,4 ± 0,1	16,2 ± 0,3	20,5 ± 0,4	19,7 ± 0,4	17,3 ± 0,3	19,6 ± 0,4
Sc	0,01 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,001 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,01 ± 0,00
Sr	38 ± 0,4	39 ± 0,4	70 ± 1	100 ± 1	96 ± 1	72 ± 1	100 ± 1
V	1,0 ± 0,1	0,7 ± 0,1	4,3 ± 0,4	8,1 ± 0,8	6,4 ± 0,6	5,5 ± 0,6	7,6 ± 0,8
Ti	141 ± 13	153 ± 14	486 ± 44	789 ± 71	761 ± 69	552 ± 50	938 ± 84
Y	1 ± 0	6 ± 2	6 ± 2	12 ± 5	12 ± 5	8 ± 3	15 ± 6
Zn	29 ± 0	35 ± 0	38 ± 0	45 ± 0	42 ± 0	104 ± 1	32 ± 0
Zr	17 ± 3	25 ± 5	162 ± 32	549 ± 110	336 ± 67	240 ± 48	247 ± 49

* Н.о. – концентрация элемента ниже предела обнаружения (0,1 мг/кг).

Таблица 3

Содержание элементов в листьях растений *Hemerocallis hybrida*, выращиваемых в Новосибирской области в условиях техногенного загрязнения (K, Ca даны в мг/г, остальные элементы – в мг/кг)

Table 3

The content of elements in the leaves of plants *Hemerocallis hybrida* grown in the Novosibirsk region under conditions of anthropogenic pollution (K, Ca are given in mg/g, the remaining elements – in mg/kg)

Элемент	Участок						
	1	2	3	4	5	6	7
К	24 ± 0,5	18 ± 0,4	30 ± 1	9 ± 0	6 ± 0	9 ± 0	20 ± 0
Ca	9 ± 0,2	16 ± 0,3	11 ± 0,2	24 ± 0,5	10 ± 0,2	21 ± 0,4	18 ± 0,4
As	0,08 ± 0,02	0,02 ± 0,00	0,05 ± 0,01	0,12 ± 0,02	0,19 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,08 ± 0,02
Br	5,7 ± 0,1	4,5 ± 0,0	2,4 ± 0,0	2,4 ± 0,0	3,4 ± 0,0	2,9 ± 0,0	2,8 ± 0,0
Co	0,130,01	0,14 ± 0,01	0,13 ± 0,01	0,57 ± 0,05	0,52 ± 0,05	0,36 ± 0,03	0,58 ± 0,05
Cr	7 ± 3	138 ± 69	91 ± 46	26 ± 13	1064 ± 532	759 ± 379	36 ± 18
Cu	4,5 ± 0,1	3,9 ± 0,1	5,1 ± 0,2	5,3 ± 0,2	5,4 ± 0,2	9,0 ± 0,3	66 ± 0,2
Fe	666 ± 7	551 ± 6	524 ± 5	1607 ± 16	3298 ± 33	1950 ± 19	1465 ± 15
Mn	50 ± 1	61 ± 1	65 ± 1	127 ± 1	173 ± 2	119 ± 1	96 ± 1
Mo	0,1 ± 0,0	0,4 ± 0,0	0,6 ± 0,0	0,3 ± 0,0	0,4 ± 0,0	0,4 ± 0,0	0,2 ± 0,0
Nb	8 ± 4	2 ± 1	2 ± 1	20 ± 10	13 ± 7	5 ± 3	18 ± 9
Ni	3, ± 0,6	1,4 ± 0,3	2,5 ± 0,5	4,0 ± 0,8	3,3 ± 0,7	3,5 ± 0,7	4,9 ± 1,0
Pb	1,7 ± 0,7	4,1 ± 1,6	1,0 ± 0,4	3,5 ± 1,4	16,5 ± 6,6	20,4 ± 8,2	2,7 ± 1,1
Rb	4,5 ± 0,1	8,3 ± 0,2	9,7 ± 0,2	5,9 ± 0,1	21,5 ± 0,4	10,8 ± 0,2	7,3 ± 0,1
Sc	0,01 ± 0,00	0,02 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,02 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,02 ± 0,00	0,02 ± 0,00
Sr	69 ± 1	54 ± 1	46 ± 0	101 ± 1	1333 ± 1	103 ± 1	65 ± 1
V	0,7 ± 0,1	0,5 ± 0,0	0,5 ± 0,1	1,6 ± 0,2	3,0 ± 0,3	1,7 ± 0,2	1,3 ± 0,1
Ti	79 ± 7	88 ± 8	97 ± 4	247 ± 22	523 ± 47	263 ± 24	146 ± 13
Y	2 ± 1	4 ± 2	4 ± 1	6 ± 2	39 ± 16	14 ± 5	4 ± 2
Zn	17 ± 0	22 ± 0	35 ± 0	18 ± 0	39 ± 0	73 ± 1	27 ± 0
Zr	45 ± 9	14 ± 3	14 ± 3	84 ± 17	359 ± 72	78 ± 16	40 ± 8

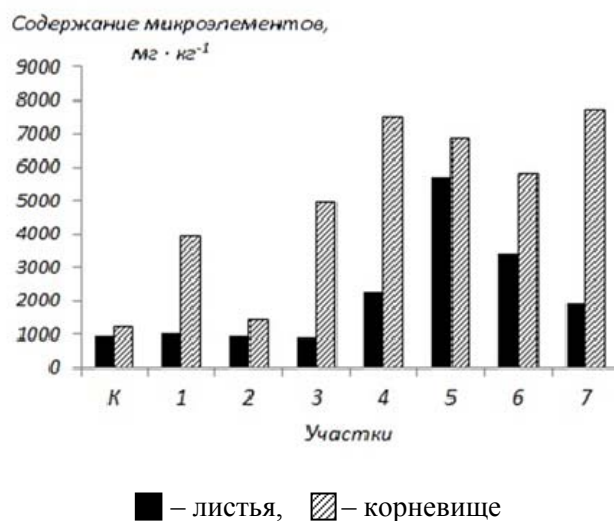


Рис. 1. Суммарное содержание микроэлементов в листьях и корневищах *Hemerocallis hybrida*, выращиваемых в Новосибирской области в условиях техногенного загрязнения.

По оси ординат – содержание микроэлементов, мг/кг;

по оси абсцисс – контрольный и техногенные участки

Fig. 1. The total content of trace elements in the leaves and rhizomes of *Hemerocallis hybrida* grown in the Novosibirsk region in conditions of man-made pollution

On the ordinate axis – the content of trace elements, mg/kg;

on the axis abscissa – control and technogenic areas

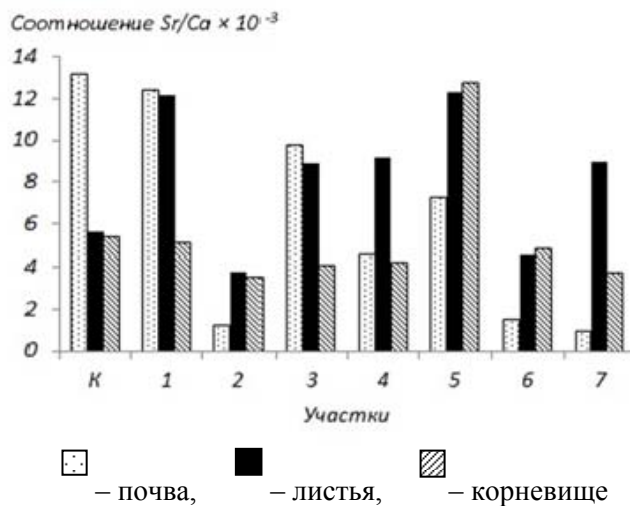


Рис. 2. Соотношение Sr/Ca $\times 10^{-3}$ в почвах, листьях и корневищах *Hemerocallis hybrida*, выращиваемых в Новосибирской области в условиях техногенного загрязнения.

По оси ординат – содержание микроэлементов, мг/кг;

по оси абсцисс – контрольный и техногенные участки

Fig. 2. The Sr/Ca ratio is 10^{-3} in soils, leaves and rhizomes of *Hemerocallis hybrida* grown in the Novosibirsk region under conditions of technogenic pollution.

On the axis ordinate – the content of trace elements, mg/kg;

on the axis abscissa – control and technogenic areas.

величина отношения Zn/Cu в листьях растений. В контроле это значение равняется 4, в загрязненном участке 6 выше в 2 раза, что свидетельствует об ухудшении экологической ситуации данного участка. Известно, что соотношение Sr/Ca является довольно постоянной величиной, но имеет тенденцию к понижению при переходе от почвы в растения [19]. По нашим данным, соотношение Sr/Ca (содержание Sr выражено в миллиграммах от сухой массы, Ca – в граммах) в почве контрольного участка составляет 13, в корневищах – 6, в листьях – 5 (рис. 2). Такая же тенденция отмечена на участках 1 и 3. В местах, подвергнутых техногенному стрессу, отмечены нарушения: при переходе от почвы к листьям величина соотношения возрастала, в отличие от контроля, от 1 до 5 на участке 6 и от 7 до 13 на участке 5. В остальных точках отбора наблюдали увеличение значения отношения Sr/Ca при переходе от почвы к корневищам, а затем снижение от корневищ к листьям. Установлена связь между величиной отношения таких элементов Fe/Mn, Ca/Fe, Zn/Cu, Sr/Ca в растениях *H. hybrida* и условиями произрастания. Выявленные сдвиги в соотношении отдельных элементов отражают степень техногенной нагрузки.

Заключение

В результате проведенного исследования с помощью многоэлементного анализа методом РФА СИ впервые получены достоверные данные по содержанию 20 элементов в почве, листьях и корневищах растений *H. hybrida* сорта *Speak to me*, выращенных в условиях промышленно-транспортного воздействия в Новосибирской области, различающихся по степени техногенной нагрузки. Показано, что уровень накопления макроэлементов (Ca и K) в надземных и подземных органах *H. hybrida* специфичен, концентрация Ca всегда выше в листьях растений, чем в корневищах, а концентрация K зависит от уровня загрязнения участка. В больших концентрациях K накапливался в листьях растений, выращенных в условиях с более благополучной экологической ситуацией по сравнению с корневищами, за исключением участка 7. Относительно суммарного содержания микроэлементов можно сказать, что оно выше в корневищах, чем в листьях *H. hybrida*. С наибольшим суммарным накоплением элементов в корневищах и листьях выделены растения, выращенные вблизи промышленных производств и вдоль автомобильных трасс, у которых их содержание в 3,5–6,2 раза выше, чем в контрольной группе растений. Показано, что Cu, Sc и Sr довольно равномерно распределены по органам растения, Вг и Мо в больших концентрациях отмечаются в листьях, а содержание Fe, Ti, Mn, Zn, Zr, V и Ni значительно выше в корневищах. Распределение таких микроэлементов, как Pb, Cr, Y и As, сильно зависит от уровня техногенного стресса. На участках с интенсивным транспортным движением основными элементами-загрязнителями, накапливающимися в листьях и корневищах растений в избыточной концентрации, являются Pb, Ni, Zn, Fe, Ti и Cr. В корневищах растений, выращенных в условиях промышленного загрязнения вблизи ЗЖБИ, в избыточных количествах обнаружены Fe, Mn, Nb, Sr, Ti, Ni и Co. Полученные данные показали, что растения *H. hybrida* сорта *Speak to me* служат биоиндикаторами промышленно-транспортного загрязнения, и метод РФА СИ перспективен и достоверен для проведения мониторинга экологической ситуации в урбанизированной среде.

Список литературы

1. Синхротронное излучение в геохимии: Сб. науч. тр. / Под ред. Г. Н. Аношина, Г. Н. Кулипанова. Новосибирск: Наука, 1989. № 752. 152 с.
2. **Trounova V. A., Zolotarev K. V., Baryshev V. B., Phedorin M. A.** Analytical possibilities of SRXRF station at VEPP-3 SR source. *Nucl. Instr. Meth. Phys.*, 1998, vol. A405, p. 532–536.
3. **Алексеев Ю. В.** Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, 1987. 142 с.

4. **Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.** Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
5. **Ильин В. Б.** Тяжелые металлы в системе почва-растение. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.
6. **Ильин В. Б., Сысо А. И.** Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 231 с.
7. **Сиромля Т. И., Худяев С. А., Сысо А. И.** Использование метода РФА-СИ в почвенно-экологических исследованиях на территории г. Новосибирска // Изв. РАН. Сер. физическая. 2015. Т. 79, № 1. С. 101–105.
8. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / Под ред. Н. Т. Зырина, С. Г. Малахова. М.: Гидрометеиздат, 1981. 108 с.
9. **Piminov P. A., Baranov G. N., Bogomyagkov A. V. et al.** Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4. *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, p. 19–26. DOI 10.1016/j.phpro.2016.11.005
10. **Trunova V. A., Sidorina A. V., Zolotarev K. V.** Using external standard method with absorption correction in SRXRF analysis of biological tissues. *X-ray Spectrometry*, 2015, vol. 44, no. 4, p. 226–229. DOI 10.1002/xrs.2008
11. **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 // Научный вестник НГТУ. 2013. № 2 (51). С. 112–118.
12. **Kulipanov G. N., Mezentsev N. A., Pindyurin V. F.** Synchrotron radiation in Novosibirsk: The first 13 years. *Journal of Structural Chemistry*, 2016, vol. 57, no. 7, p. 1277–1287. DOI 10.1134/S0022476616070015
13. **Арнаутов Н. А.** Стандартные образцы химического состава природных минеральных веществ: Метод. рекомендации. Новосибирск: Изд-во Ин-та геологии и геофизики СО РАН, 1990. 220 с.
14. **Чернов С. Ф.** Методы и приборы контроля окружающей среды и экологический мониторинг. М.: Изд-во МГУИЭ, 2006. 192 с.
15. **Сагт Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. и др.** Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
16. Устойчивость к тяжелым металлам дикорастущих видов / Под ред. Н. В. Алексеевой-Поповой. Л.: Бот. ин-т им. В. Л. Комарова АН СССР, 1991. 214 с.
17. **Carreras H. B., Pignata M. L.** Biomonitoring of heavy metals and air quality in Cordoba City, Argentina, using transplanted lichens. *Environmental Pollution*, 2002, vol. 117, p. 77–87.
18. **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, no. 2, p. 24.
19. **Blum J. D., Taliaferro E. H., Weisse M. T., Holmes R. T.** Changes in Sr/Ca, Ba/Ca and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios between trophic levels in two forest ecosystems in the northeastern U.S.A. *Biogeochemistry*, 2000, vol. 49, p. 87–101.

References

1. Synchrotron radiation in Geochemistry. Collection of scientific works. Eds. G. N. Anoshin, G. N. Kulipanov. Novosibirsk, Nauka, 1989, № 752, 152 с. (in Russ.)
2. **Trounova V. A., Zolotarev K. V., Baryshev V. B., Phedorin M. A.** Analytical possibilities of SRXRF station at VEPP-3 SR source. *Nucl. Instr. Meth. Phys.*, 1998, vol. A405, p. 532–536.

3. **Alexeev Yu. V.** Heavy metals in soils and plants. Leningrad, Agropromizdat, 1987, 142 p. (in Russ.)
4. **Kabata-Pendias A., Pendias H.** Trace Elements in soils and plants. Moscow, Mir Publishing house, 1989, 439 p. (in Russ.)
5. **Ilyin V. B.** Heavy metals in the soil-plant system. Novosibirsk, Nauka, 1991, 151 p. (in Russ.)
6. **Ilyin V. B., Syso A. I.** trace Elements and heavy metals in soils and plants of the Novosibirsk region. Novosibirsk, SB RAS, 2001, 231 p. (in Russ.)
7. **Siromlya T. I., Khudyaev S. A., Syso A. I.** The use of the RFA-SI method in soil and environmental studies in Novosibirsk. *Izvestiya RAS. Ser. Physical*, 2015, vol. 79, № 1, p. 101–105. (in Russ.)
8. Methodological recommendations for field and laboratory studies of soils and plants in the control of environmental pollution by metals. Ed. N. T. Zyrin, S. G. Malakhov. Moscow: publishing house Gidrometeoizdat, 1981, 108 p. (in Russ.)
9. **Piminov P. A., Baranov G. N., Bogomyagkov A. V. et al.** Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4. *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, p. 19–26. DOI 10.1016/j.phpro.2016.11.005
10. **Trunova V. A., Sidorina A. V., Zolotarev K. V.** Using external standard method with absorption correction in SRXRF analysis of biological tissues. *X-ray Spectrometry*, 2015, vol. 44, no. 4, p. 226–229. DOI 10.1002/xrs.2008
11. **Dariin A. V., Rakshun Ya. V.** Method of measurements in determining the elemental composition of rock samples by x-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation from the VEPP-3 accumulator. *Scientific Bulletin of NSTU*, 2013, № 2 (51), p. 112–118. (in Russ.)
12. **Kulipanov G. N., Mezentsev N. A., Pindyurin V. F.** Synchrotron radiation in Novosibirsk: The first 13 years. *Journal of Structural Chemistry*, 2016, vol. 57, no. 7, p. 1277–1287. DOI 10.1134/S0022476616070015
13. **Arnautov N. A.** Standard samples of chemical composition of natural mineral substances: Methodical recommendations. Novosibirsk: Institute of Geology and Geophysics, SB RAS USSR, 1990, 220 p. (in Russ.)
14. **Chernov S. F.** Methods and devices of environmental control and environmental monitoring. Moscow: mguie Publishing house, 2006, 192 p. (in Russ.)
15. **Saet Yu. E., Revich B. A., Yanin E. P.** and others. Geochemistry of the environment. Moscow, Nedra Publishing house, 335 p. (in Russ.)
16. Resistance to heavy metals of wild species. Ed. N. V. Alekseeva-Popova. Leningrad, Bot. in-t them. V. L. Komarova, USSR Academy of Sciences, 1991, 214 p. (in Russ.)
17. **Carreras H. B., Pignata M. L.** Biomonitoring of heavy metals and air quality in Cordoba City, Argentina, using transplanted lichens. *Environmental Pollution*, 2002, vol. 117, p. 77–87.
18. **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, no. 2, p. 24.
19. **Blum J. D., Taliaferro E. H., Weisse M. T., Holmes R. T.** Changes in Sr/Ca, Ba/Ca and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios between trophic levels in two forest ecosystems in the northeastern U.S.A. *Biogeochemistry*, 2000, vol. 49, p. 87–101.

Материал поступил в редколлегию

Received
02.09.2019

Сведения об авторах / Information about the Authors

Седельникова Людмила Леонидовна, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН (ул. Золотодолинская, 101, Новосибирск, 630090, Россия)

Lyudmila L. Sedelnikova, Central Siberian Botanical Gardens SB RAS (101 Zolotodolinskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

lusedelnikova@yandex.ru

Храмова Елена Петровна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН (ул. Золотодолинская, 101, Новосибирск, 630090, Россия)

Elena P. Khramova, Central Siberian Botanical Gardens SB RAS (101 Zolotodolinskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

khramova@ngs.ru

Чанкина Ольга Васильевна, научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия)

Olga V. Chankina, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS (3 Institutetskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

chankina@ns.kinetics.nsc.ru

Ракшун Яков Валерьевич, кандидат физико-математических наук, ученый секретарь, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Yakov V. Rakshun, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

Ya.V.Rakshun@inp.nsk.su

Сороколетов Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Dmitry S. Sorokoletov, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)