

УДК 574.24:615.322

НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЫШЬЯКА ЦВЕТКАМИ ЛИПЫ СЕРДЦЕВИДНОЙ, ПРОИЗРАСТАЮЩЕЙ В АГРО- И УРБОЭКОСИСТЕМАХ ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ

Н. А. Дьякова

Воронежский государственный университет, Россия

Целью исследования являлось изучение загрязнения тяжелыми металлами и мышьяком цветков липы сердцевидной, собранных в урбо- и агроэкосистемах Воронежской области, испытывающих на себе различное антропогенное воздействие. Методом атомно-абсорбционной спектрометрии на базе атомно-абсорбционного спектрометра МГА-915МД по фармакопейным методикам изучено накопление тяжелых металлов (свинца, ртути, кадмия, никеля, меди, цинка, кобальта, хрома) и мышьяка в 51 образце цветков липы сердцевидной. Все образцы соответствовали требованиям нормативной документации по содержанию нормируемых тяжелых металлов (свинца, кадмия, ртути) и мышьяка. Сравнивая данные по содержанию тяжелых металлов в верхних слоях почв региона с содержанием этих элементов в цветках липы сердцевидной, можно утверждать о наличии значительных физиологических барьеров, препятствующих накоплению экотоксикантов в генеративных органах растения, что особенно заметно для таких элементов, как свинец, ртуть, мышьяк, кадмий, кобальт и хром. Оказалось, что цветки липы сердцевидной способны избирательно концентрировать некоторые тяжелые металлы, входящие в активные центры ферментных систем (например, такие, как медь и цинк), в том случае, если их содержание в окружающей среде ниже некоторого жизненно важного уровня; при значительном же содержании данных элементов в почвах растение физиологически блокировало их поступление в цветки. На основании этого можно предполагать, что для липы сердцевидной в условиях антропогенной нагрузки происходит образование эдафотипа, формирующегося в результате действия отбора в условиях техногенного загрязнения внешней среды и развития адаптаций к этим условиям. Результаты исследований показали, что цветки липы сердцевидной незначительно накапливают токсические элементы из почв, и это важно учитывать при планировании мест заготовки лекарственного растительного сырья и оценке его качества.

Ключевые слова: Воронежская область; цветки липы сердцевидной; свинец; ртуть; кадмий; никель; медь; цинк; кобальт; хром; мышьяк.

N. A. Dyakova. ACCUMULATION OF HEAVY METALS AND ARSENIC IN FLOWERS OF THE SMALL-LEAVED LIME GROWING IN AGRICULTURAL AND URBAN ECOSYSTEMS OF THE VORONEZH REGION

The aim of this study was to investigate the heavy-metal and arsenic contamination of lime tree flowers collected from urban and agricultural ecosystems in the Voronezh Region exposed to various human impacts. The accumulation of heavy metals (lead, mercury, cadmium, nickel, copper, zinc, cobalt, chromium) and arsenic was studied in 51 samples

of small-leaved lime tree flowers using atomic absorption spectrometry with MGA-915MD spectrometer and following pharmacopoeial techniques. All the samples met the regulatory requirements for the content of standardized heavy metals (lead, cadmium, mercury) and arsenic. Comparing the data on content of the heavy metals in the region's topsoil with their content in lime tree flowers, it can be argued that there are significant physiological barriers to the accumulation of the ecotoxicants in the plants' reproductive organs, which is particularly noticeable for elements such as lead, mercury, arsenic, cadmium, cobalt and chromium. Lime tree flowers proved to be capable of selectively concentrating some heavy metals involved in the active cores of enzymatic systems (e. g. copper and zinc) if their environmental content was below a certain vital level, and barring their inflow to flowers through physiological mechanisms if the content of the elements in the soil was high. One can therefore suppose that when small-leaved lime trees are exposed to human pressure, a peculiar edaphic type is formed as a result of selection under man-made environmental pollution and the development of adaptations to these conditions. The results of the studies showed that the accumulation of toxic elements from soils in flowers of small-leaved lime trees is minor, which is an important consideration when planning the harvesting of medicinal plant material and assessing its quality.

Key words: Voronezh Region; small-leaved lime flowers; lead; mercury; cadmium; nickel; copper; zinc; cobalt; chromium; arsenic.

Введение

Урбанизация – одна из важнейших социально-экологических проблем современного мира. В процессе роста и становления городов природные экосистемы постепенно изменяются, при этом формируются новые антропогенные экосистемы со своими особенностями техногенного воздействия, характеризующимися изменением состава атмосферного воздуха, почв и водных объектов [Великанова и др., 2012, 2013].

Воронежская область традиционно является важным районом растениеводства, лесоводства и земледелия. Однако освоение минеральных ресурсов, активная химизация в сельском хозяйстве, последствия Чернобыльской аварии актуализировали вопрос снабжения разных видов промышленности безопасным и эффективным растительным сырьем. Некачественное растительное сырье и получаемые из него продукты являются источниками поступления различных экотоксикантов, особенно тяжелых металлов, в организм человека [Dyakova et al., 2015, 2018; Дьякова и др., 2018].

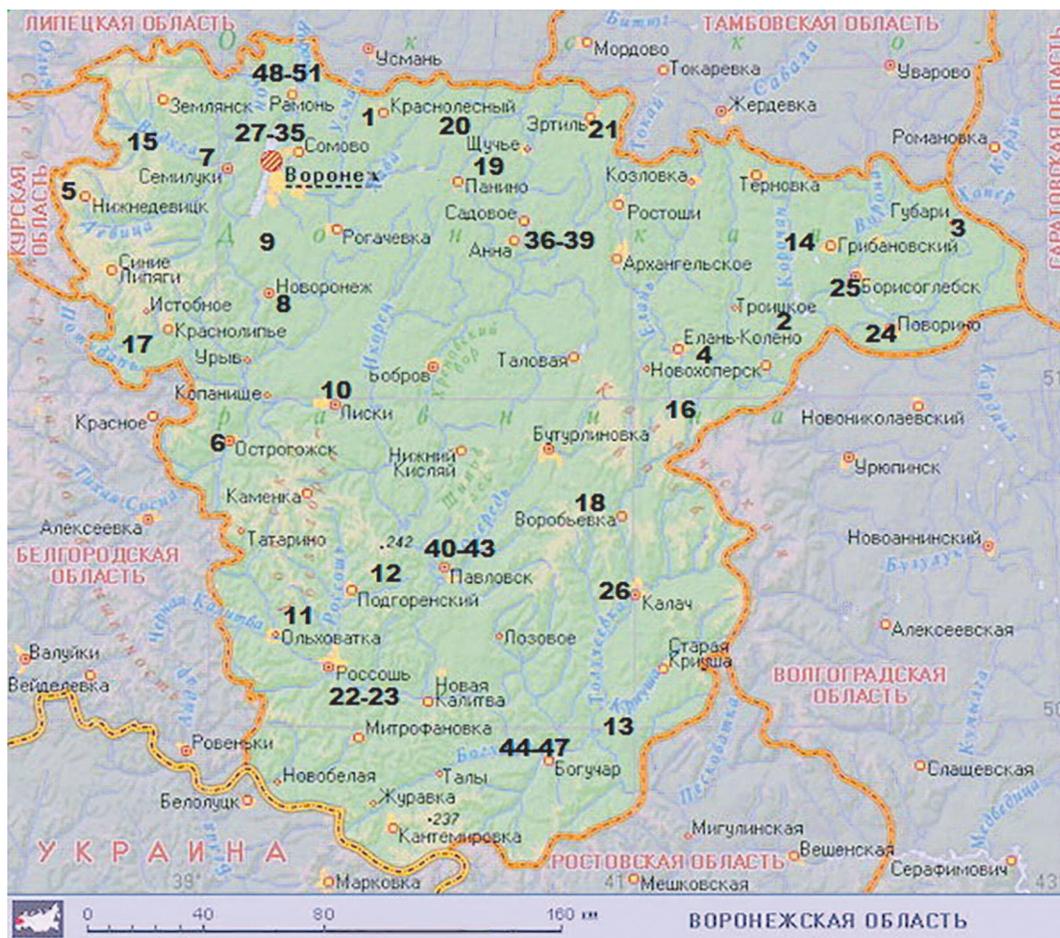
Цель исследования – изучение загрязнения тяжелыми металлами и мышьяком цветков липы сердцевидной, собранных в урбо- и агроэкосистемах Воронежской области, испытывающих на себе различное антропогенное воздействие.

Объекты и методика

Объектом исследования были выбраны цветки липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) –

древесного растения, произрастающего в Воронежской области повсеместно. Выбор территорий для сбора образцов обусловлен особенностями воздействия человека (рис.; табл.): промышленные химические предприятия (рис., 23, 24, 28); теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) (рис., 27); атомная электростанция (рис., 31); высоковольтные линии электропередачи (ВЛЭ) (рис., 9); городское водохранилище (рис., 29); малые города с развитой инфраструктурой: Борисоглебск (рис., 25), Калач (рис., 26); зона крупного месторождения сульфидных медно-никелевых руд (рис., 4); районы, находящиеся в зоне загрязнения в результате аварии на Чернобыльской АЭС (рис., 5–7); районы активной сельскохозяйственной деятельности (рис., 10–22); в качестве сравнения (фона) – заповедные территории: Воронежский природный биосферный заповедник (рис., 1), Хоперский государственный природный заповедник (рис., 2, 3). Также проводили отбор верхних слоев почв вдоль и на удалении от дорог разной степени загруженности и в разных природных зонах: лесная зона (Рамонский район) (рис., 32–35) – трасса М4 «Дон», лесостепная зона (Аннинский район (рис., 36–39)) – трасса А144 «Курск – Саратов», степная зона (Павловский район) (рис., 40–43) – трасса М4 «Дон», проселочная автомобильная дорога малой загруженности (Богучарский район) (рис., 44–47) и железнодорожные пути (Рамонский район) (рис., 48–51). Географические координаты точек отбора образцов приведены в таблице.

Анализ образцов цветков липы сердцевидной проводился с помощью атомно-абсорбционного спектрометра МГА-915МД по фармако-



Карта отбора образцов (цифровые обозначения расшифрованы в тексте)
Map of sample taking (the legend is given in the text)

пейным методикам [Государственная..., 2018, с. 2370–2382]. В образцах определяли концентрацию свинца, мышьяка, ртути, кадмия – эти наиболее токсичные элементы нормируются в растительном сырье и продуктах питания. Также в верхних слоях почв изучено содержание никеля, поскольку в настоящее время в Воронежской области рассматривается проект по добыче никеля открытым способом, что не может не повлиять на эколого-гигиеническую обстановку в регионе в силу доказанной для данного металла аллергенной и канцерогенной активности [Austenfeld, 1979; Дьякова и др., 2017]. Кроме того, в качестве изучаемых были выбраны такие токсичные металлы, как элемент 1 класса опасности цинк и элементы 2 класса опасности кобальт, хром и медь. Цинк имеет кумулятивный токсический эффект даже при незначительном его содержании; при отравлении им жалуются на раздражительность, бессонницу, желудочно-кишечное расстройство. Кобальт и его соединения вызывают одышку, токсически действуют на желудочно-кишеч-

ный тракт, а также на кожу, вызывая острые дерматиты. Соединения хрома оказывают на организм человека общее токсическое, аллергенное, канцерогенное действие, вызывают дерматиты и экземы при соприкосновении с кожей. Избыток меди приводит к цитотоксическим эффектам, чаще всего к циррозным поражениям печени, возникновению нервно-психических нарушений [Cataldo, Wildung, 1978; Buszewski et al., 2000; Schutzen-dubel, Polle, 2001].

Результаты и обсуждение

Содержание тяжелых металлов и мышьяка в образцах цветков липы сердцевидной, собранных на изучаемых территориях, представлено в таблице. Для наиболее токсичных элементов – ртути, кадмия, свинца и мышьяка – оно не превышает установленных норм и варьирует в диапазонах, значительно отличающихся от предельно допустимых концентраций (ПДК). Концентрация свинца в отобранных образцах

Содержание тяжелых металлов и мышьяка в образцах цветков липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.)
Heavy metal and arsenic content in small-leaved lime flowers (*Tilia cordata* Mill.)

№ п/п No.	Район сбора Collecting area	Географические координаты Geographical coordinates	Валовое содержание элемента, мг/кг Gross element content, mg/kg									
			Pb	Hg	Cd	As	Ni	Cr	Co	Cu	Zn	
1	Воронежский биосферный заповедник Voronezh biosphere reserve	51°48'24" N, 39°32'28" E	0,12	отс. п/д	отс. п/д	0,01	0,87	0,16	0,21	2,10	12,53	
2	Хоперский заповедник Khopyor reserve	51°18'02" N, 41°52'41" E	0,07	отс. п/д	отс. п/д	0,01	0,72	0,05	0,12	3,28	21,63	
3	Борисоглебский район Borisoglebsky district	51°30'46" N, 42°35'06" E	0,13	отс. п/д	отс. п/д	0,01	0,56	0,19	0,08	1,53	17,43	
4	с. Елань-Колено village of Elan-Koleno	51°09'40" N, 41°08'44" E	0,11	отс. п/д	отс. п/д	0,01	0,91	0,11	0,28	4,27	23,69	
5	с. Нижнедевицк village of Nizhnedevitsk	51°32'46" N, 38°23'06" E	0,09	0,002	0,02	0,02	1,12	0,26	0,30	0,86	28,52	
6	г. Острогожск city of Ostrogzhsk	50°51'30" N, 39°05'49" E	0,16	отс. п/д	отс. п/д	0,01	1,16	0,38	0,41	1,73	17,53	
7	г. Семилуки city of Semiluki	51°42'12" N, 39°00'23" E	0,10	0,002	отс. п/д	0,02	0,98	0,41	0,34	2,18	24,73	
8	г. Нововоронеж city of Novovoronezh	51°16'24" N, 39°12'39" E	0,13	отс. п/д	0,01	0,02	0,47	0,20	0,17	3,51	10,53	
9	ВЛЭ (Нововоронежский городской округ) High-voltage power transmission lines (Novovoronezhsky city district)	51°17'45" N, 39°14'36" E	0,16	0,002	0,03	0,01	0,83	0,06	0,06	5,53	32,64	
10	Лискинский р-н Liskinsky district	51°09'43" N, 39°26'55" E	0,09	0,002	отс. п/д	0,02	1,14	0,43	0,18	2,64	18,64	
11	Ольховатский р-н Olkhovatsky district	50°17'30" N, 39°17'23" E	0,14	отс. п/д	0,01	0,01	1,24	0,39	0,32	0,69	26,62	
12	Подгоренский р-н Podgorensky district	50°24'40" N, 39°40'12" E	0,14	отс. п/д	отс. п/д	0,02	0,79	0,28	0,20	1,58	17,27	
13	Петропавловский р-н Petropravlovsky district	50°04'52" N, 40°55'07" E	0,17	0,002	0,01	0,02	0,93	0,04	0,12	2,99	25,64	
14	Грибановский р-н Gribanovsky district	51°26'51" N, 41°59'33" E	0,11	отс. п/д	отс. п/д	0,01	1,07	0,23	0,07	1,64	16,53	
15	Хохольский р-н Khokholsky district	51°35'18" N, 38°47'34" E	0,13	0,002	отс. п/д	0,01	0,98	0,32	0,25	3,09	19,53	
16	Новохоперский р-н Novokhoproryorsky district	51°06'35" N, 41°36'50" E	0,17	отс. п/д	отс. п/д	0,01	0,79	0,08	0,32	1,72	13,62	
17	Репьевский р-н Repyevsky district	51°05'28" N, 38°38'51" E	0,14	отс. п/д	0,01	0,01	0,91	0,28	0,10	2,05	24,61	

Продолжение табл.
Table (continued)

№ п/п No.	Район сбора Collecting area	Географические координаты Geographical coordinates	Валовое содержание элемента, мг/кг Gross element content, mg/kg									
			Pb	Hg	Cd	As	Ni	Cr	Co	Cu	Zn	
18	Воробьевский р-н Vorobyevsky district	50°38'53" N, 40°57'53" E	0,15	0,002	0,01	0,02	1,19	0,19	0,21	1,10	23,00	
19	Панинский р-н Paninsky district	51°40'02" N, 40°06'57" E	0,12	отс. п/d	отс. п/d	0,01	0,68	0,32	0,25	3,52	21,74	
20	Верхнехавский р-н Verkhnekhavsky district	51°49'52" N, 39°55'00" E	0,18	отс. п/d	0,02	0,01	0,89	0,50	0,38	3,74	15,64	
21	г. Эртиль city of Ertil	51°49'43" N, 40°49'44" E	0,13	0,002	0,01	0,02	1,03	0,18	0,05	4,00	26,93	
22	Россошанский район Rossoshansky district	50°12'46" N, 39°34'57" E	0,12	отс. п/d	0,01	0,02	1,11	0,07	0,16	2,85	12,18	
23	Вблизи ОАО «Минудобрения» (г. Россошь) Near OJSC Minudobreniya (city of Rossoch)	50°08'53" N, 39°39'48" E	0,10	0,003	0,04	0,03	1,56	0,28	0,27	6,73	46,95	
24	Вблизи ООО «Бормаш» (г. Поворино) Near LLC Bormash (city of Povorino)	51°14'50" N, 42°28'35" E	0,22	0,003	0,05	0,03	1,21	0,39	0,42	4,26	47,91	
25	г. Борисоглебск city of Borisoglebsk	51°22'34" N, 42°04'27" E	0,12	0,002	0,02	0,02	0,93	0,58	0,67	5,84	52,48	
26	г. Калач city of Kalach	50°25'24" N, 41°01'10" E	0,15	0,002	отс. п/d	0,02	1,19	0,53	0,53	4,29	42,70	
27	Вблизи ТЭЦ «ВОГРЭС» (г. Воронеж) Near TPP VOGRES (city of Voronezh)	51°37'49" N, 39°13'36" E	0,16	отс. п/d	0,04	0,03	1,08	0,64	0,78	5,42	57,37	
28	Вблизи ООО «Сибур» (г. Воронеж) Near LLC Sibur (city of Voronezh)	51°37'24" N, 39°14'35" E	0,18	0,003	0,03	0,03	0,95	0,48	0,88	4,87	78,33	
29	Вдоль водохранилища (г. Воронеж) Along the reservoir (city of Voronezh)	51°44'47" N, 39°13'41" E	0,09	отс. п/d	отс. п/d	0,02	0,70	0,17	0,22	2,58	26,95	
30	Вблизи аэропорта Near the airport	51°48'35" N, 39°14'38" E	0,21	0,002	0,02	0,02	1,17	0,22	0,16	3,02	31,07	
31	Улица Ленинградская г. Воронежа Leningradskaya St., city of Voronezh	51°39'36" N, 39°15'02" E	0,18	0,002	отс. п/d	0,03	0,89	0,99	1,04	8,44	72,10	
32	Вдоль трассы М4 (Рамонский р-н) Along M4 route (Ramonsky district)	51°51'22" N, 39°12'56" E	0,24	0,003	0,05	0,02	1,13	1,08	1,21	9,89	81,36	
33	100 м от трассы М4 (Рамонский р-н) 100 m from M4 Route (Ramonsky District)	51°51'22" N, 39°12'56" E	0,13	0,002	0,05	0,03	0,95	0,60	0,74	4,50	65,74	
34	200 м от трассы М4 (Рамонский р-н) 200 m from M4 Route (Ramonsky District)	51°51'22" N, 39°12'56" E	0,09	0,002	0,03	0,02	0,84	0,23	0,21	3,75	32,70	
35	300 м от трассы М4 (Рамонский р-н) 300 m from M4 Route (Ramonsky District)	51°51'22" N, 39°12'56" E	0,09	0,002	0,01	0,01	0,81	0,21	0,23	3,90	28,58	

Окончание табл.

Table (continued)

№ п/п No.	Район сбора Collecting area	Географические координаты Geographical coordinates	Валовое содержание элемента, мг/кг Gross element content, mg/kg									
			Pb	Hg	Cd	As	Ni	Cr	Co	Cu	Zn	
36	Вдоль трассы А144 (Аннинский р-н) Along A144 Route (Anninsky district)	51°29'28" N, 40°27'50" E	0,23	0,002	0,04	0,01	1,28	0,96	1,10	8,73	71,95	
37	100 м от трассы А144 (Аннинский р-н) 100 m from A144 Route (Anninsky district)	51°29'28" N, 40°27'50" E	0,12	0,002	0,03	0,01	1,17	0,75	0,87	6,62	63,26	
38	200 м от трассы А144 (Аннинский р-н) 200 m from A144 Route (Anninsky district)	51°29'28" N, 40°27'50" E	0,08	0,002	0,03	0,02	0,98	0,68	0,55	4,44	48,55	
39	300 м от трассы А144 (Аннинский р-н) 300 m from A144 Route (Anninsky district)	51°29'28" N, 40°27'50" E	0,12	0,002	0,02	0,01	0,95	0,32	0,30	4,26	27,30	
40	Вдоль трассы М4 (Павловский р-н) Along M4 Route (Pavlovsky district)	50°25'18" N, 40°08'05" E	0,20	0,002	0,04	0,02	0,94	0,89	1,05	7,58	74,44	
41	100 м от трассы М4 (Павловский р-н) 100 m from M4 Route (Pavlovsky district)	50°25'18" N, 40°08'05" E	0,15	0,002	0,04	0,02	0,87	0,67	0,85	6,33	60,27	
42	200 м от трассы М4 (Павловский р-н) 200 m from M4 Route (Pavlovsky district)	50°25'18" N, 40°08'05" E	0,17	0,002	0,03	0,01	0,85	0,45	0,63	6,47	37,42	
43	300 м от трассы М4 (Павловский р-н) 300 m from M4 Route (Pavlovsky district)	50°25'18" N, 40°08'05" E	0,10	0,002	0,03	0,01	0,81	0,54	0,47	4,29	40,43	
44	Вдоль нескоростной дороги (Богучарский р-н) Along the non-speed road (Bogucharsky district)	49°53'54" N, 40°32'48" E	0,16	0,002	0,04	0,02	0,87	0,64	0,75	6,17	53,14	
45	100 м от нескоростной дороги (Богучарский р-н) 100 m from the non-speed road (Bogucharsky district)	49°53'54" N, 40°32'48" E	0,17	отс. n/d	0,03	0,01	0,76	0,25	0,32	2,63	27,75	
46	200 м от нескоростной дороги (Богучарский р-н) 200 m from the non-speed road (Bogucharsky district)	49°53'54" N, 40°32'48" E	0,12	отс. n/d	0,03	0,01	0,56	0,15	0,34	2,72	21,04	
47	300 м от нескоростной дороги (Богучарский р-н) 300 m from the non-speed road (Bogucharsky district)	49°53'54" N, 40°32'48" E	0,11	отс. n/d	0,01	0,01	0,56	0,23	0,23	2,53	22,72	
48	Вдоль железной дороги Along the railroad	51°48'18" N, 39°34'13" E	0,09	отс. n/d	0,01	0,01	0,54	0,32	0,20	1,82	20,05	
49	100 м от железной дороги 100 m from the railroad	51°48'18" N, 39°34'13" E	0,24	отс. n/d	0,05	0,02	1,02	1,18	1,32	8,37	75,85	
50	200 м от железной дороги 200 m from the railroad	51°48'18" N, 39°34'13" E	0,14	отс. n/d	0,04	0,02	0,85	0,58	0,75	5,74	54,77	
51	300 м от железной дороги 300 m from the railroad	51°48'18" N, 39°34'13" E	0,09	отс. n/d	0,01	0,01	0,76	0,32	0,42	3,55	32,00	
Среднее содержание элемента в сырье Average element content in raw material			0,14	0,001	0,01	0,02	0,95	0,39	0,42	3,99	35,62	
Предельно допустимая концентрация Maximum permissible concentration			6,0	0,1	1,0	0,5	-	-	-	-	-	

сухого сырья составила 0,07–0,24 мг/кг, что в несколько десятков раз меньше ПДК свинца в растительном сырье, а также значительно меньше содержания данного элемента в верхних слоях почв изучаемых территорий, которое варьирует от 1,71 до 34,57 мг/кг [Дьякова и др., 2016а]. Полученные данные свидетельствуют о наличии физиологического барьера в растении, препятствующего накоплению мутагенного металла в генеративных органах.

Накопление ртути в цветках липы сердцевидной, собранных в урбо- и агробиоценозах Воронежской области, также оценивается нами как незначительное: концентрация элемента в сырье не превышала 0,003 мг/кг, что более чем в 30 раз ниже допустимой нормы. Концентрация ртути в растительном сырье также в десятки раз меньше, чем в почвах изучаемых районов [Дьякова и др., 2016а]. Для ртути описаны фитотоксические свойства, в частности, влияние на мейоз, в связи с чем, по-видимому, у растения эволюционно выработались биохимические механизмы препятствия накоплению металла в тканях цветка [Зайцева и др., 2013].

Концентрация кадмия в сухом растительном сырье липы сердцевидной варьировала от значений ниже пределов обнаружения до 0,05 мг/кг, что в 20 раз меньше ПДК. При этом содержание кадмия в верхних слоях почв рассматриваемых территорий в некоторых образцах превышало установленные нормативы и достигало значений 0,71 мг/кг [Дьякова и др., 2016а]. Для кадмия описано блокирующее воздействие на работу ферментных и антиоксидантных систем, с чем, вероятно, и связано отсутствие данного элемента в тканях и органах цветка [Немерешина и др., 2012; Зайцева и др., 2013].

В десятки раз меньше ПДК в образцах цветков липы сердцевидной и содержание мышьяка, которое не превышало 0,03 мг/кг при его содержании в почвах изучаемых территорий в диапазоне от 0,55 до 3,81 мг/кг [Дьякова и др., 2016а]. Таким образом, отмечено отсутствие концентрирующей способности этого токсичного элемента у цветков липы сердцевидной.

Концентрация никеля в образцах варьировала от 0,54 мг/кг (в Богучарском районе) до 1,56 мг/кг (вблизи химического предприятия ОАО «Минудобрения»). Ранее установленное содержание никеля в верхних слоях почв этих территорий показало, что данный металл накапливается в цветках липы сердцевидной незначительно (концентрация никеля в почвах принимала значения от 2,23 до 98,25 мг/кг) [Дьякова и др., 2016б]. Вероятно, металл на-

капливается в минимальном физиологически важном количестве для стабилизации работы трансляционного аппарата, активации трансаминазы и аргиназы, но при значительном содержании никеля в окружающей среде его накопление физиологически блокируется, так как в избытке этот металл может активизировать конкурентное замещение в активных центрах некоторых ферментов-фосфатаз, угнетать процессы фотосинтеза и транспирации, вызывать редукцию цветка [Austefeld, 1979; Немерешина и др., 2012].

Среднее содержание хрома в образцах цветков липы сердцевидной составило 0,39 мг/кг, концентрация его варьировала от 0,04 мг/кг (в Подгоренском районе) до 1,18 мг/кг (вдоль железной дороги). Данный уровень накопления элемента также можно оценить как низкий, поскольку его ранее выявленная концентрация в почве районов сбора сырья находилась в диапазоне от 2,53 до 45,16 мг/кг. Известно, что малые дозы хрома стимулируют активность каталазы и протеаз, повышают содержание хлорофилла и продуктивность фотосинтеза [Зайцева и др., 2013]. При этом значительному накоплению хрома, очевидно, препятствует некоторый физиологический барьер, потому что данный элемент, как любой другой тяжелый металл, при высоком содержании способен конкурентно замещать другие металлы в активных центрах ферментов. Результаты анализов позволяют отметить более высокое содержание хрома вдоль транспортных магистралей и на улице г. Воронежа, в связи с чем можно предположить значительную роль аэрозольного пути загрязнения цветков липы сердцевидной соединениями хрома от выбросов автомобильного и железнодорожного транспорта.

Кобальт является важным микроэлементом, влияет на образование азотистых веществ и углеводов, участвует в их транспорте из вегетативных органов в генеративные, интенсифицирует дыхание и фотосинтез, способствуя синтезу хлорофилла. Концентрация кобальта в изучаемых образцах находилась в диапазоне от 0,05 до 1,32 мг/кг, среднее значение – 0,42 мг/кг. Его концентрация в почвах соответствующих территорий варьировала от 1,84 до 21,78 мг/кг, что позволило также отметить низкий уровень накопления кобальта данным видом сырья, вероятно, в силу наличия биохимических механизмов, препятствующих избыточному накоплению в генеративных органах тяжелых металлов, способных оказать влияние на процесс размножения. При этом значения содержания кобальта в образцах из заповедных зон и с территориями со значительной ан-

тропогенной нагрузкой отличались мало, несколько повышенное содержание данного металла отмечено в образцах, собранных вдоль автомобильных и железной дорог, где весомую роль в загрязнении сырья играли выбросы транспорта.

Медь также является важным микроэлементом для растения, она входит в состав оксидаз, пластоцианинов, церулоплазмينا и регулирует большинство окислительно-восстановительных процессов [Schutzendubel, Polle, 2001; Немерешина и др., 2012]. Концентрация меди в образцах цветков липы сердцевидной находилась в диапазоне от 0,69 до 9,89 мг/кг, а среднее значение ее концентрации составило 3,99 мг/кг. В почвах изучаемых территорий концентрация меди варьировала от 3,30 до 65,38 мг/кг. Таким образом, медь тоже накапливается в цветках липы сердцевидной на определенном невысоком, необходимом для обеспечения жизненно важных процессов уровне, после чего ее поступление в ткани цветка блокируется растением. Однако загрязнение лекарственного растительного сырья в данном случае также возможно аэрозольным путем, поскольку для образцов, собранных вдоль крупных транспортных магистралей (вдоль железной дороги, автомобильных трасс М4 и А144), отмечено намного более высокое содержание данного металла, чем для других образцов, собранных в зонах активной хозяйственной деятельности человека со значительным содержанием меди в почве.

Концентрация цинка в отобранных образцах липы сердцевидной варьировала от 12,18 до 81,36 мг/кг, а среднее его содержание составило 35,62 мг/кг. В почвах изучаемых территорий она отмечена на уровне от 9,58 до 154,45 мг/кг. Таким образом, видно, что цинк в данном лекарственном растительном сырье до определенного уровня накапливается из почв достаточно активно, в некоторых образцах даже в концентрации, превышающей содержание элемента в почве. Это связано с важным физиологическим значением цинка как активатора до 30 ферментных систем в растительной клетке, он входит в состав активных центров ферментов ангидраз, дегидрогеназ, протеиназ и пептидаз [Schutzendubel, Polle, 2001; Немерешина и др., 2012].

Заключение

Проанализировано свыше 50 образцов цветков липы сердцевидной, собранных в различных по уровню антропогенного воздействия районах Воронежской области, на пред-

мет содержания тяжелых металлов и мышьяка. Во всех исследуемых образцах их концентрация оказалась соответствующей требованиям нормативной документации. Сравнивая данные по содержанию тяжелых металлов и мышьяка в верхних слоях почв региона с содержанием этих элементов в цветках липы сердцевидной, можно утверждать о наличии значительных физиологических барьеров, препятствующих накоплению экотоксикантов в генеративных органах *Tilia cordata* Mill., что особенно заметно для таких элементов, как свинец, ртуть, мышьяк, кадмий, кобальт и хром. Оказалось, что цветки липы сердцевидной способны избирательно концентрировать некоторые тяжелые металлы (например, медь и цинк), входящие в активные центры ферментных систем, в том случае, если их содержание в окружающей среде ниже некоторого жизненно важного уровня; при значительном же содержании данных элементов в почвах растение также физиологически блокировало их поступление в цветки. На основании этого можно предполагать, что у липы сердцевидной в условиях антропогенной нагрузки происходит возникновение эдафотипа, формирующегося в результате действия отбора в условиях техногенного загрязнения внешней среды и проявления адаптации к этим условиям. Результаты исследований показали, что цветки липы сердцевидной незначительно накапливают токсические элементы из почв, и это важно учитывать при планировании мест заготовки лекарственного растительного сырья и оценке его качества [Дьякова и др., 2017; Дьякова, 2020].

Литература

Великанова Н. А., Гапонов С. П., Сливкин А. И. Анализ экологического состояния почв и оценка поглощения тяжелых металлов лекарственными растениями (горцем птичьим и подорожником большим) в городе Воронеже и его окрестностях // Экология урбанизированных территорий. 2012. № 4. С. 102–106.

Великанова Н. А., Гапонов С. П., Сливкин А. И. Экооценка лекарственного растительного сырья в урбоусловиях г. Воронежа. LAP, 2013. 213 с.

Государственная фармакопея Российской Федерации. Изд. XIV. Т. 2. М.: ФЭМБ, 2018. С. 2370–2382.

Дьякова Н. А., Мындра А. А., Кукуева Л. Л., Великанова Л. А. Особенности загрязнения почв Центрального Черноземья тяжелыми металлами // Инновационные разработки молодых ученых – развитию агропромышленного комплекса: Мат. V Междунар. конф. Ставрополь: ВНИИОК, 2016а. С. 403–407.

Дьякова Н. А., Самылина И. А., Сливкин А. И., Гапонов С. П., Кукуева Л. Л., Мындра А. А., Шушуно-

ва Т. Г. Оценка экологического состояния образцов верхних слоев почв и корней одуванчика лекарственного, отобранных на территории Воронежской области // Вестник ВГУ. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2016б. № 2. С. 119–126.

Дьякова Н. А., Сливкин А. И., Гапонов С. П. Сравнение особенностей накопления основных токсических элементов цветками липы сердцевидной и пижмы обыкновенной // Вестник ВГУ. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2017. № 1. С. 148–154.

Дьякова Н. А., Сливкин А. И., Гапонов С. П. Оценка эффективности и безопасности лекарственного растительного сырья подорожника большого, собранного в Центральном Черноземье // Вестник ВГУ. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2018. № 1. С. 124–131.

Дьякова Н. А. Экологическая оценка лекарственного растительного сырья Воронежской области на примере цветков пижмы обыкновенной // Вестник НВГУ. 2020. № 1. С. 19–26. doi: 10.36906/2311-4444/20-1/04

Зайцева М. В., Кравченко А. Л., Стекольников Ю. А., Сотников В. А. Тяжелые металлы в системе почва-растение в условиях загрязнения // Ученые записки ОГУ. Сер. Естественные, технические и медицинские науки. 2013. № 3. С. 190–192.

Немерешина О. Н., Гусев Н. Ф., Петрова Г. В., Шайхутдинова А. А. Некоторые аспекты адаптации *Polygonum aviculare* L. к загрязнению почвы тяжелыми металлами // Известия ОГАУ. 2012. № 1(33). С. 230–234.

References

D'yakova N. A., Myndra A. A., Kukueva L. L., Velikanova L. A. Osobennosti zagryazneniya pochv Tsentral'nogo Chernozem'ya tyazhelymi metallami [Features of soil pollution of the Central Black Earth region with heavy metals]. *Innovatsionnye razrabotki molodykh uchennykh – razvitiyu agropromyshlennogo kompleksa: Mat. V Mezhdunar. konf.* [Inventions of young scientists – for the development of the agroindustrial complex: Proceed. V int. conf.]. Stavropol': VNIIOK, 2016a. P. 403–407.

D'yakova N. A., Samylina I. A., Slivkin A. I., Gaponov S. P., Kukueva L. L., Myndra A. A., Shushunova T. G. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya obraztsov verkhnikh sloev pochv i kornei oduvanchika lekarstvennogo, otobrannykh na territorii Voronezhskoi oblasti [Assessment of the ecological condition of samples of the top layers of soils and roots of the dandelion medicinal, selected in the territory of the Voronezh Region]. *Vestnik VGU. Ser. Khimiya. Biol. Farmatsiya* [Proceed. Voronezh St. Univ. Ser.: Chem. Biol. Pharmacy]. 2016б. No. 2. P. 119–126.

D'yakova N. A., Slivkin A. I., Gaponov S. P. Sravnenie osobennostei nakopleniya osnovnykh toksicheskikh elementov tsvetkami lipy serdtsevidnoi i pizhmy obyknovnoi [Comparison of features of accumulation of the basic toxic elements flowers of *Tilia cordata* and *Tanacetum vulgare*]. *Vestnik VGU. Ser. Khimiya. Biol. Farmatsiya* [Proceed. Voronezh St. Univ. Ser.: Chem. Biol. Pharmacy]. 2017. No. 1. P. 148–154.

Austenfeld F. A. Zur Phytotoxizität von Nickel und Kobaltsalzen in Hydrokultur bei *Phaseolus vulgaris* L. // *Z. Pflanzenenernähr. und Bodenkunde*. 1979. Bd. 142, h. 6. 769–777.

Buszewski B., Jastrzebska A., Kowalkowski T. Monitoring of selected heavy metals uptake by plants and soils in the area of Torun // *Poland Polish J. of Environ. Studies*. 2000. Vol. 9, no. 6. S. 511–515.

Cataldo D. A., Wildung R. E. Soil and plant factors influencing the accumulation of heavy metals by plants // *Environ. Health Perspect.* 1978. December; 27. P. 149–159.

Dyakova N. A., Slivkin A. I., Gaponov S. P., Myndra A. A., Samylina I. A. Analysis of the relationship between the accumulation of pollutants and principal groups of biologically active substances in medicinal plant raw materials using knotweed (*Polygonum aviculare* L.) and broadleaf plantain (*Plantago major* L.) leaves as examples // *Pharm. Chem. J.* 2015. Vol. 49, no. 6. 384–387. doi: 10.1007/s11094-015-1289-6

Dyakova N. A., Slivkin A. I., Gaponov S. P., Myndra A. A., Samylina I. A. Estimated heavy-metal and arsenic contents in medicinal plant raw materials of the Voronezh region // *Pharm. Chem. J.* 2018. Vol. 52, no. 3. P. 220–223. doi: 10.1007/s11094-018-1797-2

Schutzendubel A., Polle A. Plant responses to abiotic stresses: heavy metal and induced oxidative stress and protection by mycorrhization // *J. Exp. Bot.* 2001. Vol. 53, iss. 372. December 2. P. 1351–1365.

Поступила в редакцию 22.10.2019

D'yakova N. A., Slivkin A. I., Gaponov S. P. Otsenka effektivnosti i bezopasnosti lekarstvennogo rastitel'nogo syr'ya podorozhnika bol'shogo, sobrannogo v Tsentral'nom Chernozem'e [Assessment of efficiency and safety of medicinal vegetable raw materials of the *Plantago major*, collected in the Central Black Earth]. *Vestnik VGU. Ser. Khimiya. Biol. Farmatsiya* [Proceed. Voronezh St. Univ. Ser.: Chem. Biol. Pharmacy]. 2018. No. 1. P. 124–131.

D'yakova N. A. Ekologicheskaya otsenka lekarstvennogo rastitel'nogo syr'ya Voronezhskoi oblasti na primere tsvetkov pizhmy obyknovnoi [Environmental assessment of medicinal vegetable raw materials of the Voronezh Region on the example of the costmary]. *Vestnik Nizhnevartovskogo gos. univ.* [Bull. Nizhnevartovsk St. Univ.]. 2020. No. 1. P. 19–26.

Gosudarstvennaya farmakopeya Rossiiskoi Federatsii [State pharmacopeia of the Russian Federation]. Edit. XIV. Vol. 2. Moscow: FEMB, 2018. P. 2370–2382.

Nemereshina O. N., Gusev N. F., Petrova G. V., Shaikhutdinova A. A. Nekotorye aspekty adaptatsii *Polygonum aviculare* L. k zagryazneniyu pochvy tyazhelymi metallami [Some aspects of adaptation of *Polygonum aviculare* L. to soil pollution with heavy metals]. *Izvestiya OGAU* [Proceed. Orenburg St. Agr. Univ.]. 2012. No. 1(33). P. 230–234.

Velikanova N. A., Gaponov S. P., Slivkin A. I. Analiz ekologicheskogo sostoyaniya pochv i otsenka pogloshcheniya tyazhelykh metallov lekarstvennymi ras-

teniyami (gortsem ptich'im i podorozhnikom bol'shim) v gorode Voronezhe i ego okrestnostyakh [Analysis of the ecological state of soils and assessment of the absorption of heavy metals by medicinal plants (common knotgrass and broadleaf plantain) in the city of Voronezh and its vicinities]. *Ekol. urbanizirovannykh terr.* [Ecol. of urban areas]. 2012. No. 4. P. 102–106.

Velikanova N. A., Gaponov S. P., Slivkin A. I. Eko-otsenka lekarstvennogo rastitel'nogo syr'ya v urbousloviyakh g. Voronezha [Ecological assessment of medicinal vegetable raw materials in the urban conditions of the city of Voronezh]. LAP, 2013. 211 p.

Zaitseva M. V., Kravchenko A. L., Stekol'nikov Y. A., Sotnikov V. A. Tyazhelye metally v sisteme pochva-rastenie v usloviyakh zagryazneniya [Heavy metals in the soil-plant system under pollution]. *Uchenye zapiski OGU. Ser. Estestv., tekhn. i med. nauki* [Proceed. Orel St. Univ. Ser. Nat. Sci., Tech. Med.]. 2013. No. 3. P. 190–192.

Austenfeld F. A. Zur Phytotoxizität von Nickel und Kobaltsalzen in Hydrokultur bei *Phaseolus vulgaris* L. *Z. Pflanzenernähr. und Bodenkunde*. 1979. Vol. 142, pt. 6. P. 769–777. (In German).

Buszewski B., Jastrzebska A., Kowalkowski T. Monitoring of selected heavy metals uptake by plants

and soils in the area of Torun. *Poland Polish J. of Environ. Studies*. 2000. Vol. 9, no. 6. 511–515.

Cataldo D. A., Wildung R. E. Soil and plant factors influencing the accumulation of heavy metals by plants. *Environ. Health Perspect.* 1978. December; 27. P. 149–159.

Dyakova N. A., Slivkin A. I., Gaponov S. P., Myndra A. A., Samylina I. A. Analysis of the relationship between the accumulation of pollutants and principal groups of biologically active substances in medicinal plant raw materials using knotweed (*Polygonum aviculare* L.) and broadleaf plantain (*Plantago major* L.) leaves as examples. *Pharm. Chem. J.* 2015. Vol. 49(6). P. 384–387. doi: 10.1007/s11094-015-1289-6

Dyakova N. A., Slivkin A. I., Gaponov S. P., Myndra A. A., Samylina I. A. Estimated heavy-metal and arsenic contents in medicinal plant raw materials of the Voronezh region. *Pharm. Chem. J.* 2018. Vol. 52(3). P. 220–223. doi: 10.1007/s11094-018-1797-2

Schutzendubel A., Polle A. Plant responses to abiotic stresses: heavy metal and induced oxidative stress and protection by mycorrhization. *J. Exp. Bot.* 2001. Vol. 53, iss. 372. December 2. P. 1351–1365.

Received October 22, 2019

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Дьякова Нина Алексеевна

доцент кафедры фармацевтической химии
и фармацевтической технологии фармацевтического
факультета, к. б. н.
Воронежский государственный университет
Университетская площадь, 1, Воронеж, Россия, 394018
эл. почта: Ninochka_V89@mail.ru

CONTRIBUTOR:

Dyakova, Nina

Voronezh State University
1 Universitetskaya Sq., 394018 Voronezh, Russia
e-mail: Ninochka_V89@mail.ru