

**Ю. В. Королева, Н. Г. Петрова  
В. А. Мандрик, А. С. Ананян**

**АККУМУЛЯЦИЯ СЛЕДОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ЛИСТЬЯХ РАСТЕНИЙ  
QUERCUS ROBUR L. И QUERCUS RUBRA L.  
В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ**

70

Поступила в редакцию 15.08.2021 г.

Рецензия от 16.10.2021 г.

*В статье приводятся результаты изучения особенностей накопления Fe, Mn, Zn, Ni, Sr и Rb древесными растениями (Quercus robur L. и Quercus rubra L.), которые применяются в озеленении города. Проанализированы изменения в содержании следовых элементов в листьях в течение вегетационного периода, определен фоновый уровень и составлен элементарный ряд этих элементов для растений уличных посадок и растений, произрастающих на территории ботанического сада БФУ им. И. Канта. Полученные результаты могут быть использованы для комплексной оценки загрязнения городской среды.*

*The article discusses the features of Fe, Mn, Ni, Zn, Sr, Rb accumulation by woody plants (Quercus robur L. and Quercus rubra L.). The authors have analyzed the changes of the content of trace elements in leaves during the growing season, determined the background level, and compiled the elementary series of the trace elements for outdoor plants and plants growing on the territory of the Botanical Garden of the IKBFU. The data can be used for a comprehensive assessment of urban pollution.*

**Ключевые слова:** следовые элементы, фитоиндикация, урбоэкосреда, аккумуляция металлов, зеленые насаждения

**Keywords:** trace elements, phytoindication, urban environment, metals accumulation, green planting

### **Введение**

Современный город выделяется из естественной окружающей его среды изменением основных экологических факторов: ослабляется солнечная радиация, изменяется тепловой и световой режим, появляется загрязнение как атмосферного воздуха, так и почвы. Загрязнители городской среды имеют разное происхождение и разную химическую природу. Особое место среди них принадлежит следовым элементам (в том числе тяжелым металлам). Несмотря на то что многие элементы не



являются необходимыми для растений, они могут ими активно поглощаться и накапливаться, сохраняя свои токсические свойства достаточно длительное время [1–8].

В настоящее время большой практический интерес вызывает изучение реакций растений на действие тяжелых металлов. Особенно активно изучаются поглощение, транспорт и аккумуляция металлов в тканях и органах растений, их влияние на основные физиологические процессы – рост, обмен и минеральное питание, а также механизм металлоустойчивости растений [9–11]. Деградаци зеленых насаждений – одна из самых важных экологических проблем урбозкосреды [12; 13].

Следовые элементы могут поступать в растения как пассивным (через листовую пластинку), так и активным путем (через корневую систему). Аэрозоли металлов, находящиеся в воздухе, оседают на листовых пластинках и проникают в растения. Последнее зависит от многих причин: от видовой принадлежности, возраста, жизненного состояния (различные повреждения листовой пластинки) растений, а также от погодных условий и физико-химических характеристик пылевых частиц. Накопление химических элементов в листовых пластинах может быть одним из показателей при оценке загрязненности воздушной среды [2; 6–8; 11; 14–16].

Цель данного исследования – изучение особенностей накопления железа, марганца, никеля, цинка, рубидия и стронция листьями *Quercus robur* L. и *Quercus rubra* L., произрастающих в городских районах с различной транспортной нагрузкой. Эти особенности могут быть использованы в качестве показателей оценки загрязнения окружающей среды.

### Объект и методы исследования

Исследование металлоаккумулирующей способности древесных насаждений проводили в Калининградской области на территории областного центра.

В городе насчитывается 932 улицы. Протяженность автомобильных дорог составляет более 450 км. Именно автотранспорт сильнее всего влияет на суммарный выброс загрязняющих веществ в атмосферный воздух [17].

В центральной части города были заложены три пробные площадки (рис). Две – с высокой транспортной нагрузкой (1 – зеленый массив вблизи площади Маршала Василевского на пересечении двух магистральных улиц – ул. Черняховского и ул. А. Невского; 2 – зеленая зона на ул. Рокоссовского вблизи Центрального рынка). Эти участки, согласно карте комплексной оценки окружающей среды города Калининграда, с учетом таких показателей, как загрязнение почвы, атмосферы, поверхностных вод; уровня электромагнитных полей; особенностей ландшафта; состояние растительности и др., относятся к грязным. Третья – дендрарий ботанического сада БФУ им. И. Канта (ул. Лесная). Это район с малоэтажной застройкой и небольшой транспортной нагрузкой.

Объектами исследования стали два вида растений *Quercus robur* L. – автохтонный вид и *Quercus rubra* L. – североамериканский интродуцент.

Оба вида широко используются в озеленении г. Калининграда.

На пробных площадках в период с середины июня по август (экспозиция 15, 33, 60 и 74 суток) отбирали по 5 одновозрастных деревьев каждого вида (по 20 листьев с дерева). Листья собирали с нижней части кроны с доступных на уровне поднятой руки веток (первого и второго года) случайным образом. Использовали для этого ветки разных направлений – условно с севера, юга, запада и востока.

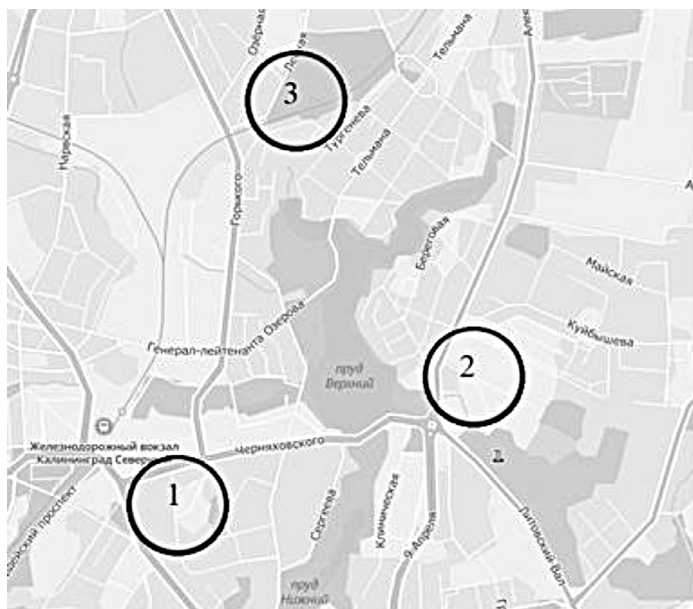


Рис. Схема расположения *Quercus robur* L. и *Quercus rubra* L.

1 – ул. Рокоссовского; 2 – ул. Александра Невского;

3 – ул. Лесная (территория ботанического сада БФУ им. И. Канта)

Образцы растительных материалов высушивали при температуре 40°C в сушильном шкафу до постоянной массы, измельчали до состояния порошка и формировали с помощью пресса таблетки-излучатели на подложке из борной кислоты. Содержание микроэлементов в сухом веществе растений определяли методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрометре Спектроскан МАКС-G (НПО «Спектрон», Санкт-Петербург) по методике ФР.1.31.2014.17343. Условия измерения интенсивности флуоресценции: анод – Ag, кристалл-анализатор – LiF(200), напряжение – 40 кВ, сила тока 0,1 А, экспозиция – 100 с (для железа 50 с).

Результаты анализа контролировали с использованием стандартных образцов с известным составом, разработанных в Институте геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН: травосмеси, SSS 8922-2007, элодеи канадской, SSS 8921-2007; листа березы, SSS 8923-2007.

Все данные, полученные в результате проведенных исследований, были обработаны статистически и представлены в графиках и таблицах в виде средних арифметических значений и их стандартных ошибок. Статистическая значимость различий между вариантами определена



с помощью t-критерия Стьюдента ( $p \leq 0,05$ ). Корреляционный анализ проводили с помощью критерия Пирсона. Для статистической обработки результатов анализа использовали программные продукты *Microsoft Excel* и *SPSS Statistics 23*.

## Результаты

Для общего представления результатов физико-химического анализа массив данных обработали, вычислив основные элементы описательной статистики: минимальное, максимальное, медианное значение в выборке, величину стандартного отклонения и коэффициент вариации (табл. 1). Содержание марганца, никеля, цинка, бария, рубидия и железа определено в мг/кг сухого вещества.

73

Таблица 1

### Результаты рентгенофлуоресцентного анализа растительных проб с элементами описательной статистики

N=40	Mn	Ni	Zn	Sr	Rb	Fe
Мин	27,9	0,025	26,2	0,265	3,06	99,1
Макс	342	2,26	140	37,9	26,1	361
Среднее	145	1,09	40,9	19,0	9,60	196
Медиана	96,1	1,13	35,5	21,2	7,45	177
Стандартное Отклонение,	106	0,602	17,7	7,99	4,98	77,2
Коэффициент Вариации, %	73,4	55,4	43,4	41,9	51,9	39,4
Асимметрия	0,573	0,035	3,37	0,053	1,34	0,574
Экссесс	-1,1	-0,72	13	0,03	1,9	-0,24
Фон	137	1,05	36,1	18,6	9,07	185

Фоновое значение содержания элементов вычисляли как среднее по выборке за исключением минимально-аномальных значений (среднее +  $2\sigma$ ) [18]. Медианное и среднее значение в выборках отличались в разной степени. Среднее содержание для таких элементов, как никель, железо, цинк, рубидий и марганец, выше медианного соответственно на 3, 11, 15, 29, 51 %; вероятно, накопление этих компонентов происходит естественным образом и может считаться фоновым.

Расчитанный коэффициент вариации показывает относительное рассеивание концентрации металлов в выборках по сравнению со средним значением. Вариабельность содержания цинка, стронция и железа в листьях, оцениваемая коэффициентами вариации, по градации [19] относится к группе с нормальным уровнем изменчивости, содержание никеля — к группе со значительным, концентрация марганца — к группе с большим уровнем изменчивости.

Насколько распределение содержания микроэлементов близко к нормальному, показывают значения асимметрии и эксцесса. Они должны быть равны нулю. Таким образом, близким к нормальному установлено распределение содержания в листьях только двух элементов — никеля и стронция.



Для выявления линейной зависимости между накоплением элементов в растениях вычислили коэффициент корреляции Пирсона (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции Пирсона (\*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ )

	Mn	Ni	Zn	Sr	Rb
Ni	<b>0,663**</b>	—	—	—	—
Zn	0,405**	0,326*	—	—	—
Sr	<b>0,477**</b>	<b>0,520**</b>	<b>0,453**</b>	—	—
Rb	<b>0,466**</b>	<b>0,446**</b>	<b>0,355*</b>	0,233	—
Fe	0-,007	<b>0,345*</b>	<b>0,411**</b>	<b>0,621**</b>	0,052

Примечание: полужирным шрифтом выделены значимые величины.

В основном связь между накоплением различных микроэлементов положительная, слабая (0,3–0,4), но значимая, и только для трех комбинаций Ni – Mn, Ni – Sr и Sr – Fe установлена высокая корреляция (0,5–0,75). Возможно, вариации содержания этих элементов обусловлены одинаковыми причинами или их происхождение связано с единым источником.

На основании полученных данных был проведен их сравнительный анализ по накоплению металлов в листьях изучаемых видов древесных растений — как в уличных посадках в зонах с высокой транспортной нагрузкой, так и в дендрарии ботанического сада БФУ им. И. Канта.

Марганец — один из необходимых элементов в растениях, стимулирующий углеводный обмен, усиливающий интенсивность дыхания и окисления углеводов. Содержание марганца в растениях в недостаточном количестве приводит к нарушению баланса основных элементов минерального питания, на листьях возникают характерные для марганцевого голодания точечные хлорозы, замедляется переход к цветению, снижается морозостойкость. Избыток же марганца оказывает токсическое действие на растительный организм (железистый хлороз — некротические темные пятна на листьях). Обычно железистый хлороз проявляется при определенном соотношении Fe и Mn (считается, что соотношение от 1,5 до 2,5 является необходимым условием для нормального развития растений) [16; 20; 21].

Наиболее интенсивное накопление Mn идет на листовых пластинках растений *Quercus*, произрастающих на территории ботанического сада. У *Q. robur* L. в начале эксперимента от 193,6 мг/кг (сухого вещества) до 257,0 мг/кг через 74 сут.; у *Q. rubra* L. — от 126,02 до 290,80 мг/кг. Через 60 суток от начала эксперимента показатель концентрации Mn у *Q. rubra* L. превысил критический порог (300,0 мг/кг) [20]. Наименьшая концентрация марганца отмечена в уличных посадках (*Q. rubra* L. — от 51,93 до 84,32 мг/кг; *Q. rubra* L. — от 28,3 до 47,9 мг/кг) (табл. 3).

В растениях Fe выполняет целый ряд важных функций: участвует в восстановлении нитратов и фиксации азота клубеньковыми бактериями, в функционировании окислительно-восстановительных систем фо-



тосинтеза и дыхания; способствует улучшению роста растений на почвах, бедных фосфором, и др. При дефиците железа наблюдаются морфологические изменения пластид; снижается содержание хлорофилла, что обуславливает хлороз листьев; замедляется интенсивность фотосинтеза и дыхания; сокращается стадия плодоношения; уменьшается продуктивность растений.

Таблица 3

**Содержание тяжелых металлов в листьях  
*Q. robur* L. и *Q. rubra* L., мг/кг сухого вещества**

Металл	Экспозиция, сутки	<i>Quercus robur</i>		<i>Quercus rubra</i>	
		Ботанический сад	Улица	Ботанический сад	Улица
Mn	0	193,6±3,0	51,93±19,2	126,02±35,9	28,3±10,1
	15	237,4±60,1	59,9±16,6	210,9±61,16	35,9±14,9
	33	185,5±50,8	68,4±16,2	276,2±79,7	41,8±13,6
	60	234,9±69,9	71,6±30,6	308,26±81,9	39,14±14,8
	74	257,0±68,8	84,32±36,4	290,80±80,5	47,9±16,3
Fe	0	120,29±8,4	144,9±10,1	116,08±19,22	146,6±19,8
	15	169,4±31,6	280,4±20,7	152,9±27,2	168,9±28,4
	33	139,5±26,5	255,9±39,9	175,26±37,3	205,01±40,1
	60	214,13±43,0	289,73±47,0	152,7±41,7	191,8±42,2
	74	244,4±38,0	299,14±51,0	152,9±24,5	259,6±42,8
Zn	0	40,19±3,94	31,60±3,39	28,3±2,37	33,83±2,95
	15	39,28±5,76	28,5±2,75	34,1±2,28	38,37±2,65
	33	42,67±6,99	28,47±3,98	43,9±3,76	41,01±4,8
	60	38,29±3,56	29,18±2,74	39,19±4,46	36,15±3,88
	74	38,59±3,03	35,2±2,91	39,22±3,61	40,65±3,75
Sr	0	11,02±0,8	10,7±0,85	10,7±3,41	4,57±1,47
	15	22,3±4,79	14,56±2,75	19,6±2,75	14,99±1,6
	33	17,5±2,86	22,01±3,42	22,85±1,41	20,15±1,01
	60	25,5±2,3	22,48±1,83	22,9±2,1	20,72±2,01
	74	32,5±2,78	29,24±2,51	19,38±2,67	19,75±2,5
Rb	0	18,81±4,21	10,11±1,87	17,72±4,62	5,7±1,1
	15	11,7±2,4	7,68±1,8	9,8±2,06	5,05±1,1
	33	8,51±1,57	6,63±1,27	11,6±2,1	5,2±0,6
	60	11,8±3,38	4,89±2,37	10,3±1,5	6,2±1,05
	74	12,3±2,7	5,45±1,07	11,9±2,8	5,8±1,9
Ni	0	1,3±0,18	0,9±0,05	1,57±0,49	0,51±0,12
	15	1,03±0,08	0,86±0,05	1,2±0,28	0,44±0,09
	33	1,13±0,28	1,8±0,4	1,53±0,4	1,12±0,18
	60	1,31±0,37	1,2±0,3	1,55±0,5	0,29±0,14
	74	1,91±0,3	1,2±0,14	1,37±0,4	0,43±0,12

Содержание железа в норме для разных растений определено от 20,0 до 300,0 мг/кг сухого вещества. Критическая концентрация – более 750,0 мг/кг [16]. Превышения нормы содержания железа у растений, произрастающих на исследуемых участках, не наблюдалось. Наибольшее накопление Fe выявлено в уличных посадках у обоих видов. В среднем в условиях городской среды концентрация металла в летний



период колеблется от 144,9 до 299,145 мг/кг для *Q. robur* L. и от 146,6 до 259,6 мг/кг для *Q. rubra* L. Для растений ботанического сада показатели концентрации этого металла несколько ниже (*Q. robur* L. – от 120,29 до 244,4 мг/кг; *Q. rubra* L. – от 116,08 до 175,26 мг/кг (табл. 3).

Для нормального развития растений необходимо определенное соотношение Fe/Mn (1,5 до 2,5). Полученные нами данные не укладываются в рамки нормального соотношения Fe/Mn. Для растений *Q. robur* L., произрастающих на улицах с интенсивным транспортным потоком, этот показатель колеблется от 2,7 до 4,68, для *Q. rubra* L. – от 4,7 до 5,2. Соотношение Fe/Mn в ботаническом саду изменялось для *Q. robur* L. в пределах 0,5–0,92, для *Q. rubra* L. – 0,53–0,92. Как превышение содержания Fe над Mn (уличные насаждения), так и его уменьшение (ботанический сад) указывает на неблагоприятную экологическую обстановку территорий (табл. 4).

76

Таблица 4

Соотношение Fe/ Mn в листьях *Q. robur* L. и *Q. rubra* L.

Экспозиция, сутки	<i>Q. robur</i> L.		<i>Q. rubra</i> L.	
	Ботанический сад	Уличные насаждения	Ботанический сад	Уличные насаждения
0	0,62	2,7	0,92	5,2
15	0,71	4,68	0,72	4,7
33	0,75	3,74	0,63	4,9
60	0,90	4,05	0,50	4,9
74	0,95	3,54	0,53	5,4

Еще одним из жизненно необходимых микроэлементов для растений является Zn. Его физиологическая роль заключается в активации многих ферментативных реакций – это кофактор более 300 ферментов, он играет важную роль в азотном, углеродном и фосфорном обменах, способствует синтезу нуклеиновых кислот и белка, повышению устойчивости растений к стрессовым воздействиям. Дефицит цинка приводит к нарушениям фосфорного обмена. В листе при недостатке этого элемента подавляется скорость деления клеток мезофилла, что влечет за собой морфологические изменения листьев. Наиболее характерный признак цинкового голодания – задержка ростовых процессов. Цинк повышает жаро-, засухо- и морозоустойчивость растений, а также устойчивость к грибковым и бактериальным заболеваниям.

Предельно допустимые концентрации цинка для растений установлены в пределах 27,0–150 мг/кг, уровень фитотоксичности – более 400,0 мг/кг [21]. Полученные нами данные по аккумуляции цинка в древесных растениях в течение исследуемого периода на площадках не превышали норму (табл. 3).

Концентрация Zn в листьях *Q. robur* L. в ботаническом саду выше и варьировала в диапазоне от 38,29 до 42,67 мг/кг сухого вещества (табл. 3). Для растений *Q. rubra* L. наибольшая концентрация отмечена для уличных насаждений (36,15–41,01 мг/кг).





Полученные данные по накоплению Zn в листовых пластинках указывают на видоспецифичность данных растений.

Накопление стронция различными организмами зависит не только от их вида, но и от соотношения в окружающей среде других микроэлементов (кальция и фосфора). В оптимальных концентрациях стронций играет положительную роль в обмене веществ в растениях. В малых дозах он выполняет функции, аналогичные функциями кальция: участвует в строительстве клеточной стенки растений, увеличивает прочность растительных тканей и способствует повышению выносливости растений.

Накопление стронция в фитомассе наблюдалось у обоих видов, но его значение не превышало допустимую норму (113,0 мг/кг) [16].

Содержание металла в растениях площадки ботанического сада им. И. Канта варьирует от 10,7 до 32,5 мг/кг; в посадках площадок, расположенных вблизи автотранспорта, — от 4,57 до 29,24 мг/кг. К концу лета аккумуляция стронция увеличилась независимо от вида и места произрастания растений (табл. 3).

Рубидий и никель содержатся в листьях в небольших количествах. Несмотря на это, они играют важную роль в биологических процессах (стимулируют рост, способствуют поддержанию достаточной оводненности тканей и оптимизируют всасывающую силу корней).

За наблюдаемый период отмечено увеличение содержания микроэлементов в листьях; сильнее всего в загрязнении участвуют железо и марганец, меньше — никель и рубидий (табл. 5). В течение летнего периода наблюдаются незначительные колебания содержания этих элементов у обоих видов независимо от места произрастания (табл. 5).

Таблица 5

**Суммарное содержание тяжелых металлов в листьях  
*Q. robur* L. и *Q. rubra* L. за весь период экспозиции**

Элемент	<i>Q. robur</i> L.				<i>Q. rubra</i> L.			
	Ботанический сад		Улицы		Ботанический сад		Улицы	
	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%
Mn	257,0	43,8	84,32	18,5	290,8	56,4	47,9	12,8
Fe	244,4	41,7	299,15	65,8	152,9	29,7	259,6	69,4
Zn	38,59	6,6	35,2	7,7	39,22	7,6	40,65	10,9
Sr	32,5	5,5	29,24	6,4	19,38	3,8	19,75	5,3
Rb	12,3	2,1	5,45	1,3	11,9	2,2	5,8	1,5
Ni	1,91	0,3	1,2	0,3	1,37	0,3	0,43	0,1
<i>Всего</i>	586,7	100	454,5	100	515,6	100	374,1	100

Элементный ряд выявленных тяжелых металлов в листьях *Q. robur* L. и *Q. rubra* L. в ботаническом саду Mn>Fe>Zn> Sr>Rb>Ni, для уличных насаждений с интенсивным транспортным потоком — Fe>Mn>Zn>Sr>Rb>Ni.

Максимальное суммарное содержание идентифицированных элементов (на конец августа) характерно для *Q. robur* L. (586,7 мг/кг), произрастающих в ботаническом саду, минимальное — для *Q. rubra* L.





(374,1 мг/кг) в уличных посадках. Для растений ботанического сада по процентному содержанию магния и железа выявлена некоторая видовая специфичность: *Q. robur* L. Mn – 43,8 %, Fe – 41,7 %; *Q. rubra* L. Mn – 56,4 %, Fe – 29,7 %. В уличных посадках отмечена низкая концентрация Mn у обоих видов (12,8 % и 18,5 %) и избыток железа (65,8 % и 69,4 %), что негативно отражается на общем жизненном состоянии растений (у *Q. robur* L. в уличных насаждениях листовые пластинки поражены хлорозом, у *Q. rubra* L. хлороз не отмечен). Это также указывает на видоспецифичность.

### Заключение

78

Многоэлементный анализ накопления тяжелых металлов в фотосинтезирующих органах двух видов растений рода *Quercus* L. показал, что содержание их (Fe, Ni, Zn, Sr, Rb) не превышает фон и допустимую норму за исключением Mn (для *Q. rubra* L. – в середине вегетационного периода). Содержание тяжелых металлов в течение вегетационного периода непостоянно и увеличивается к концу лета. Наибольшей аккумулярующей способностью обладают листья растений *Q. robur* L., произрастающих в ботаническом саду, наименьшей – *Q. rubra* L. в уличных насаждениях. Более высокий уровень накопления Fe и максимальное соотношение Fe/Mn, а также наименьшее суммарное содержания ТМ в листьях растений *Q. rubra* L. в уличных насаждениях скорее всего связаны с защитной реакцией данного вида на атмосферные загрязнители.

### Список литературы

1. Assunção A. G. L., Schat H., Aarts M. G. M. *Thlaspi caerulescens*, an attractive model species to study heavy metal hyperaccumulation in plants // *New Phytologist*. 2003. Vol. 159. P. 351–360.
2. Масленников П. В., Дедков В. П., Куркина и др. Аккумуляция металлов в растениях урбоэкосистем // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*. 2015. №7. С. 57–69.
3. Жуйкова Т. В., Зиннатова Э. Р. Аккумуляционная способность растений в условиях техногенного загрязнения почв тяжелыми металлами // *Поволжский экологический журнал*. 2014. №2. С. 196–207.
4. Хасанова Р. Ф., Семенова И. Н., Сулюндуков Я. Т., Рафикова Ю. С. Аккумуляция тяжелых металлов в листьях и коре древесных растений в условиях полиметаллического загрязнения // *Естественные и технические науки*. 2017. №12 (114). С. 90–93.
5. Sahu C., Basti S. Trace metal pollution in the environment: a review // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2021. Vol. 18. P. 211–224.
6. Ветчинникова Л. В., Кузнецова Т. Ю., Титов А. Ф. Особенности накопления тяжелых металлов в листьях древесных растений на урбанизированных территориях в условиях Севера // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2013. №3. С. 68–73.
7. Коротченко И. С., Мучкина Е. Я. Тяжелые металлы в почвенном покрове и древесных растениях урбанизированной территории города Красноярска // *Экология урбанизированных территорий*. 2017. №2. С. 6–11.



8. Карбасникова Е. Б., Залывская О. С., Чухина О. В. Содержание тяжелых металлов в почве и древесной растительности в условиях городской агломерации // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. №5 (371). С. 216–223.
9. Ормрод Д. П. Воздействие загрязнения микроэлементами на растения // Загрязнение воздуха и жизнь растений / под ред. М. Трешоу. Л., 1988. С. 327–356.
10. Парибок Т. А. Загрязнение растений металлами и его эколого-физиологические последствия // Растения в экстремальных условиях минерального питания. Эколого-физиологические исследования. Л., 1983. С. 82–90.
11. Шихова Н. С. Оценка функционального состояния зеленых насаждений и аккумуляции ими тяжелых металлов на городских озелененных территориях различного назначения // Сибирский экологический журнал. 2019. Т. 26, №5. С. 612–626.
12. Горышина Т. К. Растение в городе. Л., 1991.
13. Неверова О. А., Колмогорова Е. Ю. Древесные растения и урбанизированная среда: экологические и биотехнологические аспекты. Новосибирск, 2003.
14. Гаврилова А. А., Копытенкова О. И., Андреева Л. А., Фролов А. В. Количественная оценка аккумуляции тяжелых металлов в растениях в зависимости от удаленности автодорог в центре Санкт-Петербурга // Безопасность жизнедеятельности. 2018. №10 (214). С. 44–47.
15. Cowan N., Blair D., Malcolm H., Graham M. A Survey of heavy metal contents of rural and urban roadside dusts: comparisons at low, medium and high traffic sites in Central Scotland // Environmental Science and Pollution. 2021. Vol. 28. P. 7365–7378.
16. Прохорова Н. В., Матвеев Н. М., Павловский В. А. Аккумуляция тяжелых металлов дикорастущими и культурными растениями в лесостепном и степном Поволжье. Самара, 1998.
17. Об экологической обстановке в Калининградской области в 2019 г. : Гос. доклад / Правительство Калининградской области, Мин-во природных ресурсов и экологии Калининградской области. Калининград, 2020.
18. Беус А. А., Грабовская Л. И., Тихонова Н. В. Геохимия окружающей среды. М., 1976.
19. Зайцев Г. Н. Математика в экспериментальной ботанике. М., 1990.
20. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М., 1989.
21. Alvarez-Tinaut M. C., Leal A., Recalde-Martinez L. R. Iron-manganese interaction and its relation to boron levels in tomato plants // Plant and Soil. 1980. № 55. P. 377–388.

#### Об авторах

Юлия Владимировна Королева — канд. геогр. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: [yu.koroleff@yandex.ru](mailto:yu.koroleff@yandex.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-7612-4454>

Наталья Григорьевна Петрова — канд. биол. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: [petrova\\_sov@mail.ru](mailto:petrova_sov@mail.ru)



Владлена Алексеевна Мандрик – специалист, Государственное бюджетное учреждение Калининградской области Природный парк «Виштынецкий», Россия.

E-mail: mandrik\_vladlena@mail.ru

Анаит Севадовна Ананян – инженер – исследователь, АО ИО РАН Атлантическое отделение Института океанологии им. П. Ширшова, Россия.

E-mail: ananyan.anahit.s@gmail.com

### The authors

80

Dr Yulia V. Koroleva, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: yu.koroleff@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7612-4454>

Dr Natalya G. Petrova, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: petrova\_sov@mail.ru

Vladlena A. Mandrik, State Budgetary Institution of the Kaliningrad Region Natural Park “Vishtynetsky”, Russia.

E-mail: mandrik\_vladlena@mail.ru

Anait S. Ananyan, JSC IO RAS Shirshov’s Atlantic Branch of the Institute of Oceanology, Russia.

E-mail: ananyan.anahit.s@gmail.com