

УДК 631.416.9

DOI 10.36305/2712-7788-2021-3-160-38-49

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ И ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПОЧВАХ АРБОРЕТУМА НИКИТСКОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА

Игорь Владимирович Костенко, Елена Викторовна Дунаевская

Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН,
298648, Республика Крым, г. Ялта, пгт Никита
E-mail: ik_64@bk.ru

В ходе многолетней хозяйственной эксплуатации земель Никитского ботанического сада почвенный покров арборетума подвергся существенной трансформации за счет регулярного привноса различного рода мелиорантов, плодородной почвы из других регионов Крыма, органических и минеральных удобрений, обработки растений пестицидами, что могло способствовать накоплению в почвах различного рода поллютантов, в том числе и тяжелых металлов. В связи с этим было изучено содержание в почвах арборетума и прилегающих территорий под различными типами растительности кислоторастворимых форм Cu, Zn, Mn, Ni, Co, Pb и Cd, экстрагируемых 1М раствором HNO_3 и подвижных форм этих элементов, переходящих в аммонийно-ацетатную вытяжку с $\text{pH}=4,8$. Согласно полученным данным многолетнее применение медьсодержащих пестицидов привело к накоплению в верхнем слое почв под розами подвижной меди, среднее содержание которой в почвах розариев составило $5,2 \pm 3,1$, что выше ПДК, равной 3 мг/кг. Под другими цветочными культурами и под насаждениями древесных пород среднее содержание подвижной меди было на порядок меньше – $0,44 \pm 0,25$ мг/кг, а кислоторастворимой – в 5 раз меньше. Под всеми цветочными культурами произошло накопление цинка, среднее содержание подвижной и кислоторастворимой фракций которого было почти вдвое выше, чем под древесными породами, однако значительно ниже ПДК. Незначительное превышение ПДК по свинцу было выявлено только на одном участке под древесными растениями. Среди остальных элементов существенных различий по их содержанию под цветочными и древесными растениями не выявлено, а максимальные их концентрации были значительно ниже ПДК, что позволяет рассматривать Cu (кроме розариев), Zn, Mn, Ni и Co не в качестве тяжелых металлов, а в качестве микроэлементов, необходимых для нормального функционирования живых организмов.

Ключевые слова: медь; цинк; марганец; никель; кобальт; свинец; кадмий; кислоторастворимая форма; подвижная форма

Введение

Почвы арборетума Никитского ботанического сада сформировались на смешанном делювии глинистых сланцев, залегающих у основания Главной гряды Крымских гор и перекрывающих их известняков, с чем связана их карбонатность и слабощелочная реакция (Опанасенко и др., 2018). Более чем двухсотлетняя хозяйственная деятельность человека по благоустройству территории НБС существенно изменила исходный облик и вещественный состав почв арборетума по сравнению с прилегающими к Саду коричневыми почвами сухих лесов и кустарников, составлявших основу почвенного покрова Южного берега Крыма. Закладка новых насаждений, строительство сооружений, устройство террас, подпорных стен, дорожек, прокладка коммуникаций привели к смещению, переотложению, погребению гумусового горизонта, а регулярный завоз различного рода мелиорантов – к формированию нового плодородного слоя, не свойственного данной биоклиматической обстановке. Исходные коричневые почвы сохранились, главным образом, под естественной древесной растительностью на крутых склонах, не затронутых хозяйственной деятельностью человека (Гаврилова и др., 2018).

Привнос в почвы Сада различного рода мелиорантов, плодородной почвы из других регионов Крыма, органических и минеральных удобрений, обработка растений пестицидами могли способствовать накоплению в верхнем слое почв различного рода

поллютантов, в том числе и тяжелых металлов (ТМ), высокие концентрации которых неблагоприятно влияют на рост и развитие растений (Титов и др., 2014). При содержании ниже уровня ПДК большинство из элементов, относящихся к группе ТМ, рассматриваются в качестве микроэлементов (МЭ), необходимых для нормального функционирования живых организмов.

Первые исследования по изучению содержания в почвах арборетума валовых форм ТМ были выполнены в рамках Крымской комплексной экспедиции Русского географического общества в 2015-2017 гг. (Гаврилова и др., 2018). Как показали результаты этих работ, концентрации ряда элементов, относящихся к первому (Zn, As, Cd, Pb) и второму (Cu, Sb) классам опасности в почвах Сада превышает их кларки в земной коре, а содержание As также выше ориентировочно допустимой концентрации (ОДК). По мнению авторов, это объясняется высоким содержанием данных элементов в почвообразующей породе – делювии глинистых сланцев, хотя не исключается и их внешний привнос. Известно, что Cu может поступать в почву при обработке растений бордосской жидкостью, Zn – при сжигании топлива и бытовых отходов, Cd – с фосфорными удобрениями, Pb – с удобрениями, компостами, продуктами горения топлива (Зырин, Садовников, 1985; Перельман, Касимов, 1999; Мотузова, Карпова Е.А., 2013). Исследования последних лет подтверждают тенденцию к увеличению кларков ряда химических элементов, имеющей ярко выраженный техногенный характер (D'yachenko, Matasova, 2016). По данным Н.Е. Кошелевой и соавторов (Kosheleva, Kasimov, Vlasov (2015)) аккумуляция ТМ контролируется физико-химическими свойствами почв, ландшафтными условиями и антропогенным влиянием.

Данные о валовом содержании в почвах ТМ дают представления об их потенциальных запасах, которые могут переходить в подвижное состояние, доступное для поглощения корневыми системами растений. Известно, что подвижность многих элементов увеличивается при снижении уровня pH (Костенко, Никифоров, 2020), поэтому в щелочной среде, характерной для почв арборетума даже относительно высокое содержание опасных для растений ТМ может не оказывать токсичного воздействия из-за их слабой биодоступности (Соколова и др., 2006). Этим объясняется введение предельно допустимых концентраций только для подвижных элементов, переходящих в аммонийно-ацетатную почвенную вытяжку (Предельно допустимые ..., 2006), содержание которых, по данным Н.А. Черных и В.Ф. Ладонина (1995) коррелирует с количеством ТМ в растениях.

Цель исследований – определить содержание подвижных форм МЭ и ТМ в почвах арборетума под различными типами растительности.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на территории верхнего и нижнего парков Никитского ботанического сада, расположенного на южном макросклоне Главной гряды крымских гор в пределах высот от 89 до 179 м над уровнем моря. Смешанные образцы почв, состоящие из 10-15 индивидуальных образцов, отбирались из слоя 0-10 см на куртинах с однолетними и многолетними цветочными культурами (4 участка), розами (7 участков) и на 11 участках с древесными растениями. Среди последних доминировали секвойя вечнозеленая (*Sequoia sempervirens* Endl.), секвойядендрон гигантский (*Sequoiadendron giganteum* (Lindl.) J. Buchholz), платан восточный (*Platanus orientalis* L.), кедр гималайский (*Cedrus deodara* (Roxb. ex D. Don) G. Don), кедр атласский (*Cedrus atlantica* (Endl.) G. Manetti ex Carrière), дуб каменный (*Quercus ilex* L.), дуб пробковый (*Quercus suber* L.), кипарис вечнозеленый (*Cupressus sempervirens* L.), каштан конский (*Aesculus hippocastanum* L.), лавр благородный (*Laurus nobilis* L.), гинкго двулопастное (*Ginkgo biloba* L.), магнолия крупноцветковая

(*Magnolia grandiflora* L.), кипарис крупноплодный (*Cupressus macrocarpa* Hartw. ex Gordon), дзельква граболистная (*Zelkova carpinifolia* (Pall.) K. Koch) (рис. 1, табл. 1). В качестве контроля использовали смешанные образцы коричневой красноцветной целинной лесной почвы на выщелоченном делювии известняков, отобранный под естественной лесной растительностью в центральной части заповедника “Мыс Мартыан” (образец 28) и коричневой почвы на делювии сланцев из западной части Никитского сада (образец 22).

Климат района исследований по данным метеостанции “Никитский сад” характеризуется среднегодовой температурой 12,5°C, температурой июля – 23,3, января-февраля - 3°C и среднегодовым количеством осадков 592 мм (Плугатарь и др., 2015).

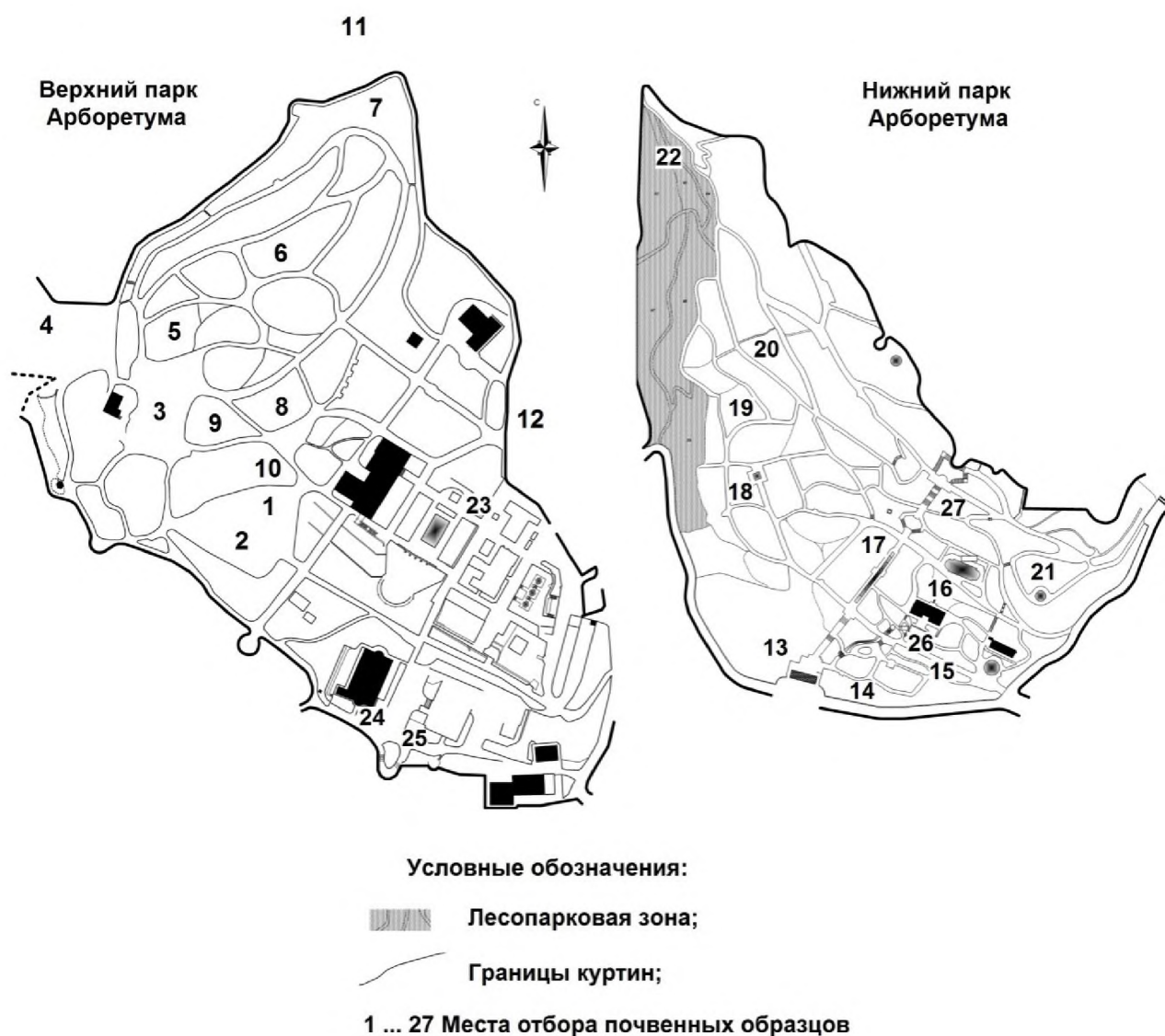


Рис. 1 Места отбора почвенных образцов на территории Верхнего и Нижнего парков Арборетума

Fig. 1 Soil sampling sites in the Upper and Lower Parks of the Arboretum

Таблица 1

Растительность и некоторые свойства почв в местах отбора почвенных образцов

Table 1

Vegetation and some soils properties in places of sampling

Образец Sample, №	Растительность Vegetation	pH	CaCO ₃ , %
1	Хризантемы, верхний участок / Chrysanthemums, upper section	7,38	21,7
2	Хризантемы, нижний участок / Chrysanthemums, lower section	7,45	25,3
3	Большой розарий / Big rose garden	7,75	10,8
4	Цветочная клумба / Flower bed	7,66	30,3
5	Древесные породы / Tree species	7,49	8,4
6	Древесные породы / Tree species	7,37	5,2
7	Древесные породы / Tree species	7,33	26,5
8	Древесные породы / Tree species	7,5	18,4
9	Древесные породы / Tree species	7,52	17,8
10	Розарий / Rose garden	7,6	22,2
11	Хеномелес японская / Henomeles japonica	7,62	21,9
12	Кедры гималайские вдоль трассы Himalayan cedar along the route	7,4	35,1
13	Древесные породы / Tree species	7,63	7,9
14	Древесные породы / Tree species	7,6	21
15	Розы на пальмовой аллее / Roses on the palm alley	7,99	24,4
16	Коллекция пальм / Palm trees collection	7,78	26
17	Магнолия крупноцветковая / Magnolia grandiflora	7,55	24,2
18	Древесные породы / Tree species	7,7	9,1
19	Дзельква граболистная / Zelkova homblum	7,41	15,1
20	Эфиромасличные растения / Essential oil plants	7,93	11,7
21	Цветочная клумба / Flower bed	7,86	30,3
22	Лес в западной части НБС / Forest in the west part of the NBG	7,31	4,6
23	Розарий / Rose garden	7,46	21,2
24	Розарий / Rose garden	7,77	16,3
25	Розарий / Rose garden	7,78	18,9
26	Розарий / Rose garden	7,85	36,3
27	Древесные породы / Tree species	7,31	3,7
28	Заповедник "Мыс Мартыан" / "Cape Martyan" reserve	6,46	0

Исследование поверхностного слоя обусловлено концентрацией в нем основного количества поступающих в почвы ТМ (Соколова и др., 2006). На каждой куртине был взят один смешанный образец, состоящий из 10-15 (в зависимости от площади) индивидуальных проб. Два образца было взято на территории Сада за пределами арборетума: образец 11 под насаждениями хеномелеса японского (*Chaenomeles japonica* (Thunb.) Sprach) и 12 – под кедрами гималайскими, произрастающими вдоль трассы рядом с арборетумом. Почвы арборетума сформировались на смешанном делювии известняков и глинистых сланцев с различным соотношением этих пород. Почвы под цветочными культурами подвергались регулярному рыхлению, орошению, внесению мелиорантов (плодородной почвы, опилок, угольного шлака), минеральных и различных форм органических удобрений (компоста, навоза, осадков сточных вод с городских очистных сооружений).

Таким образом, плодородный слой под цветочными видами представлял собой органоминеральный субстрат, имеющий мало общего с природной почвой. Почвы на куртинах с древесно-кустарниковой растительностью подвергались гораздо меньшему антропогенному воздействию, которое ограничивалось рыхлением приствольных

кругов и участков, не занятых почвопокровными растениями, периодическим поливом и внесением органо-минеральных удобрений.

В образцах определяли pH водной суспензии, содержание карбонатов волюмометрическим методом, кислоторастворимых форм Cu, Zn, Mn, Ni, Co, Pb и Cd, экстрагируемых 1М раствором HNO_3 и подвижных форм этих элементов, переходящих в аммонийно-ацетатную вытяжку с pH=4,8 (Методические указания, 1992). Измерение концентрации металлов в растворах проводили на атомно-абсорбционном спектрометре КВАНТ 2МТ производства ООО “КОРТЕК”. Статистическую обработку результатов проводили с использованием пакета программ STATISTICA 6.

Результаты и обсуждение

Почвы арборетума, в зависимости от соотношения глинистых сланцев и известняков в составе смешанного делювия, содержат от 4 до 36% карбонатов, среднее количество которых в слое 0-10 см равно $19 \pm 9\%$. Присутствием карбонатов обусловлена слабощелочная среда почвенной суспензии с pH от 7,31 до 7,99 единиц. В почве контрольного участка, расположенного в западной части НБС, содержание карбонатом было низким из-за небольшой доли известняков в составе делювия (табл. 1). В то же время, в почве контрольного участка на мысе Мартьян, развитой на продуктах выветривания известняков, карбонаты были полностью выщелочены за пределы горизонта А (Костенко, 2015).

Содержание подвижной меди варьировало от предела обнаружения до 10,9 мг/кг при среднем количестве $1,82 \pm 2,63$ мг/кг. Больше всего меди было обнаружено в почвах розариев, что объясняется регулярной обработкой растений фунгицидами на основе медного купороса (табл. 2). В шести случаях из семи содержание этого элемента превышало ПДК, равную 3 мг/кг и в среднем составило $5,2 \pm 3,1$ мг/кг. Близкая к ПДК концентрация меди была выявлена на участке цветочных культур №4 (табл. 2), где ранее произрастал плодовой сад, растения в котором также регулярно обрабатывались медьсодержащими препаратами. На остальных участках с древесными и цветочными культурами содержание подвижной меди было ниже 1 мг/кг и в среднем составило $0,44 \pm 0,25$ мг/кг. При этом, на контрольных участках под естественной древесной растительностью в западной части Сада содержание меди в почве на глинистых сланцах было выше этого уровня, а на мысе Мартьян, в почве на известняках – ниже предела обнаружения (табл. 2).

Содержание подвижной меди под айвой японской и кедрами гималайскими вдоль трассы не выходило за пределы варьирования ее содержания под древесными породами арборетума (табл. 2).

Количество меди, перешедшее в 1М HNO_3 вытяжку, значительно превышало количество биодоступной меди и в среднем для всех участков составило $41,9 \pm 41,6$ мг/кг, что в 24 раза больше подвижной ее формы. Обе формы меди были тесно связаны между собой (рис. 2), что наряду с небольшой долей ее подвижной формы свидетельствует о высокой буферности карбонатной почвы, способствующей удержанию большей части меди в недоступном для растений состоянии. Среднее содержание меди в почве под розами было 101 ± 39 , а под цветочными и древесными растениями – $19,3 \pm 7,7$ мг/кг. На участке № 24 под розами ее концентрации была выше ОДК (ориентировочно допустимой концентрации) для валовой меди, равной 132 мг/кг (табл. 3). Высокая концентрация элемента обнаружена под цветочными культурами на бывшем плодовом участке (участок 4). Как и в случае с биодоступной формой меди, ее содержание на контрольном участке 22 было выше, чем на участке 28 (табл. 3). Среднее содержание подвижного цинка в почвах арборетума было равно $5,37 \pm 2,41$ мг/кг ($n=24$), в том числе под цветочными культурами – $7,44 \pm 2,61$ (Kosheleva N.E.,

Kasimov N.S., Vlasov D.V.) ($n=4$), под розами $-6,78 \pm 1,83$ мг/кг ($n=7$), а под древесными – $3,98 \pm 1,78$ мг/кг ($n=13$).

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов в аммонийно-ацетатной вытяжке из почв

Table 2

Heavy metals content in ammonium-acetate soil extract

Образец Sample, №	Содержание, мг/кг / Content, mg/kg						
	Cu	Zn	Mn	Ni	Co	Pb	Cd
1	0,64	8,11	5,37	0,2	0,083	2,45	0,082
2	0,81	7,71	6,94	0,22	0,083	2,94	0,077
3	7,77	7,87	4,12	0,39	0,075	3,81	0,082
4	2,9	10,1	4,77	0,27	0,080	2,04	0,09
5	0,52	2,65	5,54	0,15	0,133	2,18	0,059
6	0,27	1,99	3,78	0,08	0,078	2	0,059
7	0,83	5,38	3,09	0,16	0,097	5,69	0,069
8	0,2	3,52	3,9	0,11	0,070	2,24	0,063
9	0,4	4,24	4,72	0,16	0,122	6,48	0,066
10	3,91	4,53	4,99	0,37	0,105	3,23	0,081
11	0,6	4,69	4,33	0,29	0,082	2,08	0,058
12	0,77	27,6	3,5	0,13	0,053	3,74	0,109
13	0,18	5,15	3,91	0,13	0,090	2,45	0,062
14	0,22	5,4	2,91	0,13	0,057	3,72	0,084
15	4,86	4,9	4,16	0,44	0,018	3,12	0,099
16	0,71	5,58	3,8	0,31	0,049	3,02	0,076
17	0,31	5,63	3,09	0,19	0,064	4,16	0,097
18	0,5	4,62	5,18	0,14	0,116	1,94	0,061
19	0,34	5,42	4,31	0,19	0,094	3,79	0,071
20	0,13	0,34	2,12	0,34	0,039	1,45	0,044
21	0,55	3,85	3,23	0,30	0,030	2,02	0,08
22	0,96	1,50	3,50	0,18	0,166	1,68	0,028
23	3,16	9,16	5,11	0,30	0,206	3,52	0,087
24	10,9	5,87	3,84	0,48	0,160	2,76	0,098
25	3,48	6,45	4,21	0,43	0,167	3,11	0,094
26	2,28	8,68	5,308	0,35	0,215	4,64	0,092
27	0	1,80	2,73	0,14	0,101	2,22	0,038
28	0	2,84	35,2	0,60	0,486	1,37	0,086

При этом различия между почвами под цветочными и древесными культурами по содержанию цинка были достоверны согласно критерию Манна-Уитни при $p < 0,01$. Наибольшая концентрация подвижного цинка в почве, превышающая уровень ПДК (23,0 мг/кг), была выявлена за пределами арборетума под произрастающими вдоль трассы кедром гималайскими, хотя под расположенными вблизи кедров насаждениями хеномелиса содержание цинка не превышало его концентрации в почвах арборетума. На контрольных участках количество цинка было ниже его среднего содержания под древесными породами арборетума (табл. 2).

Те же закономерности были выявлены и для содержания кислоторастворимого цинка, среднее количество которого было в 6,2 раза выше подвижного. Под древесными культурами его содержалось $26,6 \pm 6,8$ мг/кг ($n=13$), цветочными, включая розы, существенно больше – $45,9 \pm 11,6$ мг/кг ($n=11$). Наибольшее количество этой формы цинка выявлено в почве вдоль трассы (табл. 3). Как и в случае с медью, связь между двумя формами цинка была очень тесной (рис. 2), но доля его аммонийно-

ацетатной формы была несколько больше (16%), что свидетельствует о более высокой подвижности цинка в почвах арборетума по сравнению с медью.

Таблица 3

Содержание тяжелых металлов в 1 М HNO₃ вытяжке из почв

Table 3

Heavy metals content in 1 M HNO₃ soil extract

Образец Sample, №	Содержание, мг/кг / Content, mg/kg						
	Cu	Zn	Mn	Ni	Co	Pb	Cd
1	19,2	49,1	21,6	4,07	1,92	17	0,184
2	26,2	43,8	27,1	4,3	2,04	16,2	0,170
3	116,7	43,1	19,2	4,45	2,28	24,6	0,172
4	77,2	62,4	22,4	3,79	2,15	24,2	0,206
5	26,8	20,7	21,9	4,15	2,64	19,3	0,121
6	12,6	19,2	19,6	3,95	2,47	16,4	0,124
7	39,1	31,2	16,4	3,32	1,87	19,6	0,145
8	13,2	29,9	22,7	3,48	2,16	18,4	0,167
9	18,6	28,0	19,9	3,96	2,43	37,6	0,144
10	76,6	28,2	23	5,03	2,76	20,9	0,159
11	22	33,0	26,6	4,07	2,53	15,3	0,118
12	27,4	117,6	21,1	2,1	1,05	22,2	0,281
13	10,0	32,1	21,9	3,77	3,35	19,1	0,117
14	13,9	32,2	19,1	3,69	2,19	24,1	0,153
15	93,4	36,1	32,2	5,58	2,79	29,1	0,196
16	24,1	32,2	24,6	4,18	2,31	17,7	0,161
17	17	30,9	20,3	4,36	2,38	21,5	0,166
18	22,5	28,6	23,6	3,8	3,10	15,4	0,125
19	18,5	28,5	21,6	3,81	2,39	18	0,149
20	9,7	9,1	24	7,29	2,76	8,98	0,103
21	17,1	26,8	29,9	4,14	2,33	12,1	0,151
22	36,1	14,7	23,1	6,18	3,54	12,8	0,048
23	95,5	56,4	21,1	5,36	2,34	17,3	0,162
24	179,5	50,7	38,4	11,0	4,37	16,1	0,176
25	91,4	51,7	35,7	9,82	4,02	14,7	0,167
26	55,3	56,4	27,9	6,03	2,82	26,5	0,170
27	8,84	23,1	30,7	8,34	4,29	17,5	0,075
28	5,41	9,3	93,7	6,12	4,52	13,8	0,191

Содержание в карбонатных почвах подвижного марганца очень низкое на всех участках арборетума и прилегающих территорий и его среднее количество (4,16±1,0 мг/кг) было в 8,5 раз меньше по сравнению со слабокислой почвой заповедника “Мыс Мартыан” (табл. 2). Различия между участками под цветочными и древесными растениями по содержанию подвижного марганца были недостоверными.

Влияние карбонатов на подвижность марганца подтверждается тем, что из карбонатных почв в кислотную вытяжку его перешло в 5,8 раз больше, чем из почвы заповедника (табл. 2, 3). При таких концентрациях марганец рассматривается исключительно как необходимый растениям микроэлемент, поскольку даже максимальное его количество, переходящее в кислотную вытяжку из почв заповедника (табл. 3) гораздо ниже ПДК подвижной формы марганца (140 мг/кг). Какой-либо связи между содержанием подвижного и кислоторастворимого марганца не выявлено (рис. 2), поскольку доля биодоступной формы элемента варьировала очень сильно – от 9 до 26%.

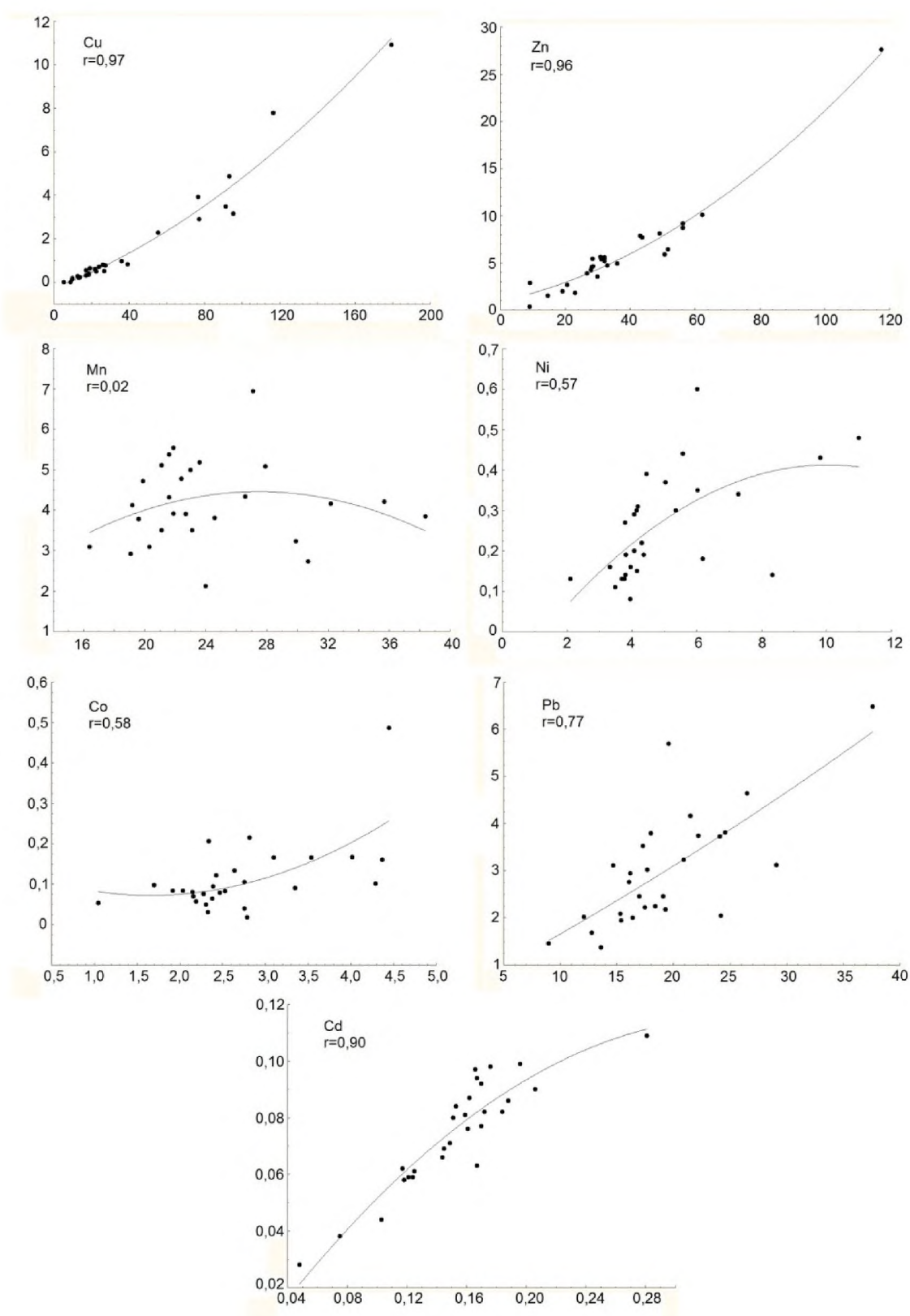


Рис. 2 Зависимость концентрации (мг/кг) элементов в аммонийно-ацетатной вытяжке (ось ординат) от их концентрации в 1М вытяжке HNO_3 (ось абсцисс)

Fig. 2 The dependence of the elements concentration (mg/kg) in the ammonium acetate extract (ordinate axis) on their concentration in the 1 M extract of HNO_3 (abscissa axis)

Подвижного никеля в почве под цветочными культурами содержалось $0,34 \pm 0,09$ мг/кг, а древесными вдвое меньше – $0,17 \pm 0,07$ мг/кг. Содержание никеля в почвах под хеномелесом, кедрами, в контрольных образцах на глинистых сланцах не выходило за пределы этих значений, а в контроле на мысе Мартьян – было почти вдвое больше, чем в почве цветников и розариев (табл. 2), но значительно меньше ПДК (4,0 мг/кг). Содержание в почвах кислоторастворимого никеля по сравнению с подвижным в почве мыса Мартьян было больше в 6 раз, под цветочными культурами – в 17 раз, под древесными – в 26 раз и в почве контроля западной части НБС – в 34 раза, поэтому корреляция между ними была слабой (рис. 2). В связи этим среднее содержание кислоторастворимого никеля, в отличие от подвижного, под цветочными культурами ($5,78 \pm 2,41$ мг/кг) мало отличалось от его содержания под древесными растениями ($4,47 \pm 1,53$ мг/кг).

Почвы арборетума и прилегающих территорий характеризуются также низким содержанием подвижного кобальта, среднее количество которого под цветочными культурами составило $0,111 \pm 0,067$ мг/кг, а под древесными – $0,089 \pm 0,036$ мг/кг. Содержание кобальта за пределами арборетума, в том числе в почве контрольного участка на сланцах не выходило за эти пределы (табл. 2). Существенно больше подвижного кобальта было в почве на мысе Мартьян, но все равно в 10 раз меньше уровня ПДК (5 мг/кг). Кислоторастворимая фракция кобальта, как и никеля, слабо коррелировала с подвижной (рис. 2), поэтому разницы между содержанием элемента в почвах под цветочными культурами ($2,71 \pm 0,80$ мг/кг) и древесными растениями ($2,63 \pm 0,65$ мг/кг) практически не было. Наименьшее количество данной фракции кобальта было обнаружено в почве под кедрами гималайскими вдоль трассы, а наибольшее – в почве контрольных участков (табл. 3), но даже эти значения были ниже ПДК для подвижных форм кобальта.

Таким образом, из всех перечисленных выше элементов только медь на шести участках под розами и цинк под кедрами гималайскими вдоль трассы (табл. 2) были обнаружены в количествах, превышающих ПДК, что позволяет рассматривать их в качестве тяжелых металлов, потенциально опасных для растений. Во всех остальных случаях медь, цинк, а также марганец, никель и кобальт, концентрации которых значительно меньше ПДК, рассматриваются нами в качестве микроэлементов, необходимых для сбалансированного питания растений.

Различия между содержанием подвижного свинца в почвах под цветочными культурами ($3,06 \pm 0,77$ мг/кг) и под древесными ($3,18 \pm 1,53$ мг/кг) недостоверны, однако в последнем случае разброс значений был значительно большим (см. табл. 2) и в одном случае (участок 9) количество свинца превышало ПДК, равную 6 мг/кг. Под хеномелесом и кедрами, произрастающими вдоль трассы, содержание данной фракции свинца не выходило за пределы варьирования его количества в почвах арборетума, а на контрольных участках было примерно вдвое меньше (см. табл. 2). Таким образом, близость объектов исследований к автотрассе, как традиционному источнику свинца не привела к накоплению его подвижной формы в поверхностном слое почвы, поэтому повышенные количества элемента в почвах некоторых участков арборетума могут быть обусловлены иными антропогенными причинами: внесением удобрений, компостов, загрязнением бытовым мусором. По данным наших исследований почв под искусственными насаждениями березы на плато Ай-Петри накопление подвижного свинца до уровня ПДК возможно и при отсутствии антропогенных источников под воздействием кислых продуктов разложения лесной подстилки (Костенко, Никифоров, 2020). Содержание кислоторастворимого свинца в среднем превышало концентрацию

его подвижной фракции в 6,3 раза. Почвы под цветочными и древесными культурами содержали его примерно равное количество – $19,1 \pm 4,6$ и $19,5 \pm 6,5$ мг/кг соответственно. Под хеномелесом содержание свинца было несколько меньшим относительно почв арборетума, под кедрами – чуть большим. Меньше всего кислоторастворимого свинца содержалось в почвах контрольных участков и под эфиромасличными культурами в роще ливанских кедров (см. табл. 1, 3).

Содержание подвижного кадмия, относящегося к одному из наиболее токсичных ТМ (Лукин, Селюкова, 2018; Lukin, Yavtushenko, Soldat, 2000), было наименьшим среди всех изученных элементов. В среднем под цветочными культурами его содержалось $0,087 \pm 0,008$, древесными – $0,065 \pm 0,015$ мг/кг, причем эти различия были достоверными. За пределами арборетума в почве под хеномелесом кадмия содержалось меньше, чем в среднем в почвах арборетума, под кедрами – больше. Наименьшее содержания кадмия отмечено в почве контрольного участка в западной части сада, тогда как на мысе Мартьян его концентрация соответствовала почвам под цветочными культурами (табл. 2). Поскольку российскими нормативами ПДК для подвижного кадмия не установлена, объективная оценка степени загрязнения почвы этим элементом затруднена. По данным С.В. Лукина с соавт. (Lukin, Yavtushenko, Soldat, 2000) за уровень ПДК можно принять содержание подвижного кадмия 0,7 мг/кг, при котором происходит загрязнение наименее толерантных к кадмию сельскохозяйственных культур. Согласно нашим данным, среднее содержание кадмия в почвах НБС на порядок меньше (0,07 мг/кг), что свидетельствует об отсутствии риска интоксикации растений Сада данным поллютантом. Среднее содержание кислоторастворимого кадмия было всего в 2 раз больше, что свидетельствует о сильной подвижности данного элемента даже в карбонатных почвах. Корреляция между содержанием подвижного и кислоторастворимого кадмия была тесной (см. рис. 2), поэтому закономерности, характерные для распространения подвижной фракции элемента, присущи и распределению кислоторастворимой. Так, под цветочными культурами кадмия содержалось $0,174 \pm 0,016$, древесными – $0,135 \pm 0,027$ мг/кг, больше всего – под кедрами и меньше всего – в почве контроля на глинистых сланцах (см. табл. 3).

Таким образом, анализ содержания двух фракций кадмия в изученных объектах свидетельствует об отсутствии признаков загрязнения почв арборетума и прилегающих территорий Сада этим металлом.

Заключение

Среди МЭ и ТМ, содержание которых определялось в поверхностном слое карбонатных почв арборетума НБС и прилегающих к нему территорий, наименьшей подвижностью (долей аммонийно-ацетатной фракции в составе кислоторастворимой) обладают медь, кобальт и никель (4-5%), более высокой – цинк, марганец и свинец (16-17%) и наибольшей – кадмий (49%). В слабокислой почве мыса Мартьян цинк (31%), марганец (31%), никель (10%) и кобальт (11%) отличались большей подвижностью, свинец (10%) – меньшей, кадмий (46%) – близкой к карбонатным почвам арборетума.

Низкая подвижность цинка, марганца и свинца свидетельствует о высокой буферной способности карбонатных почв по отношению к этим элементам, что предохраняет растения от неблагоприятного влияния на них ряда ТМ.

Хозяйственная деятельность на территории арборетума привела к накоплению в почвах выше уровня ПДК меди под розами и свинца на одной из куртин под древесными растениями. Превышение ПДК цинка было выявлено только в почве вдоль трассы под кедрами гималайскими. Под цветочными культурами отмечено также достоверное увеличение содержания никеля и кадмия, однако даже максимальные концентрации этих элементов были значительно меньше ПДК.

Благодарности / Acknowledgements

Исследования выполнены в рамках темы госзадания № 0829-2019-0031.

Литература / References

Гаврилова В.И., Герасимова М.И., Гуров И.А., Костенко И.В., Плугатарь Ю.В. Почвы, почвенный покров и почвенно-геохимические особенности Никитского ботанического сада. М.: Географический факультет МГУ, 2018. 83 с.

[Gavrilova V.I., Gerasimova M.I., Gurov I.A., Kostenko I.V., Plugar Yu.V. Soils, soil cover and soil-geochemical features of the Nikitsky Botanical Gardens. Moscow: Faculty of Geography MSU, 2018. 83 p.]

Зырин Н.Г., Садовников Л.К. Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. 208 с.

[Zyrin N.G., Sadovnikov L.K. Chemistry of heavy metals, arsenic and molybdenum in soils. Moscow: Publishing house of Moscow State University, 1985. 208 p.]

Костенко И.В. Атлас почв Горного Крыма. К.: Аграрнанаука, 2014. 184 с.

[Kostenko I.V. Atlas of soils of Mountain Crimea. Kyiv: Agrarian Science, 2014. 184 p.]

Костенко И.В., Никифоров А.Р. Изменения содержания биодоступных соединений тяжелых металлов в почвах горных плато Крыма после облесения // Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3. № 2. С. 1-16. DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-2-1-16
[Kostenko I.V., Nikiforov A.R. Changes in the content of bioavailable compounds of heavy metals in the soils of the Crimean mountain plateaus after afforestation. *Problems of forest science*. 2020. 3 (2): 1–16. DOI 10.31509/2658-607x-2020-3-2-1-16]

Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции (издание 2-е, переработанное и дополненное). М.: ЦИНАО, 1992. 62 с.

[Guidelines for the determination of heavy metals in agricultural soils and products (2nd edition, revised and enlarged). M.: CINAS, 1992. 62 p.]

Мотузова Г.В., Карпова Е.А. Химическое загрязнение биосферы и его экологические последствия. Учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2013. 304 с.

[Motuzova G.V., Karpova E.A. Chemical pollution of the biosphere and its ecological consequences. Textbook.: Moscow: Publishing house of Moscow State University, 2013. 304 p.]

Опанасенко Н.Е., Плугатарь Ю.В., Казимирова Р.Н., Евтушенко А.П. Почвы парков Никитского ботанического сада. Симферополь: АРИАЛ, 2018. 256 с.

[Opanasenko N.E., Plugar Yu.V., Kazimirova R.N., Evtushenko A.P. Soils of the parks of the Nikitsky Botanical Gardens. Simferopol: ARIAL, 2018. 256 p.]

Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрей, 1999. 764 с.

[Perelman A.I., Kasimov N.S. Landscape geochemistry. Moscow: Astrea, 1999. 764 p.]

Плугатарь Ю.В., Корсакова С.П., Ильницкий О.А. Экологический мониторинг Южного берега Крыма. Симферополь: АРИАЛ, 2015. 161 с.

[Plugar Yu.V., Korsakova S.P., Ilitsky O.A. Ecological monitoring of the Southern coast of the Crimea. Simferopol: ARIAL, 2015. 161 p.]

Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических элементов в почве: Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 15 с.

[Maximum permissible concentration (MPC) of chemical elements in the soil: Hygienic standards. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2006. 15 p.]

Соколова О.Я., Стряпков А.В., Антимонов С.В., Соловых С.Ю. Тяжелые металлы в системе элемент – почва – зерновые культуры // Вестник Оренбургского государственного университета. 2006. № 4. С. 106–110.

[Sokolova O.Ya., Strypkov A.V., Antimonov S.V., Solovykh S.Yu. Heavy metals in the element - soil - grain system // *Bulletin of the Orenburg State University*. 2006. 4: 106–110]

Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 194 С.

[Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V. Heavy metals and plants. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the RAS, 2014. 194 p.]

Черных Н.А., Ладонин В.Ф. Вопросы нормирования содержания тяжелых металлов в почве // Химия в сельском хозяйстве. 1995. № 5. С. 10-13.

[Chernykh N.A., Ladonin V.F. Issues of rationing the content of heavy metals in soil. *Chemistry in agriculture*. 1995. 5: 10-13.]

D'yachenko V.V., Matasova I.Y. Regional Clarks of Chemical Elements in Soils of Southern European Russia // *Eurasian Soil Science*. 2016. Vol. 49. No 10. P. 1091–1098. DOI: 10.1134/S1064229316100069

Lukin S.V., Yavtushenko V.E., Soldat I.E. Cadmium Accumulation in Agricultural Crops Dependent on the Soil Contamination Level // *Eurasian Soil Science*. 2000. Vol. 33. No Suppl. 1. P. 91–95.

Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Vlasov D.V. Factors of the Accumulation of Heavy Metals and Metalloids at Geochemical Barriers in Urban Soils // *Eurasian Soil Science*. 2015. Vol. 48. No 5. P. 476–492. DOI: 10.1134/S1064229315050038

Lukin S.V., Selyukova S.V. Ecological Assessment of the Content of Cadmium in Soils and Crops in Southwestern Regions of the Central Chernozemic Zone, Russia // *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51. No 12. P. 1547–1553. DOI: 10.1134/S1064229318120074

Статья поступила в редакцию 25.06.2021 г.

Kostenko I.V., Dunaevskaya E.V. Microelements and heavy metals in the soils of the Arboretum of the Nikitsky Botanical Gardens // *Plant Biology and Horticulture: theory, innovation*. 2021. № 3 (160) P. 38-49.

During the long-term economic exploitation of the lands of the Nikitsky Botanical Gardens, the soil cover of the Arboretum underwent a significant transformation due to the regular introduction of various kinds of ameliorants, fertile soil from other regions of the Crimea, organic and mineral fertilizers, and treatment of plants with pesticides, which could contribute to the accumulation of various pollutants in soils, including heavy metals. In this regard, the content of acid-soluble forms of Cu, Zn, Mn, Ni, Co, Pb, and Cd, extracted with a 1M solution of HNO₃ and mobile forms of these elements, passing into an ammonium-acetate extract with pH = 4.8 was measured. According to the data obtained, the long-term use of copper-containing pesticides led to the accumulation of mobile copper in the upper soil layer under the roses, the average content of which in the soils of the rose gardens was 5.2 ± 3.1 , which is higher than the MAC of 3 mg/kg. Under other flower crops and under tree plantations, the average content of mobile copper was an order of magnitude less - 0.44 ± 0.25 mg / kg, and acid-soluble - 5 times less. Under all flower crops, zinc accumulated, the average content of mobile and acid-soluble fractions of which was almost twice as high as under tree species, but significantly lower than the MAC. A slight excess of the MAC for lead was revealed only in one area under woody plants. Among other elements, no significant differences in their content under floral and woody plants were revealed, and their maximum concentrations were significantly lower than the MAC, which allows us to consider Cu (except for rose gardens), Zn, Mn, Ni, and Co not as heavy metals, but as trace elements necessary for the normal functioning of living organisms.

Key words: copper; zinc; manganese; nickel; cobalt; lead; cadmium; acid-soluble form; mobile form