

УДК 631.423.1

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД КАК БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ИНДИКАТОРОВ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЧЕРНОЗЕМАХ МИГРАЦИОННО-СЕГРЕГАЦИОННЫХ ПИТОМНИКОВ БОТАНИЧЕСКОГО САДА ЮЖНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА¹

© 2024 г. В. А. Корбань^{а, *}, Н. В. Сальник^а, С. Н. Горбов^а, С. С. Тагивердиев^а,
П. Н. Скрипников^а, О. С. Безуглова^а, Е. О. Гудзенко^а

^аАкадемия биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского Южного федерального университета,
пр-кт Стачки, д. 194/1, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

*E-mail: vickaivolgina@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.11.2022 г.

После доработки 03.05.2023 г.

Принята к публикации 10.10.2023 г.

В статье приводятся данные о накоплении тяжелых металлов в черноземе обыкновенном карбонатном, а также в листьях и хвое отдельных древесных видов растений: тополя белого (*Populus alba* L.) и клена ясенелистного (*Acer negundo* L.), сосны крымской (*Pinus pallasiana* D. Don) и ели европейской (*Picea abies* (L.) N. Karst.), произрастающих на территории питомника лиственных и хвойных деревьев Ботанического сада ЮФУ. Рассчитанные значения коэффициентов концентрации (Кс) для почвы под лиственными и хвойными породами деревьев свидетельствуют о низком уровне загрязнения почвы. Как лиственные, так и хвойные породы проявляют барьерный механизм поступления тяжелых металлов, характеризующийся избирательностью по отношению к химическим элементам, что показано через коэффициенты биологического поглощения тяжелых металлов. По интенсивности накопления тяжелых металлы в лиственных породах можно расположить в следующий ряд: Zn > Pb > Cu; в хвойных породах фиксируется последовательность: Zn ≈ Cu > Pb. В накоплении металлов лиственными деревьями более значимо участие листовой поверхности, отсюда инверсия свинца и меди в ряду накопления металлов лиственными породами, так как перенос частичек свинца происходит воздушным путем и часть его оседает на листьях.

Ключевые слова: почва, тяжелые металлы, лиственные и хвойные деревья.

DOI: 10.31857/S0024114824010076, EDN: SLNGCV

Для оценки состояния окружающей среды лучшими фитохимическими индикаторами выступают древесные формы растений. Их ассимилирующие органы весьма чувствительны к условиям произрастания и в случае негативного влияния поллютантов могут претерпевать анатомические и морфологические изменения. Одними из таких поллютантов выступают тяжелые металлы.

Некоторые элементы, такие как никель, цинк, медь и марганец, являются важными микроэлементами, участвующими в жизненном цикле растений. Однако чрезмерное накопление этих элементов вызывает токсические эффекты, отрицательно

влияя на процессы фотосинтеза, рост растений и ферментативную активность.

Изучение и оценка накопления тяжелых металлов ассимилирующими органами в последнее время весьма актуальны и имеют несколько практических моментов. Во-первых, растения играют роль промежуточного звена в циклах миграции элементов между воздухом, почвой и водой, являясь биогеохимическим индикатором состояния окружающей среды. Во-вторых, на основе химического состава ассимилирующих органов можно диагностировать состояние лесного фитоценоза, плодородие почв, выявить дефицит или токсичность элементов для растения. И третий аспект — знание особенностей транслокации и аккумуляции тяжелых металлов определенными породами деревьев — позволяет подобрать необходимый вид

¹Исследование выполнено в рамках программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета (“Приоритет 2030”).

и породу с целью освоения территорий, подвергшихся техногенному загрязнению.

Накопление и перенос ионов тяжелых металлов в растениях зависит как от почвенных параметров (рН, наличие органического вещества, емкости катионного обмена), так и от структуры дерева — количества лигнина и целлюлозы (Mieczek et al., 2009), способности побега образовывать органоиды хранения и компартментализации иона металла в определенных частях ассимилирующих органов (Oklo, 2013). Так, тенденция к более активному накоплению тяжелых металлов корнями ели из загрязненной почвы по сравнению с тополем была выявлена М.Ж. Boyter с соавторами (Boyter et al., 2008).

В процессе роста дерева и его сезонных изменений происходит перемещение ионов тяжелых металлов от корней к листьям (Takenaka et al., 2009). Однако не все металлы способны переноситься от корня к побегам, в исследовании I.D. Pulford с соавторами (Pulford et al., 2001) доказано, что хром плохо переносится к побегам древесной растительности, а концентрация свинца в листьях составляет всего 30% от общей концентрации в корнях. В работе Y. Сао с соавторами (Сао et al., 2019) при рассмотрении корней и стеблей ивы цельнолистной (*Salix S. Integra*) методом микрорентгеновского флуоресцентного анализа (μ -XRF) установлено, что в основном медь концентрируется в корнях вследствие большего связывания с соединениями клеточной стенки.

Рядом авторов отмечено более высокое содержание химических элементов в лиственных породах по сравнению с хвойными (Гирс, 1998; Волкова, 2001). Это связано, прежде всего, с большой площадью листовой пластинки и степенью покрытия воском. В свою очередь, такие хвойные породы, как сосна обыкновенная (*Pinus silvestris* L.), обладают хорошей газопоглотительной способностью, утолщенной кожицей и малым количеством устьиц, препятствующих выносу поглощенных элементов с поверхности хвоинок, таким образом, аккумулируя поллютанты в течение нескольких лет (Бородина, 2016). При этом фильтрующая способность хвойных пород определяется не только количеством хвои и ее размером, но и возрастными характеристиками самого дерева (Петров, 1986).

Побочным “продуктом” промышленной активности и индустриализации является загрязнение окружающей среды, в частности почвы, тяжелыми металлами. В связи с этим проблема ремедиации почвы приобретает глобальный характер. Наиболее рентабельными и эстетичными способами ремедиации являются фитоэкстракция и фитостабилизация (Mieczek et al., 2010). Как правило, для эффективной фитоэкстракции важные растения со значительной биомассой. Существенных успехов в исследовании фиторемедиации почв позволило добиться применение метода микрорентгеновского

флуоресцентного анализа. При исследовании тканей растений рапса (*Brassica napus* L.) и овсяницы тростниковой (*Festuca arundinacea*) обнаружено, что рапс перемещает свинец эффективнее, чем овсяница тростниковая, которая задерживает в корнях данный металл (Мега, 2019).

Транслокационный путь тяжелых металлов из почвы в растения представляет собой сложный процесс, включающий в себя влияние гранулометрического состава и типа почвы, а также вида, породы и возраста растения (Корельская, Попова, 2012). В последнее время начинают применяться высокотехнологичные методы исследования (рентгено-флуоресцентный метод, метод рентгеновской дифракции, рентгеновская спектроскопия поглощения и др.), позволяющие оценить механизмы взаимодействия тяжелых металлов с почвенными компонентами на молекулярном уровне (Минкина, 2016; Цицуашвили, Минкина, 2021). Тем не менее для выбора потенциальных кандидатов к ремедиации актуальными параметрами являются коэффициенты биологического поглощения и биотранслокации (MacFarlane et al., 2007), позволяющие оценить параметры растений, в том числе и их разновидности.

Поэтому основная цель работы — оценить степень накопления тяжелых металлов (Zn, Pb, Cu) ассимиляционными тканями, а именно листьями древесной растительности, произрастающей на водораздельной территории р. Темерник Ростовской агломерации для оценки как биогеохимической функции хвойных и лиственных пород, так и мониторинга с учетом природной и техногенной специфики региона.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Объектами исследования являлись естественные почвы городской территории, а также хвойные и лиственные деревья, произрастающие на водораздельной территории р. Темерник в границах Ботанического сада ЮФУ (рис.). Ботанический сад Южного федерального университета имеет федеральный статус охраны (особо охраняемые природные территории (ООПТ)) и является первым ботаническим садом на огромной территории безлесной зоны юга России. В питомнике Ботанического сада ЮФУ произрастают чистая посадка ели европейской и чистая посадка сосны крымской (табл. 1). Флористический состав остальных ярусов практически идентичен и включает в себя 28 видов травянистых растений, кустарников и лиан из 19 семейств. В травостое преобладает представитель кустарниково-лесной растительности — фиалка душистая (*Viola odorata* L.).

Исследуемые почвы идентифицированы как черноземы обыкновенные карбонатные по классификации почв СССР (Егоров и др.,

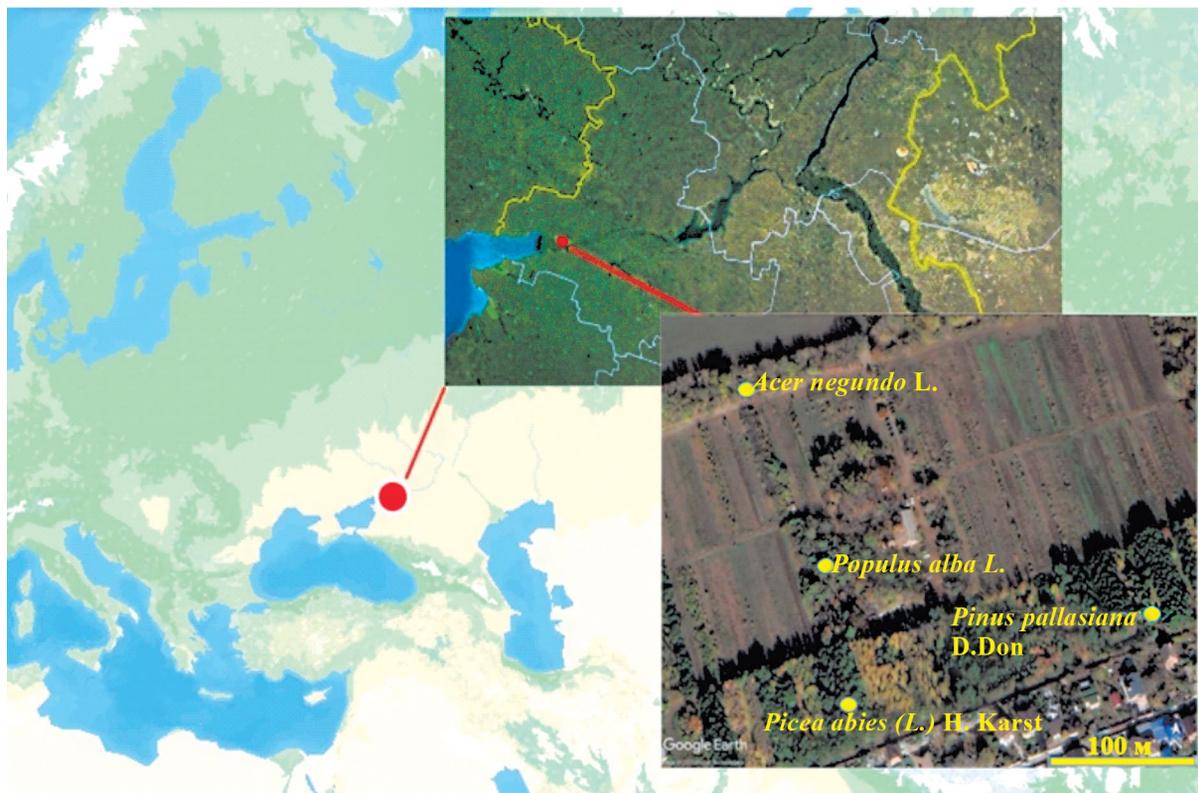


Рис. Карта расположения площадок мониторинга.

1977), или черноземы миграционно-сегрегационные, согласно Классификации и диагностике почв России (Шишов и др., 2004). Согласно мировой реферативной базе почвенных ресурсов (WRB, 2022) они могут быть отнесены к *Hapllic Chernozem*. На мониторинговых площадках были заложены полнопрофильные почвенные разрезы под древесной растительностью. Образцы почвы отбирали из всех генетических горизонтов почвенного профиля. Дополнительно был произведен отбор поверхностных проб из десятисантиметрового слоя (горизонт A1) в десятикратной повторности для проведения статистического анализа данных.

Содержание органического углерода определяли методом Тюрина (Тюрин, 1937) с колориметрическим окончанием по Орлову-Гриндель. Анализ содержания неорганического углерода, входящего в состав карбонатов, проводили объемным методом на приборе Шейблера. pH почвы определяли потенциометрическим методом в соответствии с ГОСТ 26423-85 на анализаторе жидкости — pH-метре (иономере) “Эксперт-001” с комбинированным измерительным pH-электродом (ГОСТ 26423-85).

Для изучения загрязнения химическими элементами было выбрано по 10 экземпляров лиственных (тополя белого, клена ясенелистного) и по 10 экземпляров хвойных пород (сосны крымской, ели европейской). Накопление тяжелых металлов

в листьях определяли осенью, в период массового опадения листьев и хвои. Пробы хвои и листьев были высушены до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре. Почва, высушенная до воздушно-сухого состояния и перетертая в агатовой ступке, просеивалась через сито с диаметром отверстий 0.25 мм (специальная пробоподготовка) (Аринушкина, 1970).

Концентрацию подвижных форм тяжелых металлов (Zn, Pb, Cu) в растениях определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии на приборе МГА-915 в соответствии с методикой сухого озоления с последующим добавлением разбавленной азотной кислоты (1 : 1) (Методические указания..., 1993). Определение валового содержания тяжелых металлов в почве проводили рентгенофлуоресцентным методом на приборе “Spectroscan MAKS-GV”.

Математическую обработку данных осуществляли с помощью общепринятых методов вариационной статистики с использованием пакета программ Microsoft Excel. Математическая обработка данных производилась в программе Statistica 13.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На поведение тяжелых металлов в почве оказывают влияние различные почвенные характеристики, преобладающими из которых являются

Таблица 1. Характеристика мониторинговых площадок Ботанического сада Южного федерального университета

Название участка	Координаты	Возраст лесонасаждения	Сомкнутость кроны, %
Питомник ели европейской (<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst)	N47.232851° E39.645382°	60–65 лет	30
Питомник сосны крымской (<i>Pinus pallasiana</i> D. Don)	N47.233300° E39.648200°	70–75 лет	20
Древесные насаждения тополя белого (<i>Populus alba</i> L.)	N47.233720° E39.645278°	15 лет	20
Древесные насаждения клена ясенелистного (<i>Acer negundo</i> L.)	N47.234900° E39.644506°	60–65 лет	70

гранулометрический и минералогический состав, рН почвенного раствора и содержание органического вещества.

Содержание неорганического углерода, входящего в состав карбонатов, в контрольных поверхностных горизонтах под кленами и тополями не превышает 0.1%, в среднем под тополями — 0.06%, а под кленами — 0.07%. На площадке мониторинга под соснами содержание неорганического углерода немного выше и составляет 0.1%, а в черноземе миграционно-сегрегационном под елями — 0.21%. В целом можно сделать вывод о незначительном влиянии находящихся в почве карбонатов на реакцию среды поверхностного слоя почвы, что подтверждается значениями рН почвенных суспензий 7.0–7.2.

Несмотря на то, что точки мониторинга располагаются в незначительном удалении друг от друга, продолжительное функционирование несвойственных степной зоне растительных ассоциаций успело оказать существенное влияние на накопление и распределение органического вещества в поверхностном гумусово-аккумулятивном горизонте изученных почв. В случае почвы под соснами и елями наблюдается пик накопления гумуса в поверхностном дерновом горизонте. Среднее содержание органического углерода в поверхностном дерновом горизонте для двух площадок (10 поверхностных точек) составляет $3.47 \pm 0.50\%$ ($5.99 \pm 0.86\%$ гумуса). Это может быть обусловлено тем, что, во-первых, закладка данной части питомника была на месте старозалежных территорий, во-вторых, на начальных этапах

функционирования незагущенные хвойные насаждения на протяжении длительного времени (не менее 25 лет) обеспечивали оптимальные условия для развития травянистой растительности. Небольшая сомкнутость кроны, которая гарантировала поступление солнечного света в достаточном количестве, но при этом предохраняла травянистый покров от летнего выгорания и позволяла нижнему ярусу вегетировать на протяжении всего сезона без летних пауз в сравнении с естественными степными фитоценозами (Горбов, Безуглова, 2014). Как следствие, на водораздельной территории, где обыкновенно рано наступает летний перерыв в вегетации степной растительности и происходит так называемое “выгорание степи”, сформировались неестественные для данной местности биоценозы, включающие одновременно травянистые, кустарниковые и древесные ярусы, которые совокупно являются потенциальным источником большего поступления свежего органического материала. Одновременно черноземы под тополем белым характеризуются низким содержанием органического углерода — $1.77 \pm 0.08\%$ ($3.06 \pm 0.15\%$ гумуса), результаты представлены в табл. 2. Незначительные величины почвенного органического вещества объясняются выпханностью чернозема, т.к. молодая посадка тополя расположена на участке, который на протяжении длительного времени был подвержен активной вспашке и вовлечению в сельскохозяйственный оборот, как следствие, здесь происходили процессы дегумификации. На черноземах под кленом ясенелистным доля органического углерода занимает промежуточное

Таблица 2. Содержание гумуса, органического и неорганического углерода в горизонте А1 чернозема миграционно-сегрегационного под деревьями

Вид дерева	Гумус, %	С орг, %	С неорг, %
<i>Populus alba</i> L.	3.06 ± 0.15	1.77 ± 0.08	0.06
<i>Acer negundo</i> L.	4.44 ± 0.71	2.57 ± 0.41	0.07
<i>P. Pallasiana</i> D. Don	6.13 ± 0.99	3.56 ± 0.57	0.10
<i>Picea abies</i>	5.83 ± 0.72	3.39 ± 0.42	0.21

Таблица 3. Микроэлементный состав чернозема миграционно-сегрегационного под лиственными и хвойными насаждениями питомников Ботанического сада Ростова-на-Дону

Горизонт	Глубина отбора	Микроэлементный состав, мг/кг (ppm)		
		Cu	Zn	Pb
ОДК (СанПиН 1.2.3685–21)		132	220	130
Фон (Содержание микроэлементов..., 1962)		30	65	20
Чернозем миграционно-сегрегационный, Calcic Chernozem, питомник сосны (<i>P. Pallasiana</i> D. Don)				
A1	0–8	41.94 ± 3.57	127.09 ± 2.91	47.40 ± 3.55
A2	8–60 (20–30)	37.89 ± 3.50	91.36 ± 3.10	30.02 ± 3.36
A2	8–60 (40–50)	33.57 ± 3.48	84.88 ± 2.90	16.30 ± 3.30
B1	60–90	39.30 ± 3.44	86.47 ± 3.11	11.39 ± 2.22
B2	90–110	40.65 ± 3.52	80.76 ± 3.04	13.16 ± 2.36
BC са	110–150	41.64 ± 3.54	82.27 ± 3.10	22.36 ± 3.27
C са	150–160/дно	41.16 ± 3.56	73.95 ± 2.85	20.65 ± 3.44
Чернозем миграционно-сегрегационный, Calcic Chernozem, питомник еловый (<i>Picea abies</i>)				
A1	0–10	43.55 ± 3.44	101.89 ± 2.44	44.68 ± 2.97
A2	10–30	38.63 ± 3.57	75.64 ± 2.76	44.19 ± 2.88
A3	30–50	39.08 ± 3.21	68.35 ± 3.09	34.86 ± 2.55
B1	50–70	39.21 ± 3.10	68.41 ± 3.06	26.98 ± 2.99
B2	70–95	43.51 ± 3.16	69.21 ± 3.18	31.49 ± 3.10
BC са	95–110	47.68 ± 3.13	69.08 ± 3.17	32.17 ± 3.11
C са	110–140/дно	39.12 ± 3.22	68.50 ± 2.88	23.91 ± 3.17
Чернозем миграционно-сегрегационный, Calcic Chernozem, древесные насаждения тополя белого (<i>Populus alba</i> L.)				
A1	0–10	48.66 ± 3.12	96.64 ± 3.21	38.52 ± 2.95
A2	10–30	38.63 ± 3.15	75.64 ± 2.89	44.19 ± 3.09
A3	30–50	39.08 ± 3.17	68.35 ± 3.11	34.86 ± 3.15
B1	50–70	39.21 ± 3.07	68.41 ± 3.45	26.98 ± 2.89
B2	70–95	43.51 ± 3.11	69.21 ± 3.21	31.49 ± 3.08
BC са	95–110	47.68 ± 2.99	69.08 ± 3.71	32.17 ± 3.17
C са	110–140/дно	39.12 ± 3.03	68.50 ± 3.09	23.91 ± 2.87
Чернозем миграционно-сегрегационный, Calcic Chernozem, древесные насаждения клена ясенелистного (<i>Acer negundo</i> L.)				
A1	0–15	49.37 ± 3.15	107.47 ± 3.10	40.11 ± 2.86
A2	15–55	58.04 ± 3.29	90.82 ± 2.48	24.41 ± 2.49
B1	55–75	65.12 ± 3.41	89.91 ± 3.19	22.35 ± 2.11
B2	75–100	61.29 ± 3.34	76.85 ± 3.28	15.25 ± 3.01
BC са	100–120	59.54 ± 3.19	77.26 ± 3.11	21.85 ± 3.03
C са	120–130/дно	63.10 ± 3.27	76.69 ± 3.10	24.83 ± 2.98

положение и составляет $2.57 \pm 0.41\%$ ($4.44 \pm 0.71\%$ гумуса).

Следует отметить, что присутствие гуминовых кислот способствует адсорбции и, как следствие, потенциальному удержанию тяжелых металлов в ППК и их накоплению в почве (Кузнецова и др., 2013). Однако обменная физико-химическая сорбционная способность черноземов допускает частичное поступление тяжелых металлов в древесные растения, главным образом, через корневую систему. В связи с тем, что глубина залегания питающих корней деревьев является различной, валовое содержание тяжелых металлов в каждом

горизонте усреднялось и концентрация рассчитывалась для всего корнеобитаемого слоя в целом.

По данным отечественных исследований, корневая система тополя белого имеет преимущественно поверхностное развитие в верхних горизонтах почвы на глубине 15–25 см (Редько, 1975), при этом длина корней достигает 20–50 м. Для клена ясенелистного свойственна аналогичная корневая система (глубина залегания 0–40 см), хотя отдельные корни могут достигать глубины 2–4 м (Чибрик и др., 1982).

Для хвойных пород (ель европейская, сосна крымская) характерен интенсивный рост в первые

Таблица 4. Валовое содержание химических элементов в черноземе миграционно-сегрегационном под древесными растениями и коэффициенты концентраций металлов в корнеобитаемой толще

Элемент	Среднее содержание химических элементов в почве под древесными растениями, мг/кг								ОДК/ Фон
	<i>Populus alba</i> L.	Кс	<i>Acer negundo</i> L.	Кс	<i>P. Pallasiana</i> D. Don	Кс	<i>Picea abies</i>	Кс	
Zn	73.69	0.98	86.50	1.15	89.54	1.19	74.44	0.99	220/65
Cu	42.27	0.77	59.41	1.08	39.45	0.72	41.54	0.76	132/30
Pb	33.16	1.33	24.80	0.99	23.04	0.92	34.04	1.36	130/20

годы жизни. К 30 гг. после достижения максимального размера и предельной глубины происходит количественное увеличение поверхностных отростков (глубина залегания 30–60 см) (Сероглазова, 1978; Праходский и др., 1992). Среднее содержание изученных микроэлементов для корнеобитаемого слоя под каждым видом древесных растений рассчитывали с помощью средневзвешенных данных по всему почвенному профилю (табл. 3).

Оценку индикаторных свойств лиственных и хвойных пород деревьев проводили на основании содержания актуальных поллютантов: Zn, Pb, Cu. Для оценки загрязнения использовались показатели: ориентировочно допустимая концентрация (ОДК) и коэффициент концентрации химического элемента (Кс), определяющийся отношением его реального содержания в почве к фоновому. За фоновые значения принимаются данные результатов исследования, проведенного В.В. Акимцевым с соавторами на территории сельхозугодий юго-запада Ростовской области в 1962 году (Акимцев и др., 1962).

Для оценки степени доступности элемента в системе “почва–растение” был рассчитан коэффициент биологического поглощения (КБП) как отношение содержания химического элемента в надземной части растения к общему содержанию элемента в почве.

В результате анализа содержания валовых количеств тяжелых металлов в почве под деревьями выявлено превышение фоновых значений меди, цинка и свинца, что свидетельствует о накоплении этих металлов в почвах (табл. 4). Тем не менее рассчитанные значения коэффициентов Кс показывают, что уровень загрязнения данными металлами является допустимым.

Результаты определения содержания тяжелых металлов в листьях деревьев представлены в табл. 5.

Тяжелые металлы могут поступать в древесные формы растений как с аэральным потоком, так и с корневым поглощением почвенных растворов. Сравнительный анализ хвойных и лиственных пород показывает более высокое содержание тяжелых металлов в лиственных породах, что подтверждается и в работах других авторов (Ташекова, Торопов, 2017; Коротченко, Мучкина, 2017, 2018). Оценивая полученные данные, можно заключить, что в условиях

парково-рекреационной зоны Ростова-на-Дону содержание изученных поллютантов является допустимым для лиственных пород как для тополя белого и клена ясенелистного, так и для сосны крымской и ели европейской. Коэффициенты биологического поглощения листьями деревьев в отношении свинца ниже 1, что, вероятно, связано, с одной стороны, с барьерным механизмом изученных видов деревьев, с другой — с отсутствием существенных валовых концентраций свинца в парково-рекреационных зонах Ростова-на-Дону.

Повышенное биопоглощение цинка в породах тополя белого и клена ясенелистного обусловлено биофильностью данного элемента и безбарьерным характером его поглощения. Накопление цинка и меди в листьях деревьев рода тополя белого, а также клена ясенелистного было отмечено также Л.В. Аниловой с соавторами и Д.М. Турлибековой (Анилова и др., 2013; Турлибекова, 2014). Для сосны крымской и ели европейской накопление цинка в ассимилирующих органах не наблюдается, несмотря на возрастные характеристики деревьев. Данная особенность, вероятно, обусловлена площадью хвоинок. В ряде публикаций исследовано влияние техногенных нагрузок на содержание тяжелых металлов в хвое сосен и елей, однако авторами отмечается неясность с механизмом поступления и накопления цинка (Шербенко, 2008; Меншиков и др., 2020). Поглощение меди и свинца для данных пород хвойных деревьев оценивается как низкое.

По интенсивности накопления тяжелые металлы в лиственных породах можно расположить в следующий ряд: Zn > Pb > Cu; в хвойных породах, в свою очередь, фиксируется последовательность: Zn ≈ Cu > Pb. Вероятно, что повышенное содержание почвенного органического углерода под хвойными растениями способствует удержанию большей части тяжелых металлов в почвенном поглощающем комплексе и на фоне барьерности самих растений препятствует транслокации поллютантов в проводящие системы сосны крымской и ели европейской.

В целом валовое количество тяжелых металлов в черноземах как под лиственными, так и под хвойными породами убывает в ряду: Zn > Cu > Pb. В накоплении металлов тополем белым, а также кленом

Таблица 5. Среднее содержание химических элементов в листьях и хвое изученных древесных видов Ботанического сада ЮФУ Ростова-на-Дону

Химический элемент	Концентрация ТМ в тканях листьев достаточное/избыточное (Kabata-Pendias, 2011)	Содержание химических элементов, мг/кг Коэффициент биологического поглощения (КБП)			
		<i>Populus alba</i> L.	<i>Acer negundo</i> L.	<i>P. Pallasiana</i> D. Don	<i>Picea abies</i>
Zn	27–150	30.70	20.74	1.93	1.67
	100–400	0.28	0.18	0.02	0.02
Cu	5–30	2.77	2.53	1.82	1.70
	70–100	0.02	0.02	0.04	0.04
Pb	5–10	5.15	5.64	0.96	0.84
	30–300	0.05	0.04	0.02	0.02

ясенелистным более значимо участие самой листовой поверхности, отсюда инверсия свинца и меди в ряду накопления металлов листовыми породами, так как перенос частичек свинца происходит воздушным путем и большая часть его оседает на листьях, минуя прямое попадание в почву.

ВЫВОДЫ

Почвы питомника хвойных и лиственных деревьев представлены черноземами миграционно-сегрегационными, занимающими водораздельную часть Ботанического сада ЮФУ, как следствие, эдафические характеристики для всех точек мониторинга сопоставимы по химическому составу, который отражает частично антропогенно-трансформированный геохимический фон ландшафта в целом.

Несмотря на общность изученных физико-химических показателей почв, основным отличительным показателем выступает содержание почвенного органического вещества на отдельных площадках мониторинга, что сопряжено с различиями в функциональном использовании участков питомника на исторических этапах его функционирования. Относительно высокое содержание гумуса в поверхностных гумусово-аккумулятивных горизонтах черноземов под хвойными породами (около 6%) может являться причиной более интенсивной сорбции поллютантов почвенным поглощающим комплексом и в совокупности с барьерными механизмами у высших споровых — причиной низкой транслокации цинка и свинца в проводящие системы сосны крымской и ели европейской.

Лиственные породы деревьев так же, как и хвойные, используют защитный механизм от избыточного поступления в ткани поллютантов, но интенсивность накопления тяжелых металлов в листовых породах имеет иной ряд: Zn > Pb > Cu. Однако возникающая избирательность к поглощению определенных химических элементов требует более масштабных исследований.

Для парково-рекреационных зон водораздельной части Ростова-на-Дону в качестве объектов

фитоиндикации более информативными могут считаться тополь белый, а также клен ясенелистный, поскольку накопление тяжелых металлов в зеленой массе данных пород значительно выше и сопряжено не только с транслокацией поллютантов из почвы, но и с физическим накоплением пыли непосредственно на самой листовой пластине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анилова Л.В., Примаков О.В., Васильева Т.Н. Аккумуляция тяжелых металлов растениями — типичными представителями флоры г. Оренбурга // Известия ОГАУ. 2013. № 2 (40). С. 223–225.
- Ариунушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. С. 488.
- Бородин Н.А. Влияние техногенной нагрузки на содержание тяжелых металлов в хвое сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.): Мат-лы 4-й Всероссийской научной конференции. Благовещенск: Институт геологии и природопользования ДВО РАН, 2016. С. 5–8.
- Волкова И.Ю. Микроэлементарный состав подроста и подлеска елово-пихтовых лесов Республики Марий Эл: дис. канд. биол. наук: 03.00.32. Йошкар-Ола, 2001. С. 112.
- Гирс Г.И. Содержание азота и зольных элементов в органах древесных растений России. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 1998. С. 76.
- Горбов С.Н., Безуглова О.С. Специфика органического вещества почв Ростова-на-Дону // Почвоведение. 2014. № 8. С. 1–11.
- ГОСТ 26423–85 Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. М.: Стандартинформ, 2011.
<https://docs.cntd.ru/document/1200023484>
- Егоров В.В., Иванова Е.Н., Розов Н.Н., Фридрих В.М. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. С. 221.
- Корельская Т.А., Попова Л.Ф. Тяжелые металлы в почвенно-растительном покрове селибного ландшафта города Архангельска // Арктика и Север. 2012. № 7. С. 1–17.
- 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.

- Коротченко И.С., Мучкина Е.Я. Сравнительная оценка накопления тяжелых металлов листовыми и хвойными породами в условиях техногенного загрязнения: Мат-лы конференции “Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды”. Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2018. С. 1067–1069.
- Кузнецова И.А., Боголицин К.Г., Бойцова Т.А., Паламарчук И.А., Арионов Н.С., Бровко О.С. Сорбционные свойства и модификация торфяных гуминовых кислот // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. 2013. № 1. С. 37–42.
- Менщиков С.Л., Кузьмина Н.А., Мохначев П.Е. Аккумуляция металлов в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), в почве и снеговой воде в условиях техногенного загрязнения // Лесной вестник. 2020. Т. 24. № 3. С. 94–102. Методические указания по определению тяжелых металлов в кормах и растениях и их подвижных соединений в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1993. 62 с.
- Минкина Т.М., Солдатов А.В., Невидомская Д.Г., Мотузова Г.В., Подковырина Ю.С., Манджиева С.С. Новые подходы в изучении соединений тяжелых металлов в почвах с применением рентгеноспектрального анализа и экстракционного фракционирования // Геохимия. 2016. № 2. С. 212–219.
- Петров В.В. Лес и его жизнь. М.: Просвещение, 1986. С. 159.
- Праходский А.Н., Рудевич М.Н., Рудевич Н.Н. Корневые системы деревьев в противозерозионных насаждениях на террасах // Лесоведение и лесное хозяйство: республиканский межведомственный сб. науч. ст. Минск: Вышэйшая школа, 1992. С. 109–112.
- Редько Г.И. Биология и культура тополей. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1975. 175 с.
- Сероглазова Л.М. Корневые системы псевдотсуги тиссолистной и серой, лиственницы сибирской и ели обыкновенной в лесных культурах // Лесоведение и лесное хозяйство: республиканский межведомственный сборник. Минск: Вышэйшая школа, 1978. С. 47–50.
- Содержание микроэлементов в почвах Ростовской области // Микроэлементы и естественная радиоактивность почв: Мат-лы 3-го межвузовского совещания / Под ред. В.В. Акимцева. Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 1961. С. 38–41.
- Ташекова А.Ж., Торопов А.С. Использование листьев растений как биогеохимических индикаторов состояния городской среды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. № 328 (5). С. 114–124.
- Турлибекова Д.М. Содержание тяжелых металлов у *Acer negundo* в условиях промышленного загрязнения города Орска // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 6 (167). С. 148–149.
- Тюрин И.В. Органическое вещество почв. М.: Сельхозгиз, 1937. 287 с.
- Цицаушвили В.С., Минкина Т.М. Синхротронное излучение для исследования трансформации токсичных элементов в системе “почва–растение” (обзор) // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. № 8. С. 41–50.
- Чибрик Т.С., Карташева Г.Г., Саламатова Н.А. Оценка опыта биологической рекультивации верхних уступов Коркинского угольного разреза // Растения и промышленная среда. Свердловск: УрГУ, 1982. № 9. С. 18–32.
- Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. С. 342.
- Щербенко Т.А. Поглощение элементов сосной и елью в лесных экосистемах северной тайги в условиях атмосферного загрязнения: дис. канд. биол. наук: 03.00.27. М.: МГУ, 2008. 89 с.
- Boyer M.J., Brummer J.E., Leininger W.C. Growth and metal accumulation of geyer and mountain willow grown in topsoil versus amended mine tailings // Water, Air, Soil Pollut. 2009. V. 198. P. 17–29.
- Cao Y.N., Ma C.X., Zhang J.F., Wang S.F., White J.C., Chen G.C., Xing B.S. Accumulation and spatial distribution of copper and nutrients in willow as affected by soil flooding: A synchrotron-based X-ray fluorescence study // Environmental Pollution. 2019. V. 246. P. 980–989.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022.
- Kabata-Pendias A. Trace elements in soil and plants. 4-th edition. Boca Raton, 2011. P. 548.
- MacFarlane G.R., Koller C.E., Blomberg, S.P. Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies // Chemosphere. 2007. V. 69. P. 1454–1464.
- Mera M.F., Rubio M., Pérez C.A., Galván V., Germanier A.G. SR μ XRF and XRD study of the spatial distribution and mineralogical composition of Pb and Sb species in weathering crust of corroded bullets of hunting fields // Microchemical Journal. 2015. V. 119. P. 114–122.
- Mleczek M., Magdziak Z., Rissmann I., Golinski P. Effect of different soil conditions on selected heavy metal accumulation by *Salix viminalis* tissues // Journal of Environmental Science and Health. 2009. V. 44. P. 1609–1616.
- Mleczek M., Rutkowski P., Rissmann I., Kaczmarek Z., Golinski P., Szentner K., Stachowiak A. Biomass productivity and phytoremediation potential of *Salix alba* and *Salix viminalis* // Biomass and Bioenergy. 2010. V. 34. P. 1410–1418.
- Oklo D.A. Assessment of Heavy Metals of Tree Barks in Nigeria // Journal of Environment and Bioenergy. 2013. V. 5. P. 80–89.
- Pulford I.D., Watson C., Mcgregor S.D. Uptake of chromium by trees: Prospects for phytoremediation, Environ // Environmental Geochemistry and Health. 2001. P. 307–311.
- Takenaka C., Kobayashi M., Kanaya S. Accumulation of cadmium and zinc in *Evodiopanax innovans* // Environmental Geochemistry and Health. 2009. V. 31. P. 609–615.
- СанПиН 1.2.3685–21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания” (с изменениями на 30 декабря 2022 года) [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115/titles/8P20LR> (дата обращения: 15.11.2022).

Comparative Assessment of Tree Species as Ecosystem Indicator of Heavy Metals Accumulation in Calcic Chernozems on the SFU's Botanical Garden

V. A. Korban¹*, N. V. Sal'nik¹, S. N. Gorbov¹, S. S. Tagiverdiev¹, P. N. Skripnikov¹,
O. S. Bezuglova¹, Ye. O. Gudzenko¹

¹Academy of Biology and Biotechnology,
Stachki ave. 194/1, Rostov-on-Don, 344090 Russian Federation
*E-mail: vickaivolgina@yandex.ru

The article presents data on the accumulation of heavy metals in calcic chernozems, as well as in the leaves and needles of certain woody plant species: white poplar (*Populus alba* L.) and boxelder maple (*Acer negundo* L.), Crimean pine (*Pinus nigra* var. *pallasiana* D. Don) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.), growing on the territory of the deciduous and coniferous trees nursery of the Southern Federal University's Botanical Garden. The calculated values of concentration coefficients (Kc) for soils under deciduous and coniferous trees indicate a low level of soil contamination. Both deciduous and coniferous species exhibit a barrier mechanism for the entry of heavy metals, characterized by selectivity with respect to chemical elements, which is shown through the coefficients of biological absorption of heavy metals. According to the accumulation intensity, heavy metals in deciduous species can be arranged in the following series: Zn > Pb > Cu, while in coniferous species the sequence was found to be Zn ≈ Cu > Pb. In the accumulation of metals by deciduous trees, the participation of the leaf surface is more significant, hence the inversion of lead and copper in the series of metals accumulation by deciduous trees, caused by the of lead particles being airborne and partially collected by the leaves' surface.

Keywords: soil, heavy metals, deciduous and coniferous trees.

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the Strategic Academic Leadership Program of the Southern Federal University ("Priority 2030").

REFERENCES

- Anilova L.V., Primak O.V., Vasil'eva T.N., Akkumulyatsiya tyazhelykh metallov rasteniyami — tipichnymi predstaviteleyami flory g. Orenburga (Accumulation of heavy metals by typical plants representing the flora of Orenburg), *Izvestiya OGAU*, 2013, No. 2 (40), pp. 223–225.
- Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* (Handbook on chemical analysis of soils), Moscow: Izd-vo MGU, 1970, 487 p.
- Borodina N.A., Vliyanie tekhnogennoi nagruzki na sodержanie tyazhelykh metallov v khvoe sosny obyknovЕННОI (*Pinus silvestris* L.) (The influence of anthropogenic load on the content of heavy metals in the needles of Scots pine (*Pinus silvestris* L.)), *4-i Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya* (4th All-Russia Science Conference), Blagoveshchensk, Proc. Conf., Blagoveshchensk: Institut geologii i prirodopol'zovaniya DVO RAN, 2016, pp. 5–8.
- Boyer M.J., Brummer J.E., Leininger W.C., Growth and metal accumulation of geyer and mountain willow grown in topsoil versus amended mine tailings, *Water, Air, Soil Pollut.*, 2009, Vol. 198, pp. 17–29.
- Cao Y.N., Ma C. X., Zhang J.F., Wang S.F., White J.C., Chen G.C., Xing B.S., Accumulation and spatial distribution of copper and nutrients in willow as affected by soil flooding: A synchrotron-based X-ray fluorescence study, *Environmental Pollution*, 2019, Vol. 246, pp. 980–989.
- Chibrik T.S., Kartasheva G.G., Salamatova N.A., Otsenka opyta biologicheskoi rekul'tivatsii verkhnikh ustupov Korkinskogo ugol'nogo razreza (Evaluation of the experience of biological reclamation of the upper ledges of the Korkinsky coal mine), *Rasteniya i promyshlennaya sreda*, 1982, No. 9, pp. 18–32.
- Egorov V.V., Ivanova E.N., Rozov N.N., Fridland V.M. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR (Classification and diagnostics of the soils of USSR)*, Moscow: Kolos, 1977, 224 p.
- Girs G.I., *Soderzhanie azota i zol'nykh elementov v organakh drevesnykh rastenii Rossii* (Content of nitrogen and mineral constituents in the organs of woody plants in Russia), Krasnoyarsk: Institut lesa im. V.N. Sukacheva SO RAN, 1998, 76 p.
- Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Specific features of organic matter in urban soils of Rostov-on-Don, *Eurasian Soil Science*, 2014, Vol. 47, No. 8, pp. 792–800.
- GOST 26423-85 Metody opredeleniya udel'noi elektricheskoi provodimosti, pH i plotnogo ostatka vodnoi vytyazhki*, (Soils. Methods for determination of specific electric conductivity, pH and solid residue of water extract), Moscow: Standartinform, 2011, available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200023484>.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022.
- Kabata-Pendias A., *Trace elements in soil and plants*, Boca Raton, 2011, 548 p.
- Korel'skaya T.A., Popova L.F., Tyazhelye metally v pochvenno-rastitel'nom pokrove selitebnogo landshafta goroda Arkhangel'ska (Heavy metals in the soil-vegetation cover

- of the selitebny landscape of the city Arkhangelsk), *Arktika i Sever*, 2012, No. 7, pp. 1–17.
- Korotchenko I.S., Muchkina E.Y., Sravnitel'naya otsenka nakopleniya tyazhelykh metallov listvennymi i khvoynymi porodami v usloviyakh tekhnogenogo zagryazneniya (Comparative assessment of heavy metals accumulation deciduous and conifers in the conditions of technogenic pollution), *Mekhanizmy ustoychivosti rastenii i mikroorganizmov k neblagopriyatnym usloviyam sredy* (Mechanisms of resistance of plants and microorganisms to unfavorable environmental conditions), Irkutsk, Conf. Proc., Irkutsk: Institut geografii im. V.B. Sochavy SO RAN, 2018, pp. 1067–1069.
- Korotchenko I.S., Muchkina E.Y., Tyazhelye metally v pochvennom pokrove i drevnykh rasteniyakh urbanizirovannoi territorii goroda Krasnoyarska (Heavy metals in the soil cover and woody plants of the urban areas of Krasnoyarsk), *Ekologiya urbanizirovannykh territorii*, 2017, No. 2, pp. 6–11.
- Kuznetsova I.A., Bogolitsin K.G., Boitsova T.A., Palamarchuk I.A., Arionov N.S., Brovko O.S., Sorbtionnyye svoystva i modifikatsiya torfyanykh guminovykh kislot (orption properties and modification of peat humic acids), *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta, Seriya: Estestvennyye nauki*, 2013, No. 1, pp. 37–42.
- MacFarlane G.R., Koller C.E., Blomberg, S.P., Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies, *Chemosphere*, 2007, Vol. 69, pp. 1454–1464.
- Menshchikov S.L., Kuz'mina N.A., Mokhnachev P.E., Akkumulatsiya metallov v khvoe sosny obyknovЕННОЙ (*Pinus sylvestris* L.), v pochve i snegovoi vode v usloviyakh tekhnogenogo zagryazneniya (Accumulation of metals in pine (*Pinus sylvestris* L.) needles, in soil and snow melt water in conditions of technogenic pollution), *Lesnoi vestnik*, 2020, Vol. 24, No. 3, pp. 94–102.
- Mera M.F., Rubio M., Pérez C.A., Galván V., Germanier A.G., SR μ XRF and XRD study of the spatial distribution and mineralogical composition of Pb and Sb species in weathering crust of corroded bullets of hunting fields, *Microchemical Journal*, 2015, Vol. 119, pp. 114–122.
- Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu tyazhelykh metallov v kormakh i rasteniyakh i ikh podvizhnykh soedinenii v pochvakh sel'khozgodii i produktii rastenievodstva* (Guidelines for the determination of heavy metals in feed and plants and their mobile compounds in soils of farmland and crop products), Moscow: TsINAO, 1993, 62 p.
- Minkina T.M., Soldatov A.V., Nevidomskaya D.G., Podkovyrina Y.S., Mandzheva S.S., Motuzova G.V., New approaches to studying heavy metals in soils by X-ray absorption spectroscopy (xanes) and extractive fractionation, *Geochemistry International*, 2016, Vol. 54, No. 2, pp. 197–204.
- Mleczek M., Magdziak Z., Rissmann I., Golinski P., Effect of different soil conditions on selected heavy metal accumulation by *Salix viminalis* tissues, *Journal of Environmental Science and Health*, 2009, Vol. 44, pp. 1609–1616.
- Mleczek M., Rutkowski P., Rissmann I., Kaczmarek Z., Golinski P., Szentner K., Stachowiak A., Biomass productivity and phytoremediation potential of *Salix alba* and *Salix viminalis*, *Biomass and Bioenergy*, 2010, Vol. 34, pp. 1410–1418.
- Oklo D.A., Assessment of Heavy Metals of Tree Barks in Nigeria, *Journal of Environment and Bioenergy*, 2013, Vol. 5, pp. 80–89.
- Petrov V.V., *Les i ego zhizn'* (Forest and its life), Moscow: Prosveshchenie, 1986, 159 p.
- Prakhodskii A.N., Rudevich M.N., Rudevich N.N., Kornevye sistemy derev'ev v protivoozozionnykh nasazhdeniyakh na terrasakh (Root systems of trees in anti-erosion plantings on terraces), In: *Lesovedenie i lesnoe khozyaistvo: respublikanskii mezhdovedomstvennyi sb. nauch. st* (Forest science and forestry: republican interdepartmental collection), Minsk: Vysheishaya shkola, 1992, pp. 109–112.
- Pulford I.D., Watson C., McGregor S.D., Uptake of chromium by trees: Prospects for phytoremediation, *Environmental Geochemistry and Health*, 2001, pp. 307–311.
- Red'ko G.I., *Biologiya i kul'tura topolei* (Biology and plantation of poplars), Leningrad: Izd-vo Leningr. un-ta, 1975, 175 p.
- SanPiN1.2.3685-21, available at: <https://docs.cntd.ru/document/573500115/titles/8P20LR> (November 15, 2022).
- Seroglazova L.M., Kornevye sistemy psevdotsugi tissolistnoi i seroi, listvennitsy sibirskoi i eli obyknovЕННОЙ v lesnykh kul'turakh (Root systems of Douglas fir and Rocky Mountain Douglas-fir, Siberian larch and common spruce in forest plantations), In: *Lesovedenie i lesnoe khozyaistvo: respublikanskii mezhdovedomstvennyi sbornik* (Forest science and forestry: republican interdepartmental collection), Minsk: Vysheishaya shkola, 1978, pp. 47–50.
- Shcherbenko T.A., *Pogloshchenie elementov sosnoi i el'yu v lesnykh ekosistemakh severnoi taigi v usloviyakh atmosfernogo zagryazneniya. Diss. kand. biol. nauk* (Absorption of elements by pine and spruce in forest ecosystems of the northern taiga under conditions of atmospheric pollution. Candidate's biol. sci. thesis), Moscow: MGU, 2008, 89 p.
- Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and recognition of soils in Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.
- Soderzhanie mikroelementov v pochvakh Rostovskoi oblasti (Content of microelements in soils of the Rostov region), *Mikroelementy i estestvennaya radioaktivnost' pochv* (Microelements and natural radioactivity of soils), Rostov-on-Don, Proc. of 3rd interuniversity meeting, Rostov-on-Don: Izd-vo Rost. un-ta, 1961, pp. 38–41.
- Takenaka C., Kobayashi M., Kanaya S., Accumulation of cadmium and zinc in *Evodiopanax innovans*, *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, Vol. 31, pp. 609–615.
- Tashekova A.Z., Toropov A.S., Ispol'zovanie list'ev rastenii kak biogeokhimicheskikh indikatorov sostoyaniya gorodskoi sredy (Application of leaves as biogeoindicators of urban environment state), *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2017, No. 328 (5), pp. 114–124.
- Tsitsuashvili V.S., Minkina T.M., Sinkhrotronnoe izluchenie dlya issledovaniya transformatsii toksichnykh elementov v sisteme "pochva-rastenie" (obzor) (Synchrotron radiation for the study of toxic elements transformation in the soil-plant system (review)), *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnyye i neutronnyye issledovaniya*, 2021, No. 8, pp. 41–50.
- Turlibekova D.M., Soderzhanie tyazhelykh metallov u Acer negundo v usloviyakh promyshlennogo zagryazneniya goroda Orska (The content of heavy metals at Acer negundo growing in parks of the city of Orsk, in the conditions of industrial pollution), *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, No. 6 (167), pp. 148–149.
- Tyurin I.V., *Organicheskoe veshchestvo pochv* (Soil organic matter), Moscow: Sel'khozgiz, 1937, 287 p.
- Volkova I.Y., *Mikroelementarnyi sostav podrosta i podleska elovo-pikhtovykh lesov Respubliki Marii El. Diss. kand. biol. nauk* (Microelemental composition of regrowth and undergrowth of spruce-fir forests of the Republic of Mari El. Candidate's biol. sci. thesis), Yoshkar-Ola: 2001, 112 p.