

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА КАНОНЕРСКОГО ОСТРОВА

М.А. Чукаева¹, А.А. Кошенкова², Н.А. Малыгин³, Д.Д. Борисова⁴, Д.Ф. Анамов⁵

¹⁻⁴ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

⁵ ООО «ЦветМетИнжиниринг», отдел экологического сопровождения проектов

¹ Лаборатория моделирования экологической обстановки; ст. науч. сотр., канд. техн. наук; e-mail: shellx@bk.ru

² Образовательный центр цифровых технологий; инженер; e-mail: koshenkova2000@mail.ru

³ Горный факультет, кафедра геоэкологии; магистрант; e-mail: nik.redapple.malygin@mail.ru

⁴ Горный факультет, кафедра геоэкологии; аспирант; e-mail: dashbo2000@gmail.com

⁵ Инженер первой категории; e-mail: danyar.anamov@yandex.ru

Авторами проведена оценка загрязнения тяжелыми металлами (Cd, Cu, Ni, Pb и Zn) почвенно-растительного покрова Канонерского острова г. Санкт-Петербурга. В ходе рекогносцировки определено, что Западный скоростной диаметр (ЗСД) – значимый источник загрязнения, а территория острова поделена на четыре зоны в соответствии с их функциональным назначением и ветровым режимом: рекреационную, переходную, наветренную и подветренную относительно магистральной дороги. Основными загрязнителями почвенного покрова установлены Pb и Zn с концентрациями, варьирующимися в пределах 5–376 и 16–1131 мг/кг – для подвижных форм, 46–1179 и 64–2903 мг/кг – для валового содержания соответственно. Наибольшая кратность превышения ПДК по подвижным формам металлов установлена для Pb (63 в переходной зоне) и Zn (50 с наветренной стороны ЗСД). Коэффициент суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами составил от 2 до 104 по подвижным формам и от 5 до 55 по валовому содержанию. Максимальные значения установлены в переходной и наветренной зонах, поэтому почвы данных территорий попадают под категорию умеренно загрязненных. Наибольшей подвижностью среди рассмотренных тяжелых металлов на острове обладает Pb (29% – средняя доля его подвижных форм), наименьшей – Ni (4%). При этом их накопление растениями растет в ряду Pb < Cd < Ni < Cu < Zn. Самые высокие значения зафиксированы по Zn и Cu в листьях древесных растений с подветренной стороны ЗСД. По общей оценке состояния почвенно-растительного покрова Канонерского острова выявлена умеренная степень загрязнения почв с локализацией с наветренной стороны ЗСД и частично в переходной зоне.

Ключевые слова: городские почвы, растительный покров, тяжелые металлы, коэффициент контрастности, коэффициент суммарного загрязнения, коэффициент биоаккумуляции

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.13

ВВЕДЕНИЕ

Более чем в 30 городах России уровень загрязнения воздуха был высоким на протяжении трех лет из пяти последних [Характеристики уровня..., 2021], в том числе и в Санкт-Петербурге [Dzhevaga, Borisova, 2021]. Среди всех источников поступления поллютантов в атмосферный воздух около 90% здесь приходится на автотранспорт [Отчет..., 2021]. Высокую опасность в структуре выбросов такого типа имеют тяжелые металлы (элементы с атомной массой > 50, начиная с V) [Водяницкий, 2008; Медведева и др., 2019; Дьячкова, 2020]. Особенно уязвим перед аэрогенным загрязнением почвенно-растительный покров из-за буферных свойств почвы. Аккумуляция тяжелых металлов скапливается на почвенном биоразнообразии, снижает запасы гумуса и способствует их последующему накоплению в тканях растений [Касимов, Власов, 2018; Швец, Сидорова, 2018; Алексеенко и др., 2021].

На фоне растущей антропогенной нагрузки на окружающую среду в России актуален вопрос неравномерной развитости мониторинговых сетей [Коршунов и др., 2022; Опекунова и др., 2023]. Анализ отчетов Комитета по природопользованию за последние пять лет показал, что почвенные исследования не охватывали достаточную площадь Санкт-Петербурга. На обширные территории отдельных районов приходится недостаточное количество станций мониторинга, а некоторые из них в целом не затрагиваются исследованиями [Пашкевич и др., 2020].

Одно из таких «белых пятен» – Канонерский остров, где на одном посту мониторинга атмосферного воздуха ведется контроль по выбросам пыли общей, PM 2.5 и PM 10, H₂S, O₃, SO₂, NO₂ и CO. При этом территория окружена целым рядом объектов антропогенного воздействия: на севере – Центральной станцией аэрации, а на юге и

юго-востоке – портовой территорией (нефтяным, балкерным и контейнерным терминалами) и промышленной зоной, включающей Юго-Западную ТЭЦ, Судомеханический завод и цеха Кировского завода.

Большая часть исследований, проводимых на Канонерском острове ранее, касалась загрязнения прибрежных территорий морским мусором и микропластиком [Шилин и др., 2020; Голубева, Ершова, 2022]. Результаты показали, что степень загрязнения пляжей острова можно считать высокой, а основным источником поступления веществ является Центральная станция аэрации. Также для территории характерно шумовое загрязнение от Западного скоростного диаметра (далее – ЗСД) [Сарапулова, 2020; Дроздов, Лисовский, 2021].

Цель данного исследования – оценка текущего экологического состояния почвенно-растительного покрова Канонерского острова для выявления возможных источников поступления поллютантов.

Для проведения эколого-геохимической оценки острова среди критериев и показателей качества окружающей среды выбраны: коэффициент контрастности, кларк концентрации, коэффициент контрастности по ПДК, суммарный показатель загрязнения (далее – СПЗ) и коэффициент биоаккумуляции. Их комбинация позволяет учитывать среднее содержание загрязняющих веществ в городах и литосфере для оценки аномальности получаемых концентраций, а также делать выводы не только по итоговому загрязнению, но и по специфике накопления тяжелых металлов в растительности. Перечень изучаемых элементов был выбран исходя из геохимических особенностей городских почв. Для них характерно повышенное в сравнении с кларками содержание As, Cd, Cu, Hg, Pb и Zn и др. [Алексеевко, Алексеевко, 2013; Норова и Николаева, 2020; Мосягина и Мысин, 2022]. Наибольший интерес в качестве неспецифических поллютантов представляла группа металлов Cd, Ni и Pb ввиду ряда факторов [Поляк, Сухаревич, 2020]:

- они обладают высоким токсическим воздействием на живые организмы [Егорова, 2018];
- Cd и Pb относятся к группе ксенобиотиков;
- Ni несмотря на то, что является микроэлементом, необходимым для развития живых организмов, относится ко II классу опасности для почв [Хомич и др., 2019].

Предварительный перечень был расширен Cu и Zn, обнаруженными в значительных количествах по результатам разведочного анализа. Таким образом, к итоговому рассмотрению были приняты Cd, Ni, Pb, Cu и Zn.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на основе анализа почвенных и растительных образцов, отобранных на территории Канонерского острова в сентябре 2022 г. Работа выполнена на базе НЦ «Экосистема» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

Полная схема описываемого далее исследования представлена на рис. 1.

Точки опробования устанавливались с учетом природно-климатических условий и рекогносцировки местности, по результатам которой была составлена карта-схема острова, дифференцированная по типам землепользования (рис. 2). Роза ветров, характерная для изучаемой территории, отражает вероятный аэротехногенный перенос загрязняющих веществ по территории острова.

В ходе рекогносцировки было сделано предположение, что эстакада ЗСД – основной источник загрязнения северо-восточной части острова. Исходя из этого, по обе стороны от нее была установлена более частая сеть опробования – по три пробных площадки с подветренной и наветренной стороны с шагом около 100 м. Парковая зона, находящаяся на максимальном удалении от эстакады ЗСД, была выбрана в качестве условно фонового участка.

С учетом видовой идентичности растительности и площади проективного покрытия участков, ограниченной в условиях застройки, практически во всех случаях с каждой пробной площадки отбирались две точечные пробы, из которых затем формировалась объединенная (например, из точечных проб 5' и 5'' была получена объединенная проба 5).

Геохимическое опробование, пробоподготовка и анализ проб почв. Пробы почв отбирались и подготавливались в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017. Отбор точечных проб производился с одного горизонта глубиной 10 см методом «конверта» с площадок 5×5 м. Отобранные пробы высушивались в лаборатории до воздушно-сухого состояния, после чего проводилось их измельчение в ступке, просеивание через сито с диаметром отверстий 1 мм и квартование для получения аналитической пробы.

Определение валовых содержаний и подвижных форм тяжелых металлов проводилось в соответствии с М-МВИ-80-2008. Разложение проб для валового анализа выполнялось в микроволновой системе Multiwave 3000 Anton Paar со смесью соляной, азотной, плавиковой и борной кислот. Подвижные формы извлекались ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH = 4,8 согласно РД 52.18.289-90. Для всех образцов велись две параллельные пробы и холостая с использованием тех же реактивов и материалов.

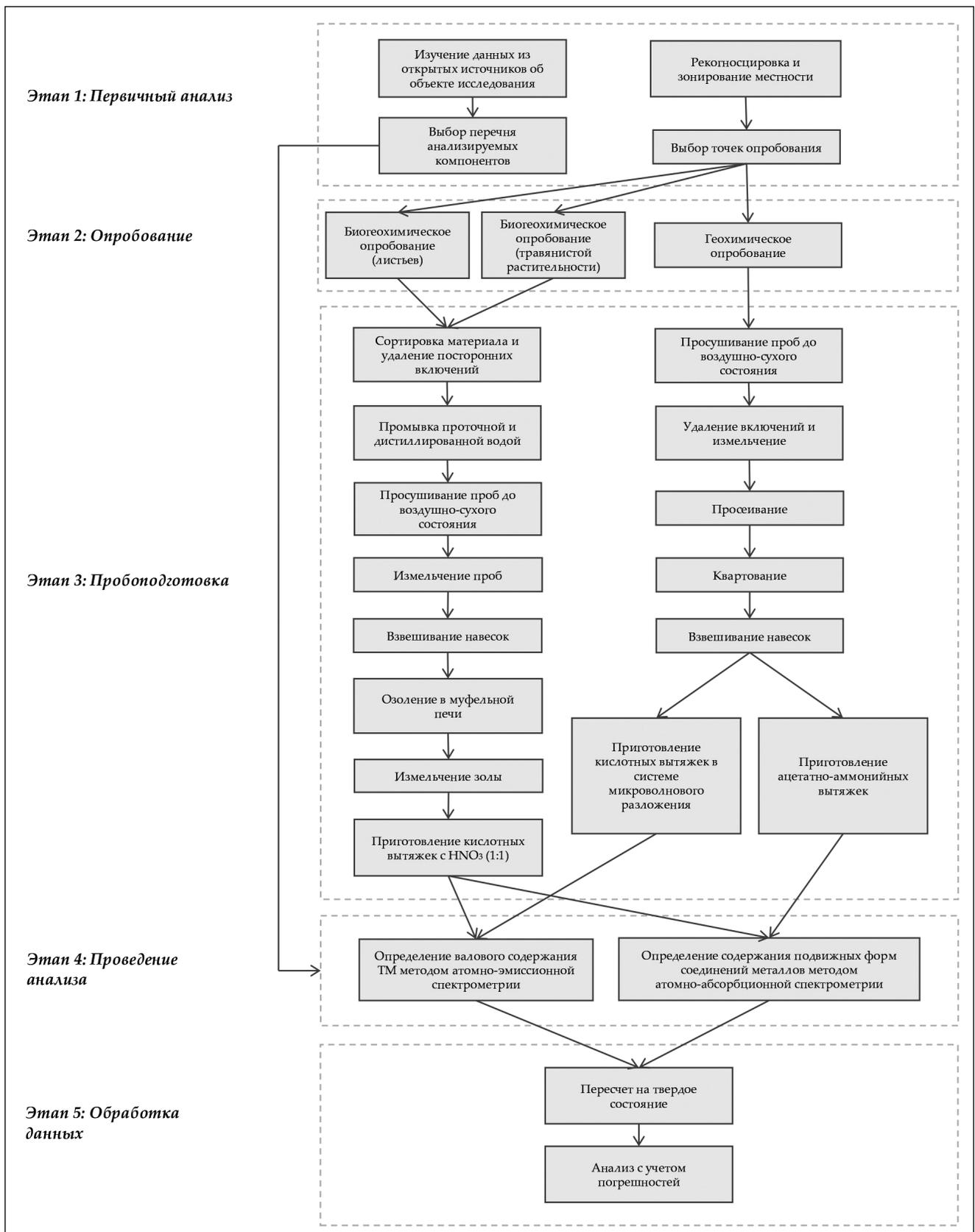


Рис. 1. Схема исследования

Fig. 1. Study flow diagram

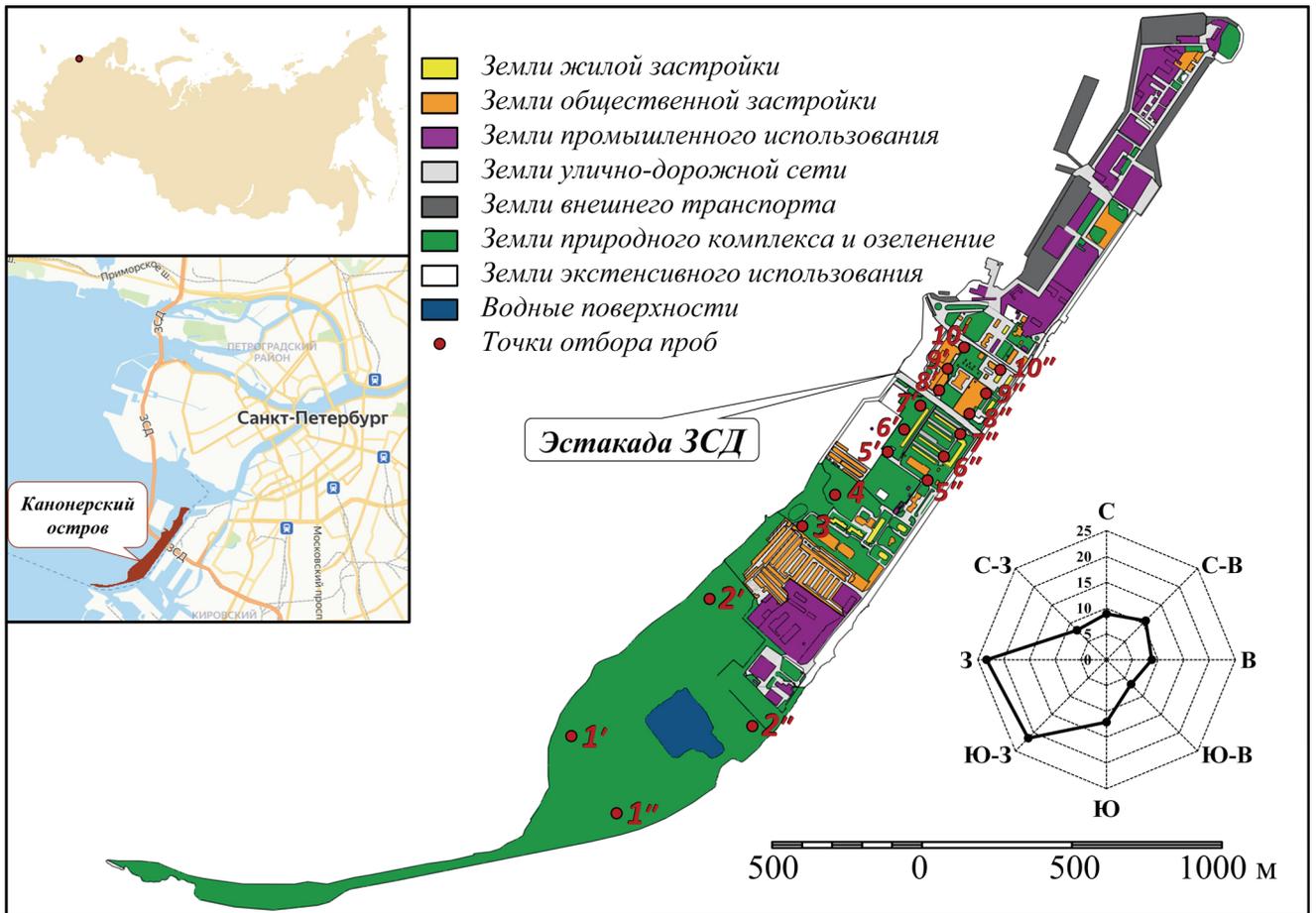


Рис. 2. Карта-схема назначения земель Канонерского острова с отмеченными точками опробования

Fig. 2. Schematic map of land categories on the Kanonersky Island with marked sampling points

Полученные растворы анализировались методом АЭС-ИСП на ICPE-9000 (Shimadzu, Япония) и методом ААС с ЭТА на AA-7000 (Shimadzu, Япония), в зависимости от концентрации определяемого элемента [Качор и др., 2019]. Для каждого элемента строилась градуировочная характеристика (коэффициент корреляции в каждом случае $R \geq 0,998$). В качестве стандартного раствора использовался многоэлементный раствор для ICP SigmaAldrich Merck. Определение влажности почв выполнялось на термогравиметрическом анализаторе TGA 701 (Лесо, США) в соответствии с ГОСТ 28268-89.

Эколого-геохимическая оценка состояния почв осуществлялась путем расчета показателей: коэффициента контрастности (K_c), кларка концентрации (K_k) и коэффициента контрастности по ПДК ($K_{ПДК}$). Они отражают, соответственно, отношение фактического содержания элемента в городских почвах к его среднегородскому содержанию, кларку литосферы и ПДК в соответствии с ГН 2.1.7.2041.

Для интегральной оценки был рассчитан СПЗ по формуле:

$$Z_c = \sum K_{ПДК} - (n - 1),$$

где n – число аномальных элементов.

Степень загрязнения определялась в зависимости от величины Z_c : < 16 – допустимая, $16-32$ – умеренно опасная, $32-128$ – опасная, > 128 – чрезвычайно опасная по СанПиН 2.1.7.1287-03.

Биогеохимическое опробование, пробоподготовка и анализ растительных проб. Для биогеохимического опробования принимались доминирующие в ландшафтах острова виды древесной и травянистой растительности. Среди древесной растительности при отборе листьев принимались: береза повислая (*Betula pendula*), тополь белый (*Populus alba*), ива белая (*Salix alba*) и липа сердцевидная (*Tilia cordata*). Среди травянистой растительности: осока обыкновенная (*Carex L.*), мятлик луговой (*Poa pratensis*), подорожник большой (*Plantago major L.*), клевер луговой (*Trifolium pratense L.*) и клевер белый (*Trifolium repens L.*). Они предрасположены к накоплению загрязняющих веществ (в частности, тяжелых металлов) [Ветчинникова и др., 2013].

Отбор проб растительного материала осуществлялся в соответствии с [Методические рекомендации..., 1981] на площадках размером 1×1 м методом «конверта», что скомпенсировало неоднородность в сомкнутости крон и видовом составе. Раздельно отбиралась аэральная часть травяного покрова и листья древесных растений без видимых повреждений и заболеланий. Масса каждой пробы составляла >500 г.

Так как в задачи исследования входило определение биоаккумуляции тяжелых металлов, для исключения поступления анализируемых компонентов на поверхность растений из атмосферы свежесобраный материал промывался дистиллированной водой, затем пробы высушивались до воздушно-сухого состояния, измельчались и квартовались аналогично пробам почв.

Подготовленные образцы минерализовали методом «сухого» озоления в муфельной печи LT 15/11 (Nabertherm, Германия) при температуре 650° до достижения постоянной массы (в течение 12 часов). Зольность определялась при той же температуре на термогравиметризаторе TGA 701 (Leco, США).

Кислотное разложение полученной золы проводилось аналогично почвам и с использованием тех же реактивов, как было описано выше. Определе-

ние рассматриваемых металлов в полученных растворах производилось согласно М-МВИ-80-2008 с использованием стандартов и оборудования, описанных выше.

Оценка степени накопления загрязняющих веществ растениями из почвы производилась на основании коэффициентов биоаккумуляции (K_b) отдельно для отобранных проб листьев и травяного яруса. K_b показывает отношение концентрации элемента в растении к концентрации его подвижной формы в почве (в мг/кг) [Перельман, Касимов, 1999].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа валового содержания и подвижных форм Cd, Cu, Ni, Pb и Zn в почвах представлены в табл. 1. Как видно, на всех пробных площадках отмечено превышение гигиенических нормативов сразу по нескольким из рассматриваемых элементов. При этом везде, с учетом погрешности, выявлено превышение ПДК по валовому содержанию и подвижным формам Pb и Zn, а также превышение ОДК валового содержания Cd (при условии, что количество подвижных форм данного элемента в почве не нормируется).

Таблица 1

Концентрации исследуемых тяжелых металлов в пробах почв, мг/кг

Зона	Номер пробной площадки	Элемент (Подвижные формы / Валовое содержание)				
		Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
I	1	0,20 / 2,6	16,2 / 56	1,9 / 28	25 / 85	30 / 145
	2	0,64 / 2,6	6,5 / 34	1,05 / 23	26 / 85	45 / 115
II	3	0,17 / 3,5	3,2 / 105	0,68 / 31	376 / 1179	32 / 209
	4	0,34 / 2,8	5,4 / 49	1,4 / 29	25 / 73	49 / 167
III	5	0,21 / 2,3	4,6 / 37	0,63 / 21	10,3 / 55	20 / 96
	6	0,41 / 2,6	2,5 / 35	1,05 / 28	13 / 79	54 / 199
	7	0,56 / 3,1	15,0 / 107	2,5 / 29	297 / 345	1131 / 2903
IV	8	0,18 / 2,6	1,57 / 956	0,65 / 21	7,0 / 52	20 / 123
	9	0,16 / 2,4	2,3 / 26	0,66 / 20	8,2 / 46	16 / 64
	10	0,32 / 2,6	0,84 / 49	0,90 / 29	5,2 / 65	27 / 143
ПДК _{п.ф.} / ОДК (ПДК _{в.с.})		- / 1	3 / 66	4 / 40	6 / 65 (32)	23 / 110

Примечание. Погрешность для всех элементов и форм составляет 30%.

Для репрезентативности территория острова была условно поделена на IV зоны: I – рекреационную (пробные площадки № 1 и 2), относящуюся к землям природного комплекса и озеленения; II – переходную (пробные площадки № 3 и 4), граничащую с землями общественной застройки и промышленного использования; III – наветренную

зону до ЗСД (пробные площадки № 5–7) и IV – подветренную зону после ЗСД (пробные площадки № 8–10). На рис. 4–5 представлены значения полученных коэффициентов.

Для отражения подвижности металлов в почве построена зависимость отношения их подвижных форм к валовому содержанию (рис. 3).

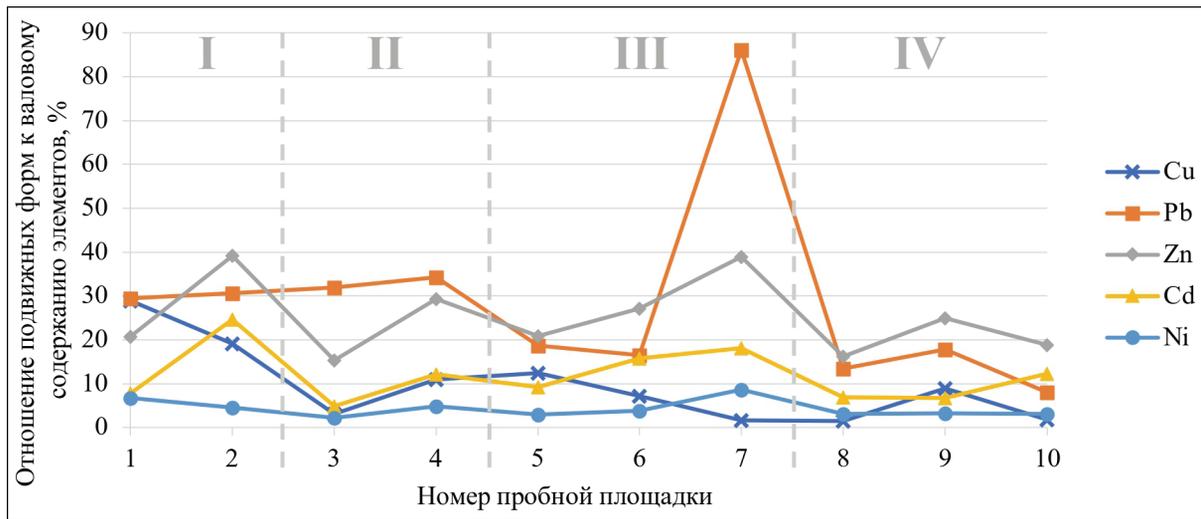


Рис. 3. Соотношение подвижных форм и валового содержания элементов в почвах

Fig. 3. Ratio of mobile forms and gross content of elements in soils

Ряд подвижности металлов на изученной территории может быть представлен как Pb (29%) > Zn (25%) > Cd (12%) > Cu (10%) > Ni (4%). В скобках указана средняя доля подвижных форм. На пробной площадке № 7 отмечается повышенное содержание подвижных форм Pb (86%), что может быть связано со свежим загрязнением поверхностного слоя почвы.

По данным табл. 1 рассчитана кратность превышения ПДК у подвижных форм металлов (рис. 4) и коэффициент контрастности по ПДК, кларк концентрации и коэффициент контрастности относитель-

но средних валовых содержаний в почвах городов с населением более 700 тыс. чел. (рис. 5).

Тогда как на пробной площадке № 1 (перед началом косы острова) зафиксированы наибольшие $K_{ПДК}$ у валовых Cd и Pb, у гаражного кооператива (пробная площадка № 2) обнаружены максимальные количества их подвижных форм и наиболее растворимого в почвах Zn. В рекреационной зоне I незначительно выше среднего в городских почвах содержание только валового Pb – остальные элементы находятся в пределах характерных им величин.

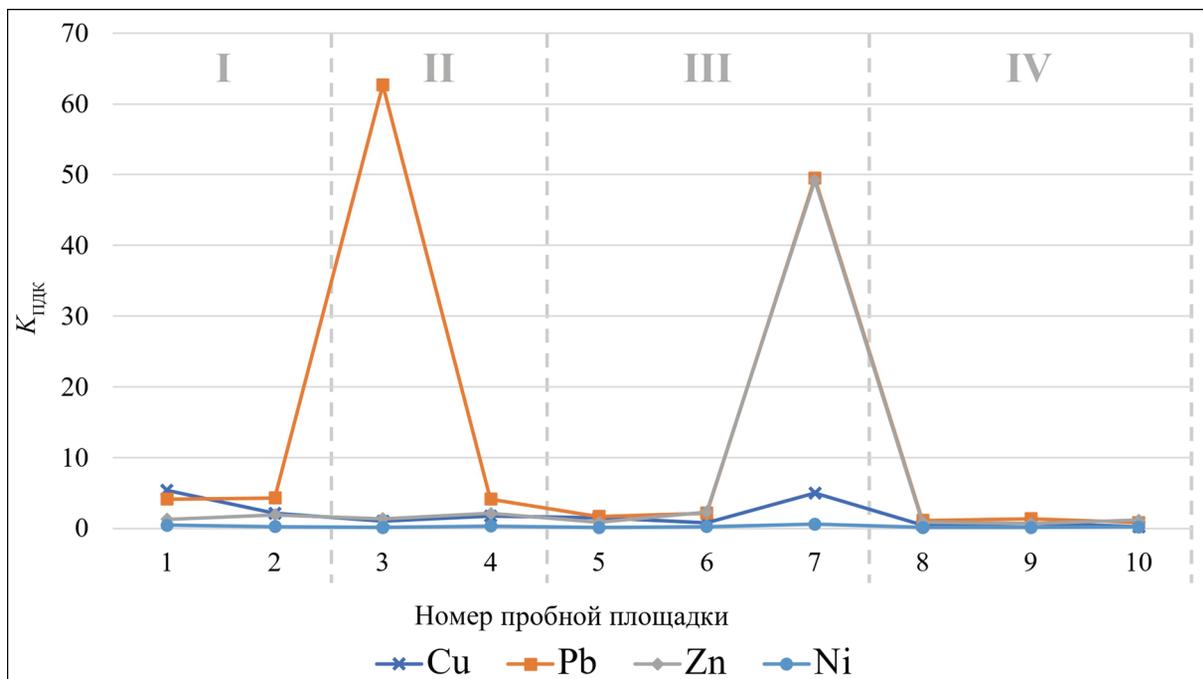


Рис. 4. Кратность превышения ПДК подвижными формами металлов

Fig. 4. Ratio of MPC surcharge by mobile forms of metals

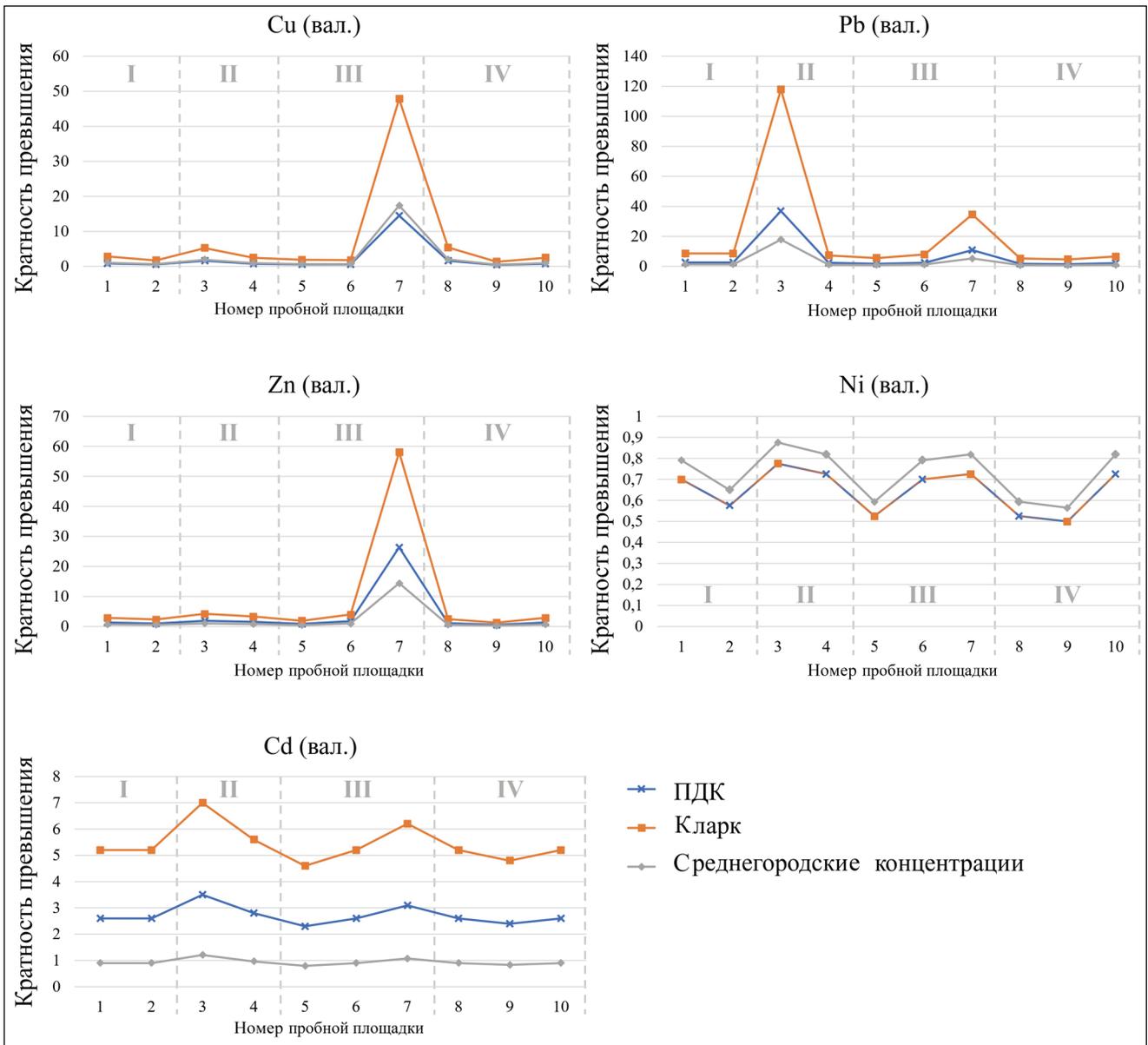


Рис. 5. Сравнение кратностей превышения валовыми содержаниями металлов

Fig. 5. Comparison of surcharge degrees for the gross contents of metals

В переходной зоне II обнаружено превышение валовых Cd, Pb и Zn на обеих пробных площадках № 3–4, а также Cu и Ni на площадке № 3. Рост подвижности элементов при этом происходит при удалении от рекреационной зоны I. Наиболее значимо загрязнение Pb: для него получены самые большие K_c , K_k и $K_{ПДК}$ среди всех четырех зон как по валовому содержанию, так и по подвижным формам. Только в данной зоне острова обнаружено незначительное превышение среднегородского уровня загрязнения Cd.

На пробных площадках № 5–7, относящихся к наветренной зоне общественной застройки у ЗСД (III), обнаружено высокое валовое содержание Cu, Pb и Zn. В наибольшей степени это проявляется на самой близкой к эстакаде площадке № 7, где для

Zn и Cu были рассчитаны самые значимые $K_{ПДК}$. У остальных элементов $K_{ПДК}$ подвижных форм сравнимы с рекреационной зоной I. Для всех элементов кроме Cu характерно постепенное снижение валовых содержаний при удалении от эстакады (движении от площадки № 7 к площадке № 5) и рост подвижности при движении в противоположном направлении. Только в зоне III обнаружено превышение среднегородских содержаний Zn. Здесь же зафиксирована наибольшая доля подвижных форм Pb по сравнению со всеми металлами.

На подветренной стороне общественной застройки у ЗСД (зона IV) обнаружено превышение валовых Cd, Pb и Zn на всех пробных площадках № 8–10. Однако наиболее значимо содержание валовой Cu на площадке № 8, ближайшей к эстакаде.

За исключением Cu и Pb характер загрязнения схож с рекреационной зоной I. Содержание подвижных форм меньше в сравнении с прочими частями острова, но все еще выше ПДК у Ni, Pb и Zn. $K_{\text{ПДК}}$ по подвижным формам наименьший у всех элементов среди всех зон. По всем металлам кроме Cu валовые содержания меньше среднегородских. Пробные площадки № 8–9 находятся в пределах ветровой тени, где загрязняющее воздействие ЗСД не столь высоко. Попадание поллютантов на такие площадки происходит с угасающими ветровыми потоками.

По результатам анализа проб почв не подтвердилось предположение, что парковая зона является условно-фоновым участком. Это может быть объяснено рядом причин:

- хроническим характером загрязнения территории острова;
- наличием привозных грунтов;
- остаточным воздействием от ликвидированной в 2017 г. свалки в парковой зоне;
- близким расположением локальных источников загрязнения – промышленных объектов и гаражей.

Для проведения интегральной эколого-геохимической оценки был рассчитан СПЗ по каждой из рассматриваемых пробных площадок (табл. 2). Умеренно опасной категорией загрязнения обладали пробные площадки № 3 и 7 (переходная зона II и наветренная зона общественной застройки у ЗСД III соответственно). В остальных случаях уровень загрязнения соответствовал низкому.

Таблица 2

Коэффициенты суммарного загрязнения

Зона	Номер пробной площадки	Z_c		Зона	Номер пробной площадки	Z_c	
		Подв.	Вал.			Подв.	Вал.
I	1	11,3	8,12	III	6	5,6	8,11
	2	8,7	7,39		7	104,3	55,48
II	3	65,3	44,61	IV	8	2,7	7,49
	4	8,4	8,07		9	3,0	5,31
III	5	4,3	5,98		10	2,5	7,40

Результаты биогеохимических исследований растительного покрова Канонерского острова представлены в табл. 3.

Рассматриваемые металлы по отношению к растениям можно поделить на участвующие в их метаболизме (Cu, Ni, Zn) и ксенобиотики (Cd и Pb) [Пуховская, 2020; Petrova, Rudzish, 2021; Смирнов и др., 2023].

Концентрации Cd в листьях древесной растительности высокие рядом с эстакадой ЗСД (пробная площадка № 7), но еще выше на максимальном удалении от нее. Первое может быть объяснено локальным воздействием в виде питания растений загрязненными стоками с автомобильной дороги. Высокое содержание подвижных форм Cd в почве и его накопление в растительном покрове на пробных площадках № 1 и 2 могут быть совместно связаны с составом привозного плодородного грунта для зеленых насаждений [Malyshkov et al., 2019; Smirnov et al., 2021]. Кроме того, из-за малой площади острова его парковая зона подвергается усиленному аэротехногенному воздействию со стороны производственных предприятий, таких, как Балтийский балкерный терминал, Морской порт и Петербургский нефтяной терминал.

Тогда как в почвах содержание подвижного Pb на большинстве пробных площадок достигает более 10 мг/кг, в растительных пробах оно превышает 2 мг/кг только на площадке № 9.

Повышенная активность накопления наблюдается в растительности для Cu и во многом коррелирует с концентрациями подвижных форм в почвах. В древесной растительности аккумуляция выше на территориях зеленых насаждений, а в травяном ярусе она увеличивается по мере приближения к ЗСД (исключение – площадки с подветренной стороны), где густота деревьев гораздо ниже и значительная часть воздействия приходится на травяной покров. Тогда как Cu связана с процессом фиксации азота растениями, Zn входит в состав ферментативных систем, участвующих в дыхании и синтезе белков. Закономерность его накопления аналогична Cu.

Высокое содержание Ni в растительных пробах с площадок № 3 и 4 объясняется тем, что на момент отбора проб там велись работы по облагораживанию территории и привозной грунт мог быть загрязнен. В таком случае активнее происходит поглощение однолетними растениями, питающимися из менее глубоких слоев. Гипотеза подтверждается низким содержанием Ni в древесных формах данной территории.

Концентрации исследуемых тяжелых металлов в растительных пробах, мг/кг

Зона	Номер пробной площадки	Элемент (Травяной покров / Листья древесной растительности)				
		Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
I	1	0,046 / 1,8	1,79 / 11	0,19 / 2,3	0,18 / 1,2	3 / 323
	2	0,022 / 1,6	0,73 / 7,6	0,07 / 1,1	0,17 / 1,5	0,48 / 292
II	3	0,037 / 0,42	2,6 / 4,4	0,80 / 1,2	0,58 / 1,2	29 / 236
	4	0,021 / 0,13	4,5 / 6,5	0,86 / 0,59	0,47 / 1,7	20 / 31
III	5	0,040 / 0,13	6,1 / 8,5	0,53 / 1,1	0,30 / 1,3	22 / 22
	6	0,13 / 0,095	12 / 9,4	0,62 / 1,5	0,74 / 0,59	32 / 21
	7	0,026 / 1,1	3,7 / 9,8	0,52 / 1,2	0,83 / 0,19	23 / 324
IV	8	0,043 / 0,15	14 / 9,2	0,53 / 3,1	0,43 / 1,4	13 / 38
	9	0,026 / 0,52	3,8 / 7,1	0,59 / 2,5	0,30 / 2,2	19 / 352
	10	0,038 / 0,60	4,0 / 13	0,63 / 2,2	0,62 / 1,1	20 / 277

Примечание. Погрешность для всех элементов составляет 30%.

В табл. 4 представлены результаты расчета коэффициента биоаккумуляции.

В соответствии с расчетными данными сделаны следующие выводы:

1. У Cd интенсивность аккумуляции максимальна в рекреационной зоне I как для древесной растительности (2,5–9), так и для травянистой (0,03–0,23), что может указывать на хроническое

загрязнение и повышенное содержание элемента на более глубоких почвенных горизонтах. С северо-восточной стороны ЗСД также были идентифицированы зоны повышенного накопления Cd с K_0 0,83–3,25 и 0,12–0,24 для листового и травяного покрова, соответственно. Это может быть обусловлено ветровой тенью и, следовательно, недостаточной степенью рассеивания.

Таблица 4

Коэффициент биоаккумуляции, %

Зона	Номер пробной площадки	Элемент (Травяной покров / Листья древесной растительности)				
		Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
I	1	0,23 / 9	0,11 / 0,68	0,10 / 1,21	0,007 / 0,048	0,10 / 10,8
	2	0,03 / 2,5	0,11 / 1,17	0,07 / 1,05	0,007 / 0,058	0,01 / 6,5
II	3	0,22 / 2,47	0,81 / 1,38	1,18 / 1,76	0,002 / 0,003	0,91 / 7,4
	4	0,06 / 0,38	0,83 / 1,2	0,61 / 0,42	0,019 / 0,068	0,41 / 0,63
III	5	0,19 / 0,62	1,33 / 1,85	0,84 / 1,75	0,029 / 0,126	1,10 / 1,1
	6	0,32 / 0,23	4,8 / 3,76	0,59 / 1,43	0,057 / 0,045	0,59 / 0,39
	7	0,05 / 1,96	0,25 / 0,65	0,21 / 0,48	0,003 / 0,001	0,02 / 0,29
IV	8	0,24 / 0,83	8,92 / 5,86	0,82 / 4,77	0,061 / 0,2	0,65 / 1,9
	9	0,16 / 3,25	1,65 / 3,09	0,89 / 3,79	0,037 / 0,268	1,19 / 22
	10	0,12 / 1,88	4,76 / 15,5	0,70 / 2,44	0,12 / 0,212	0,74 / 10,3

2. Накопление Cu возрастает от рекреационной зоны I в сторону ЗСД и варьирует от 0,11 до 8,92 для травяного покрова и от 0,65 до 15,5 для древесной растительности. При этом наибольшие значения K_0 обоих ярусов отмечены для зон, прилегающих к эстакаде (исключение – пробная площадка № 7), что может быть обусловлено меньшей площадью

проективного покрытия древесных видов и преобладанием травянистой растительности.

3. Аккумуляция Ni наиболее стабильна в сравнении с другими элементами как для травяного (0,07–1,18), так и для листового (0,42–4,77) покровов. Минимальное накопление Ni приходилось на травянистый ярус в пределах рекреационной зоны I, что

может свидетельствовать о значительном влиянии аэротехногенного переноса. Это подтверждается наличием пиков поглощения элемента с подветренной стороны ЗСД (зона IV), где в соответствии с ветровым режимом наблюдается наименьшая интенсивность рассеивания загрязняющих веществ.

4. Для Pb ввиду высокой токсичности характерна низкая степень бионакопления не смотря на высокое содержание подвижных форм в почвах [Alekseenko et al., 2020; Cheremisina et al., 2021]. Для травянистой растительности K_6 составил не более 0,12, что в 2,7 и 9,8 раз меньше, чем максимальные величины данного коэффициента для Cd и Ni соответственно. Аналогичная ситуация для листового покрова: K_6 у Pb варьирует в пределах 0,003–0,27 и в значительной степени уступает величине K_6 для других элементов.

5. У Zn характер поглощения схож с Cu. K_6 травянистого покрова увеличивался постепенно, варьируя в диапазоне 0,01–1,19, достигая максимума

на границе переходной и наветренной зон II–III, где присутствовало возможное влияние привозных грунтов. Исключением вновь является пробная площадка № 7. Для листового покрова схожая тенденция с Ni. В обоих случаях наибольшее поглощение выявлено в рекреационной зоне, в проективном покрытии которой преобладают деревья, а также с подветренной стороны ЗСД (зона IV), находящейся в области ветровой тени.

Степень аккумуляции тяжелых металлов в растениях определяется не только видовой принадлежностью, но и физико-химическими свойствами элемента и его путями поступления в растения. Установлено, что в условиях Канонерского острова интенсивность поглощения тяжелых металлов увеличивается в следующем ряду: $Pb < Cd < Ni < Cu < Zn$. Для большинства из них содержание в листовом покрове выше, чем в травяном, в среднем в 5–15 раз (рис. 6). Сильнее всего это проявляется на пробных площадках № 1–2.

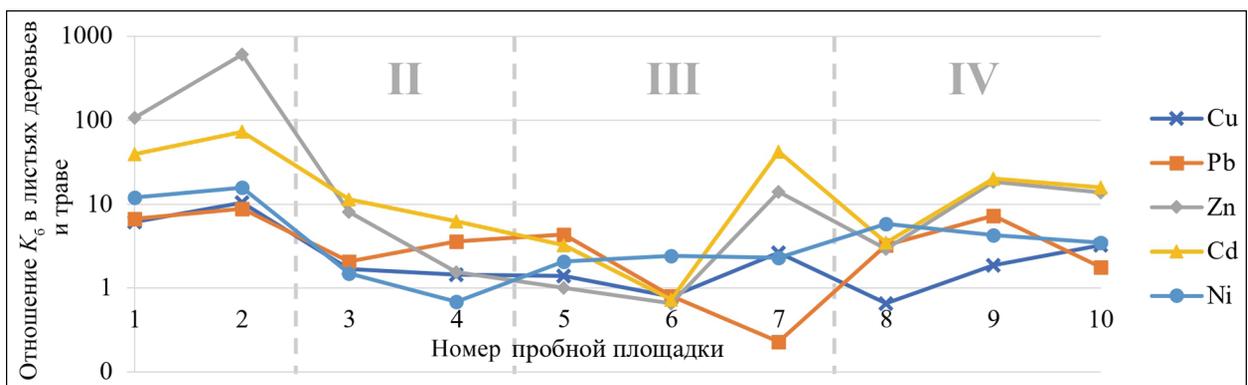


Рис. 6. Отношение K_6 в листьях древесной растительности к K_6 в травяном покрове

Fig. 6. Ratio of K_6 in tree leaves to K_6 in grass cover

В рекреационной зоне I возможно загрязнение более глубоких почвенных горизонтов, с которых осуществляется питание древесной растительности. На пробных площадках № 3–6 K_6 листового и травяного покрова близки, но с небольшим преобладанием в первом. Это можно связать с накоплением в древесных формах тяжелых металлов за более длительный срок за счет прохождения большего числа вегетативных периодов. На пробной площадке № 7 происходит резкий рост K_6 по всем металлам кроме Pb, теоретически связанный с попаданием стоков с эстакады в почву и аэротехногенным переносом. Пробные площадки с подветренной зоны IV, по всей видимости, испытывают продолжительное хроническое воздействие со стороны промплощадки на северо-востоке острова: K_6 и для листового, и для травяного

покрова имеют высокие значения по всем изученным металлам (кроме Cd). У жилой застройки, где плотность древесных насаждений ниже, наблюдается повышенный уровень накопления загрязняющих веществ травяным покровом, что свидетельствует о вероятном высоком влиянии аэротехногенного воздействия и об увеличении фоллиарного пути поступления тяжелых металлов [Масленников и др., 2015].

ВЫВОДЫ

Результаты биогеохимической оценки показали, что:

- наиболее подвижным из изученных тяжелых металлов в почвах Канонерского острова является Pb с 29% (к нему близка подвижность Zn – 25%), а наименее подвижным – Ni (4%);

– на всех пробных площадках с учетом погрешности выявлено превышение допустимых концентраций по валовому содержанию и подвижным формам Pb и Zn;

– на территории острова выделяются две зоны с умеренно опасной категорией загрязнения по СПЗ – переходная зона (а именно, пробная площадка № 3 с Z_c в диапазоне 44,61–65,3) и зона с наветренной стороны ЗСД (в частности, пробная площадка № 7 с Z_c в диапазоне 55,48–204,3);

– при рассмотрении эстакады ЗСД в качестве источника поступления загрязняющих веществ в компоненты окружающей среды заметно большее влияние на почвы с ее наветренной стороны;

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2024-0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.А., Алексеев А.В.* Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных ландшафтов. Ростов н/Д: Изд-во Южного федерального университета, 2013. 388 с.
- Алексеев В.А., Шведкая Н.В., Бек Д. и др.* Аккумуляция химических элементов почвенно-растительным покровом Северо-Кавказской геохимической провинции // Записки Горного института. 2021. № 247. С. 1–13. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.15.
- 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 Российской академии наук. 2013. № 3. С. 68–73.
- Водяницкий Ю.Н.* Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М.: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 2008. 85 с.
- Голубева Е.А., Еришова А.А.* Загрязнение побережья Невской губы Финского залива морским мусором и микропластиком в 2022 г. Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022 (Тверь, 2022 г.). Тверь: Изд-во ПолиПРЕСС, 2022. С. 328–331.
- Дроздов В.В., Лисовский А.Я.* Шумовое загрязнение среды при судоходстве и экологическая безопасность экосистем // Безопасность жизнедеятельности. 2021. № 7. С. 41–49.
- Дьячкова О.Н.* Влияние загрязнения почвы на экологическую безопасность городской среды Санкт-Петербурга // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 1. С. 67–71. DOI: 10.31857/S0869780920010044.
- Егорова С.А.* Роль почвы в формировании здоровья городского населения // Вестник современных исследований. 2018. № 8.3(23). С. 39–41.
- Касимов Н.С., Власов Д.В.* Тяжелые металлы и металлоиды в почвах российских городов (по данным ежегодных докладов Росгидромета) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 3. С. 14–22.
- Качор О.Л., Сарапулова Г.И., Богданов А.В.* Исследование возможности иммобилизации подвижных форм мышьяка в техногенных субстратах. Записки горного института. 2019. № 239. 596–602. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.596.
- Коршунов Г.И., Еремеева А.М., Серегин А.С.* Обоснование снижения требуемого расхода воздуха при проветривании горных выработок угольных шахт с работающими дизельными двигателями // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 3. С. 47–59. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_47.
- Масленников П.В., Дедков В.П., Куркина М.В. и др.* Аккумуляция металлов в растениях урбоэкосистем // Вестник Балтийского федерального ун-та им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2015. № 7. С. 57–69.
- Медведева М.В., Титова Т.С., Бахмет О.Н. и др.* Исследование влияния аэротехногенного загрязнения на накопление тяжелых металлов в системе растение почва // Экология и промышленность России. 2019. № 23. С. 52–57. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-6-52-57.
- Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / под ред. Н.Г. Зырина, С.Г. Малахова. М.: Гидрометеоздат, 1981. 63 с.
- Мосягина Д.Д., Мысин А.В.* Систематический обзор и анализ данных по содержанию свинца в почвах городских агломераций // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию РАН. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. С. 218–223.
- Норова Л.П., Николаева Т.Н.* Комплексная оценка эколого-геологических условий в селитебных и промышленных районах г. Санкт-Петербурга // Инженерно-экологические изыскания – нормативно-правовая база, современные методы и оборудование: материалы Общероссийской научно-практической конференции. М.: Геомаркетинг, 2020. С. 62–70.
- Опекунова М.Г., Никулина А.Р., Смешко И.В. и др.* Сравнительный анализ эффективности методов биоиндикации при мониторинговых исследованиях состояния окружающей среды в Санкт-Петербурге // Вестник

- Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле. 2023. № 68(2). С. 1–37. DOI: 10.21638/spbu07.2023.207.
- Пашкевич М.А., Бек Д., Матвеева В.А. и др. Биогеохимическая оценка состояния почвенно-растительного покрова в промышленных, селитебных и рекреационных зонах Санкт-Петербурга // Записки Горного института. 2020. № 241. С. 125–130. DOI: 10.31897/rmi.2020.1.125.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрей-2000, 1999. 768 с.
- Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Почвенные ферменты и загрязнение почв: биодegradация, биоремедиация, биоиндикация // Агрехимия. 2020. № 3. С. 83–93.
- Пухова Т.Ю. Накопление тяжелых металлов дикорастущими растениями и оценка возможности их использования в фиторемедиации загрязненных почв. Актуальные проблемы природопользования и природообустройства. Пенза: Изд-во ПГАУ, 2020. С. 122–125.
- Сарапулова Г.И. Геохимический подход в оценке воздействия техногенных объектов на почвы // Записки Горного института. 2020. № 243. С. 388–392. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.388.
- Смирнов Ю.Д., Матвеева В.А., Яковлев Н.М. и др. Анализ и оценка современных технологий очистки сточных вод на гальваническом производстве // Горный журнал. 2023. № 9. С. 55–60. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.08.
- Хомич В.С., Савченко С.В., Рыжиков В.А. и др. Проблемы обращения с городскими почвами, загрязненными нефтепродуктами и тяжелыми металлами // Природопользование. 2019. № 1. С. 76–90.
- Швец Н.И., Сидорова К.А. Уровень загрязнения почв и овощных культур в условиях городской и сельской среды // Астраханский вестник экологического образования. 2018. № 6. С. 51–56.
- Шилин М.Б., Сычев В.И., Михеев В.Л. и др. Результаты исследований техносферы Невской губы в РГМУ // Гидрометеорология и экология. 2020. № 60. С. 351–370. DOI: 10.33933/2074-2762-2020-60-351-370.
- Alekseenko V.A., Alekseenko A.V., Bech D. et al. Element accumulation patterns of native plant species under the natural geochemical stress, *Plants*, 2020, no. 10, p. 1–18, DOI: 10.3390/plants10010033.
- Cheremisina O., Litvinova T., Sergeev V. et al. Application of the Organic Waste-Based Sorbent for the Purification of Aqueous Solutions, *Water*, 2021, no. 13(21), p. 3101, DOI: 10.3390/w13213101.
- Dzhevaga N.V., Borisova D.D. Analysis of Air Monitoring System in Megacity on the Example of St. Petersburg, *Journal of Ecological Engineering*, 2021, no. 22(4), p. 175–185, DOI: 10.12911/22998993/134076.
- Malyshkov G.B., Nikolaichuk L.A., Sinkov L.S. Legislative regulation of waste management system development in the Russian federation, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2019, no. 5, p. 631–635.
- Petrova T.A., Rudzish E. Utilization of sewage sludge as an ameliorant for reclamation of technogenically disturbed lands, *Journal of Mining Institute*, 2021, no. 251, p. 767–776, DOI: 10.31897/PMI.2021.5.16.
- Smirnov Yu.D., Suchkov D.V., Danilov A.S. et al. Artificial soils for restoration of disturbed land productivity, *Eurasian mining*, 2021, no. 2, p. 92–96, DOI: 10.17580/em.2021.02.19.
- Электронные ресурсы**
- ГН 2.1.7.2041. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901966754?marker=65001L> (дата обращения 08.06.2024).
- ГОСТ 17.4.4.02-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. URL: <https://fsvps.gov.ru/files/gost-17-4-4-02-2017-mezhgosudarstvennyj-standart/> (дата обращения 08.06.2024).
- ГОСТ 28268-89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023556> (дата обращения 08.06.2024).
- Отчет о результатах деятельности Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности в 2020 году. 2021. 11 с. URL: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/ecology/struktura-razmesheniya-svedenij-o-kontrolnoj-nadzornoj-deyatelnosti/kontrolno-nadzornaya-deyatelnost/check_result/arhiv/ (дата обращения 11.09.2024).
- РД 52.18.289-90. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. URL: http://legacy-ipk.meteor.ru/images/stories/literatura/rd/52.18.289_90.pdf (дата обращения 08.06.2024).
- СанПиН 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901859456?marker=65201M> (дата обращения 08.06.2024).
- Характеристики уровня загрязнения атмосферного воздуха в субъектах РФ. Открытые данные Министерства природных ресурсов и экологии РФ. URL: <https://www.mnr.gov.ru/opendata/7710256289-property> (дата обращения 08.06.2024).

Поступила в редакцию 25.04.2024
 После доработки 15.09.2024
 Принята к публикации 26.11.2024

BIOGEOCHEMICAL ASSESSMENT OF HEAVY METAL CONTAMINATION OF SOIL AND VEGETATION COVER OF THE KANONERSKY ISLAND

M.A. Chukaeva¹, A.A. Koshenkova², N.A. Malygin³, D.D. Borisova⁴, D.F. Anamov⁵

¹⁻⁴ *Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University*

⁵ *JSC Mekhanobr Engineering*

¹ *Laboratory of Environmental Modeling, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Engineering; email: shellx@bk.ru*

² *Institute for the Development of Interdisciplinary Competences, Engineer; email: koshenkova2000@mail.ru*

³ *Mining Faculty, Department of Geoecology, master student; e-mail: nik.redapple.malygin@mail.ru*

⁴ *Mining Faculty, Department of Geoecology, post-graduate student; e-mail: dashbo2000@gmail.com*

⁵ *Environmental Department, Engineer; e-mail: danyar.anamov@yandex.ru*

The authors have evaluated pollution with heavy metals (Cd, Cu, Ni, Pb and Zn) in the soil and vegetation cover of the Kanonersky Island, St. Petersburg. The reconnaissance survey has identified the Western High Speed Diameter (WHSD) as a significant source of pollution. The territory of the island was divided into 4 zones according to their functional use and wind regime: recreational, transitional, windward and leeward relative to the WHSD. The main soil contaminants are Pb and Zn with concentrations varying from 5 to 376 mg/kg and from 16 to 1131 mg/kg (for mobile forms) and from 46 to 1179 mg/kg and from 64 to 2903 mg/kg (for gross content), respectively. The highest degree of MAC surcharge was found for the mobile forms of metals: Pb (63-fold in the transition zone) and Zn (50-fold on the windward side of the WHSD). The coefficient of total soil pollution with heavy metals ranged from 2 to 104 for the mobile forms and from 5 to 55 for the gross content. Maximum values were recorded in transition and windward zones, therefore soils of these territories were classified as moderately polluted. The highest mobility among the considered heavy metals on the island is for Pb (29% – average percentage for its mobile forms), while the lowest is for Ni (4%). At the same time, the accumulation by plants becomes higher in a row Pb < Cd < Ni < Cu < Zn. The highest values for Zn and Cu were recorded in tree leaves on the leeward side of the WHSD. The general assessment of the state of soil and vegetation cover of the Kanonersky Island revealed a moderate degree of soil contamination with the main localization on the windward side of the WHSD and partially in the transition zone.

Keywords: urban soils, vegetation cover, heavy metals, contrast coefficient, total pollution coefficient, bioaccumulation coefficient

Acknowledgements. The research was carried out within the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSRW-2024-0005).

REFERENCES

- Alekseenko V.A., Alekseenko A.V. *Khimicheskie elementy v geokhimicheskikh sistemakh. Klarki pochv selitebnykh landshaftov* [Chemical elements in geochemical systems. Clarks of soils of residential landscapes], Rostov on Don, Southern Federal Univ. Publ., 2013, 388 p. (In Russian)
- Alekseenko V.A., Alekseenko A.V., Bech D. et al. Element accumulation patterns of native plant species under the natural geochemical stress, *Plants*, 2020, no. 10, p. 1–18, DOI: 10.3390/plants10010033.
- Alekseenko V.A., Shvydkaya N.V., Bek D. et al. Akkumulyatsiya khimicheskikh elementov pochvenno-rastitel'nykh pokrovom Severo-Kavkazskoi geokhimicheskoi provintsi [Accumulation of chemical elements by soil and vegetation cover of the North Caucasus geochemical province], *Journal of Mining Institute*, 2021, no. 247, p. 1–13, DOI: 10.31897/PMI.2021.1.15. (In Russian)
- Cheremisina O., Litvinova T., Sergeev V. et al. Application of the Organic Waste-Based Sorbent for the Purification of Aqueous Solutions, *Water*, 2021, no. 13(21), p. 3101, DOI: 10.3390/w13213101.
- Drozdo V.V., Lisovskii A.Ya. Shumovoe zagryaznenie sredy pri sudokhodstve i ekologicheskaya bezopasnost' ekosistem [Noise pollution from shipping and ecological safety of ecosystems], *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2021, no. 7, p. 41–49. (In Russian)
- D'yachkova O.N. Vliyanie zagryazneniya pochvy na ekologicheskuyu bezopasnost' gorodskoi sredy Sankt-Peterburga [Impact of soil pollution on the environmental safety of the urban environment of St. Petersburg], *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2020, no. 1, p. 67–71, DOI: 10.31857/S0869780920010044. (In Russian)
- Dzhevaga N.V., Borisova D.D. Analysis of Air Monitoring System in Megacity on the Example of St. Petersburg, *Journal of Ecological Engineering*, 2021, no. 22(4), p. 175–185. DOI: 10.12911/22998993/134076.
- Egorova S.A. Rol' pochvy v formirovaniy zdorov'ya gorodskogo naseleniya [The role of soil in shaping the health of urban populations], *Vestnik sovremennykh issledovaniy*, 2018, no. 8.3 (23), p. 39–41. (In Russian)
- Golubeva E.A., Ershova A.A. [Marine debris and microplastics pollution of the coast of the Nevskaya Bay of the Gulf of Finland in 2022], *Trudy "Morskije issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU)-2022"* [Marine Research and Education (MARESEDU)-2022], 2022, p. 328–331. (In Russian)

- Kachor O.L., Sarapulova G.I., Bogdanov A.V. Investigation of the possibility of immobilization of mobile forms of arsenic in anthropogenic substrates, *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 239, p. 596–602, DOI: 10.31897/PMI.2019.5.596.
- Kasimov N.S., Vlasov D.V. Tyazhelye metally i metalloidy v pochvakh rossiiskikh gorodov (po dannym ezhegodnykh dokladov Rosgidrometa) [Heavy metals and metalloids in soils of Russian cities (according to annual reports of Roshydromet)], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, no. 3, p. 14–22. (In Russian)
- Khomich V.S., Savchenko S.V., Ryzhikov V.A. et al. Problemy obrashcheniya s gorodskimi pochvami, zagryaznennymi nefteproduktami i tyazhelymi metallami [Problems of handling urban soils contaminated with oil products and heavy metals], *Prirodopol'zovanie*, 2019, no. 1, p. 76–90. (In Russian)
- Korshunov G.I., Eremeeva A.M., Seregin A.S. Obosnovanie snizheniya trebuemogo rashkoda vozdukh pri provetrivaniy gornykh vyrabotok ugol'nykh shakht s rabotayushchimi dizel'nymi dvigatelyami [Justification of reduction of the required air flow rate when ventilating mine workings of coal mines with diesel engines in operation], *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2022, no. 3, p. 47–59, DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_47. (In Russian)
- Malyshkov G.B., Nikolaichuk L.A., Sinkov L.S. Legislative regulation of waste management system development in the Russian federation, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2019, no. 5, p. 631–635.
- Maslennikov P.V., Dedkov V.P., Kurkina M.V. et al. Akkumulyatsiya metallov v rasteniyakh urboekosistem [Accumulation of metals in plants of urban ecosystems], *Bulletin of the Baltic Federal University named after I. Kant. Series: Natural and Medical Sciences*, 2015, no. 7, p. 57–69. (In Russian)
- Medvedeva M.V., Titova T.S., Bakhmet O.N. et al. Issledovanie vliyaniya aerotekhnogenogo zagryazneniya na nakoplenie tyazhelykh metallov v sisteme rastenie pochva [Study of influence of aerotechnogenic pollution on accumulation of heavy metals in plant-soil system], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2019, no. 23, p. 52–57, DOI: 10.18412/1816-0395-2019-6-52-57. (In Russian)
- Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu polevyh i laboratornykh issledovaniy pochv i rastenij pri kontrole zagryazneniya okruzhayushej sredy metallami [Methodical recommendations for field and laboratory studies of soils and plants in the control of environmental pollution by metals], N.G. Zyrin, S.G. Malakhov (eds.), Moscow, Hydrometeoizdat Publ., 1981, 63 p. (In Russian)
- Mosyagina D.D., Mysin A.V. Systematic review and analysis of data on lead in urban agglomeration soils, *International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of V.G. Shukhov Belarusian State Technical University dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences*, Belgorod, V.G. Shukhov BGTU, 2022, p. 218–223.
- Norova L.P., Nikolaeva T.N. Comprehensive assessment of ecological and geological conditions in residential and industrial areas of St. Petersburg, *Engineering-ecological surveys – normative-legal base, modern methods and equipment: materials of the All-Russian scientific-practical conference*, Moscow, Geomarketing Publishing House, 2020, p. 62–70.
- Opekunova M.G., Nikulina A.R., Smeshko I.V., Kirichenko V.S. Sravnitel'nyi analiz effektivnosti metodov bioindikatsii pri monitoringovykh issledovaniyakh sostoyaniya okruzhayushchei sredy v Sankt-Peterburge [Comparative analysis of the effectiveness of bioindication methods in environmental monitoring studies in St. Petersburg], *Vestn. St. Peterburgskogo un-ta. Nauki o Zemle*, 2023, no. 68(2), p. 1–37, DOI: 10.21638/spbu07.2023.207. (In Russian)
- Pashkevich M.A., Bek D., Matveeva V.A., Alekseenko A.V. Biogeokhimicheskaya otsenka sostoyaniya pochvenno-rastitel'nogo pokrova v promyshlennykh, selitebnykh i rekreatsionnykh zonakh Sankt-Peterburga [Biogeochemical assessment of soil and vegetation cover in industrial, residential and recreational zones of St. Petersburg], *Journal of Mining Institute*, 2020, no. 241, p. 125–130, DOI: 10.31897/pmi.2020.1.125. (In Russian)
- Perelman A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshafta* [Geochemistry of landscape], Moscow, Astrea-2000, 1999, 768 p. (In Russian)
- Petrova T.A., Rudzish E. Utilization of sewage sludge as an ameliorant for reclamation of technogenically disturbed lands, *Journal of Mining Institute*, 2021, no. 251, p. 767–776, DOI: 10.31897/PMI.2021.5.16.
- Polyak Yu.M., Sukharevich V.I. Pochvennye fermenty i zagryaznenie pochv: biodegradatsiya, bioremediatsiya, bioindikatsiya [Soil enzymes and soil pollution: biodegradation, bioremediation, bioindication], *Agrokhiimiya*, 2020, no. 3, p. 83–93. (In Russian)
- Pukhovskaya T.Yu. [Accumulation of heavy metals by wild plants and assessment of their use in phytoremediation of contaminated soils], *Trudy "Aktual'nye problemy prirodopol'zovaniya i prirodooobustroystva"* [Actual problems of nature use and environmental management], 2020, p. 122–125. (In Russian)
- Sarapulova G.I. Geokhimicheskii podkhod v otsenke vozdeistviya tekhnogennykh ob'ektov na pochvy [Geochemical approach in assessing the impact of anthropogenic objects on soils], *Journal of Mining Institute*, 2020, no. 243, p. 388–392, DOI: 10.31897/PMI.2020.3.388. (In Russian)
- Shilin M.B., Sychev V.I., Mikheev V.L. et al. Rezul'taty issledovaniy tekhnosfery Nevskoi guby v RGGMU [Results of research on the technosphere of the Nevskaya Bay at the Russian State Geological University (RSGMU)], *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2020, no. 60, p. 351–370, DOI: 10.33933/2074-2762-2020-60-351-370. (In Russian)
- Shvets N.I., Sidorova K.A. Uroven' zagryazneniya pochv i ovoshchnykh kul'tur v usloviyakh gorodskoi i sel'skoi sredy [Soil and vegetable crop contamination levels in urban and rural environments], *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, 2018, no. 6, p. 51–56. (In Russian)
- Smirnov Yu.D., Matveeva V.A., Yakovlev N.M., Sakhabudinova E.R. Analiz i otsenka sovremennykh tekhnologii ochistki stochnykh vod na gal'vanicheskom proizvodstve [Analysis and evaluation of modern technologies of wastewater treatment at galvanic works], *Gornyi zhurnal*, 2023, no. 9, p. 55–60, DOI: 10.17580/gzh.2023.09.08. (In Russian)
- Smirnov Yu.D., Suchkov D.V., Danilov A.S., Goryunova T.V. Artificial soils for restoration of disturbed land productivity, *Eurasian mining*, 2021, no. 2, p. 92–96, DOI: 10.17580/em.2021.02.19.
- Vetchinnikova L.V., Kuznetsova T.Y., Titov A.F. Osobennosti nakopleniya tyazhelykh metallov v list'yah drevesnykh

- rastenij na urbanizirovannyh territoriyah v usloviyah severa [Features of heavy metal accumulation in the leaves of woody plants in urbanised areas in the north], *Proceedings of the Karelian Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences*, 2013, no. 3, p. 68–73. (In Russian)
- Vodyanitsky Yu.N. *Tyazhelye metally i metalloidy v pochvakh* [Heavy metals and metalloids in soils], Moscow, V.V. Dokuchaev Soil Institute of Russian Academy of Agricultural Sciences Publ., 2008, 85 p. (In Russian)
- Web sources*
- Characteristics of the level of atmospheric air pollution in the subjects of the Russian Federation. Open data of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, URL: <https://www.mnr.gov.ru/opendata/7710256289-property> (access date 08.06.2024). (In Russian)
- GN 2.1.7.2041. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemical substances in soil. Hygienic standards, Electronic fund of legal and normative-technical documents, URL: <https://docs.cntd.ru/document/901966754?marker=6500IL> (date of access 08.06.2024).
- GOST 17.4.4.02-2017. Interstate standard. Nature protection. Soils. Methods of sampling and preparing samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis, URL: <https://fsvps.gov.ru/files/gost-17-4-4-02-2017-mezhgosudarstvennyj-standart/> (date of access 08.06.2024).
- GOST 28268-89. Soils. Methods for Determining Humidity, Maximum Hygroscopic Humidity, and Humidity of Stable Wilting Point of Plants, Electronic Fund of Legal and Normative-Technical Documents, URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023556> (date of access 08.06.2024).
- RD 52.18.289-90. Guidelines. Methodology for Measuring the Mass Fraction of Mobile Forms of Metals (Copper, Lead, Zinc, Nickel, Cadmium, Cobalt, Chromium, Manganese) in Soil Samples by Atomic Absorption Analysis. URL: http://legacy-ipk.meteorf.ru/images/stories/literatura/rd/52.18.289_90.pdf (date of access 08.06.2024).
- Report on the results of the activities of the Committee on Nature Management, Environmental Protection and Environmental Safety in 2020, 2021, 11 p., URL: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/ecology/struktura-razmesheniya-svedenij-o-kontrolnoj-nadzornoj-deyatelnosti/kontrolno-nadzornaya-deyatelnost/check_result/arhiv/ (date of access 11.09.2024).
- SanPiN 2.1.7.1287-03. Sanitary and epidemiological requirements for soil quality, Electronic fund of legal and normative-technical documents, URL: <https://docs.cntd.ru/document/901859456?marker=6520IM> (date of access 08.06.2024).

Received 25.04.2024

Revised 15.09.2024

Accepted 26.11.2024