

УДК 631.416

Тяжелые металлы в почвенно-растительном покрове селитебного ландшафта города Архангельска



© **Корельская** Татьяна Александровна, кандидат химических наук, доцент кафедры химии и химической экологии института естественных наук и биомедицины САФУ имени М. В. Ломоносова. Контактный телефон: +7 911 556 37 59. E-mail: takorelskaya@yandex.ru.



© **Попова** Людмила Фёдоровна, кандидат химических наук, доцент кафедры химии и химической экологии института естественных наук и биомедицины САФУ имени М. В. Ломоносова. Контактный телефон: +7 902 192 03 43. E-mail: fc.chemistry@pomorsu.ru.

Почвы селитебного ландшафта города Архангельска наиболее загрязнены валовыми формами тяжелых металлов (Pb, Cu и Zn) в старой его части, что может быть связано с типом подстилающих грунтов. Почвы Архангельска имеют высокую обеспеченность подвижными формами Cu и Zn, но испытывают дефицит актуальных запасов Co, Ni и Mn. Накопление тяжелых металлов в растениях города происходит интенсивнее, чем в естественных условиях, и увеличивается в ряду $Fe < Ni < Co < Pb < Cu < Zn$.

Ключевые слова: селитебный ландшафт, городские почвы, тяжелые металлы, загрязнение, почвенно-растительный покров.

Heavy metals in the soil-vegetation cover of the selitebnii landscape of the city Arkhangelsk

© **Korelskaya** Tatiyana Aleksandrovna, Ph. D. in Chemistry, associate professor of the department of the Chemistry and Chemical Ecology of the Institution of the Natural Sciences and Biomedicine of the NArFU named after M. V. Lomonosov. Contact phone: +7 911 556 37 59. E-mail: takorelskaya@yandex.ru.

© **Popova** Lyudmila Fedorovna, Ph. D. in Chemistry, associate professor of Chemistry and Chemical Ecology Department of the Institution of the Natural Sciences and Biomedicine NArFU named after M. V. Lomonosov. Contact phone: +7 902 192 03 43. E-mail: fc.chemistry@pomorsu.ru.

Abstract

Soils of the selitebnii landscape of Arkhangelsk is the most polluted of the forms of heavy metals (Pb, Cu and Zn) in the old part, which may be related to the type of underlying soils. The soils have a high availability of Arkhangelsk mobile forms of Cu and Zn, but the actual reserves are deficient in Co, Ni and Mn. Accumulation of heavy metals in the city plants is more intense than in natural conditions and increases in the number of row of $Fe < Ni < Co < Pb < Cu < Zn$.

Keywords: *selitebnii landscape, city soils, heavy metals, pollution, soils-natural cover.*

Введение

Интенсивный процесс урбанизации обусловил целый ряд экологических проблем, связанных с резким ухудшением качества городской среды. Все это вызывает необходимость индикации и объективной оценки ее современного состояния, особенно в суровых климатических условиях Севера.

Серьезной проблемой крупных городов является загрязнение природных объектов тяжелыми металлами (далее – ТМ). Особенность загрязнения городских почв, одного из основных компонентов биосферы, состоит в том, что в крупных городах на относительно небольшой площади сосредоточено значительное количество различных источников загрязнения (промышленные предприятия, транспорт, бытовые отходы), обуславливающих интенсивность и неоднородность состава почвенных загрязнений.

Поступление ТМ в почвенный покров определяет возможность дальнейшей их миграции в грунтовые воды, доступность растениям, создает потенциальную угрозу живым организмам, в том числе и человеку. Вместе с тем почва является одним из важнейших защитных, биохимических барьеров для ряда соединений на пути их миграции в грунтовые воды и растения. Поэтому химический анализ почв и зеленых насаждений является основной частью биогеохимических исследований урбоэкосистем. Изучение ТМ в системе «почва – растение» позволяет оценить характер их миграции и перераспределения, накопления в отдельных органах растений и горизонтах почв, выявить структурные и функциональные особенности различных типов почв и видов растений в самоочищающей способности урбоэкосистем.

Комплексная оценка и мониторинг изменений диагностических показателей свойств почвенно-растительного покрова, происходящих под влиянием антропогенно-техногенного воздействия, позволят установить их оптимальные и критические значения для поддержания нормального функционирования урбоэкосистем и применить своевременные меры по поддержанию их устойчивости и восстановлению.

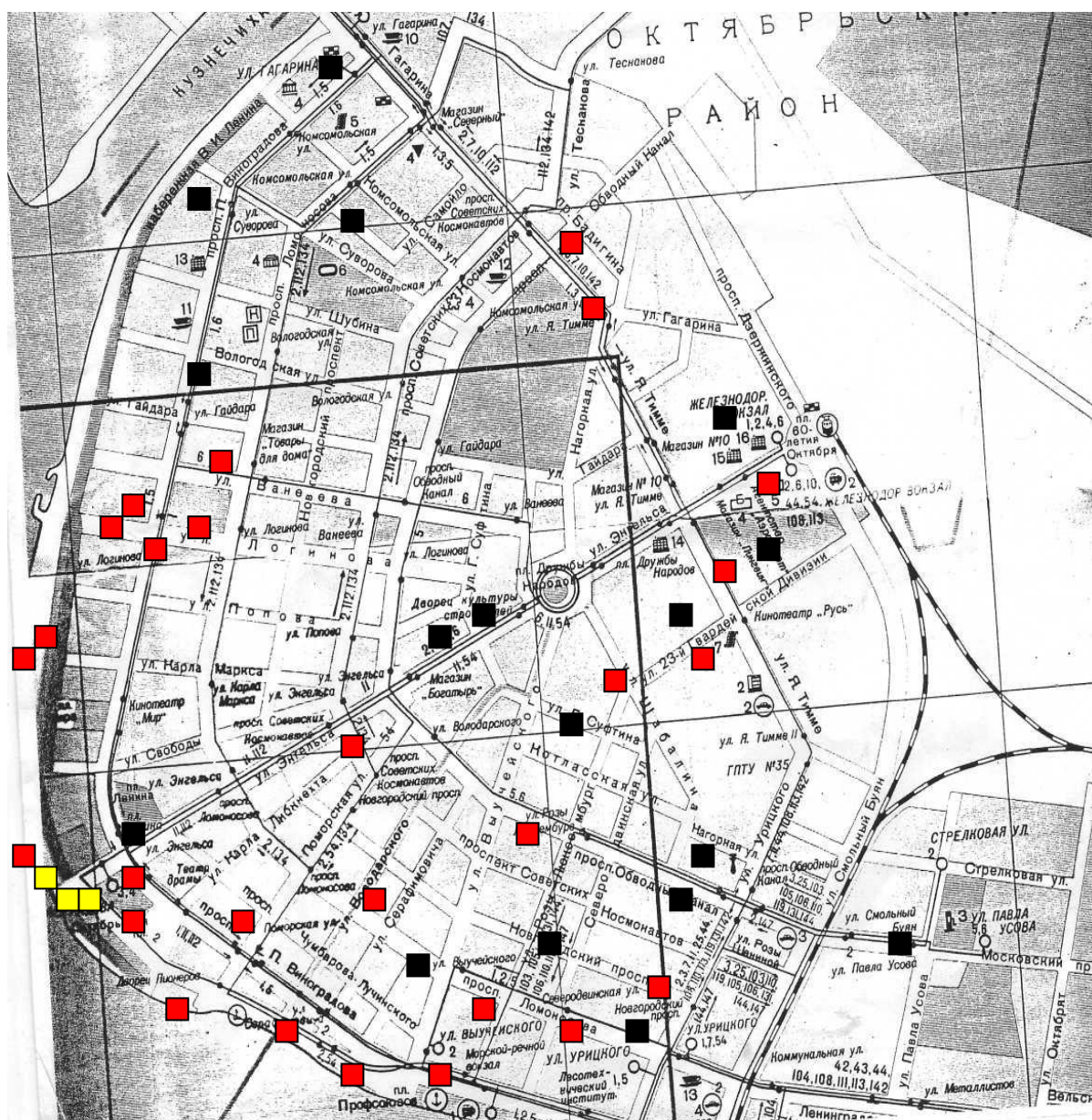
Поэтому основная цель работы – оценить экологическое состояние почвенно-растительного покрова селитебного ландшафта города Архангельска в отношении степени загрязненности тяжелыми металлами; рассмотреть закономерности их миграции и аккумуляции в почвенно-растительном покрове урбоэкосистем Севера.

Объекты и методы исследований

Объектами исследований являлись основные типы городских почв, наиболее часто встречающиеся на территории города Архангельска: реплантоземы, урбаноземы, культуроземы (рисунок 1). Подбирались наиболее распространенные древесные растения, произра-

стающие на соответствующих пробных площадях (береза, ива, тополь), а также растения на почвенного покрова (смешанный образец разнотравья).

В качестве контроля (эталона сравнения) для городских почв и растений была выбрана природная дерновая маломощная легкосуглинистая почва, сформировавшаяся на суходольном лугу в районе деревни Бабонегово Приморского района Архангельской области, и растения, произрастающие на данной территории. Такой выбор был обусловлен тем, что процесс образования почв в городе Архангельске протекает по дерновому, а не по подзолообразовательному типу, характерному для региона.



■ – урбанозем; ■ – реплантозем; ■ – культуросзем

Рисунок 1. Схема расположения пробных площадей, заложенных на территории селитебного ландшафта города Архангельска

В городе на участках, отличающихся по времени формирования почв, заложено 58 пробных площадей. С них для изучения пространственной вариабельности некоторых показателей свойств почв были взяты смешанные образцы из верхнего слоя (0–20 см) [2, 1984], а в 35 из них заложены почвенные разрезы. Их описание проводили согласно общепринятым

методикам с учетом рекомендаций по изучению городских почв [11, 1997]. Отбор, хранение и транспортировка проб, отобранных для анализа на ТМ, осуществлялись в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84.

У древесных растений отбирали образцы листьев, ветвей (первого и второго года), коры и корней. Листья и ветви отбирались на высоте 1,5–2,0 м по периметру кроны. Пробы коры отбирались с нескольких близстоящих деревьев на высоте 1,0–1,5 м по окружности ствола. Толщина стружки 2–3 мм. Деревья для отбора проб выбирались по возможности одновозрастные, здоровые. Содержание Pb, Zn, Cu, Hg, Cd в образцах почв и растений определяли атомно-абсорбционным методом, а Fe, Ni, Co, Mn – колориметрически. Для определения подвижных форм ТМ использовали кислотную (Fe, Ni, Co, Mn, Pb) и ацетатно-аммонийную буферную (Cu, Zn) вытяжки.

Исследование химических свойств было проведено на образцах почв и растений в 2–5 повторностях. Полученные данные статистически обработали в программе Excel. Для исследования структуры взаимосвязей изучаемых параметров использовали корреляционный анализ.

Оценка уровня загрязнения почвенно-растительного покрова ТМ проводилась по показателям, разработанным при сопряженных биогеохимических исследованиях окружающей среды городов с действующими источниками загрязнения. Такими показателями являются коэффициент концентрации химического вещества (K_k) и суммарный показатель загрязнения (СПЗ), поскольку антропогенные аномалии чаще всего имеют полиэлементный состав.

Коэффициент концентрации определяется отношением фактического содержания определяемого вещества в точке опробования к его содержанию в аналогичной природной среде на фоновом участке:

$$K_k = \frac{C_i}{C_\phi},$$

где C_i – содержание химического элемента в точке опробования; C_ϕ – среднее содержание элемента в аналогичной среде на фоновом участке.

Суммарный показатель загрязнения представляет собой сумму превышений коэффициентов концентраций химических элементов, накапливающихся в аномалиях. Расчет проводили по следующей формуле [10, 1990]:

$$\text{СПЗ} = \sum_{i=1}^n K_{Ci} - (n-1),$$

где СПЗ – суммарный показатель загрязнения; n – число определяемых ингредиентов; K_{Ci} – коэффициент концентрации металла (отношение содержания металла в почве аномалии к фоновому содержанию).

Оценку загрязнения почв города ТМ осуществляли согласно следующей градации [6, 1998; 3, 2003]:

СПЗ > 128 – чрезвычайно опасное загрязнение;

СПЗ = 32–128 – опасное загрязнение;

СПЗ = 16–32 – умеренно опасное загрязнение;

СПЗ < 16 – допустимое загрязнение.

Учитывая, что основное внимание при почвенно-геохимическом мониторинге следует уделять не валовым, а подвижным формам ТМ, так как они формируют резерв питания растений, была произведена оценка степени подвижности ТМ в почвах города Архангельска. Расчет коэффициента подвижности проводился по следующей формуле [3, 2003]:

$$K_{\Pi} = \frac{C_{\Pi\Phi}}{C_{В\Phi}} \cdot 100\%,$$

где $C_{\Pi\Phi}$ – содержание подвижной формы металла в почве, мг/кг; $C_{В\Phi}$ – содержание валовой формы металла в почве, мг/кг.

Для установления видовой специфики растений и влияния условий их произрастания (тип почвы и ее свойства) на интенсивность поглощения биофильных элементов и ТМ был использован коэффициент биогеохимического поглощения (КБП) [12, 2005]:

$$КБП = \frac{C_P}{C_{\Pi}},$$

где C_P – содержание элемента в растении, мг/кг; C_{Π} – содержание подвижной формы элемента в почве, мг/кг.

Содержание тяжелых металлов в почвах

Определение уровня загрязнения почв города Архангельска провели, анализируя данные о содержании в верхнем слое (0–20 см) валовых форм ТМ первого класса опасности (свинца (Pb), кадмия (Cd), ртути (Hg) и цинка (Zn)), второго класса (меди (Cu)) и рассчитав на их основе суммарный показатель загрязнения для исследованных участков.

Оценка валового содержания ТМ в поверхностном слое почв города Архангельска показала наличие полиэлементного загрязнения – в городских почвах средние концентрации химических элементов (Cu, Zn, Pb, Hg) выше значений для естественных почв (таблица 1).

Степень превышения уровня содержания химических элементов в городских почвах над таковым в естественных почвах позволяет оценить коэффициент концентрации (K_k) (рисунк 2). Кривые коэффициентов концентрации показывают, что в реплантоземах (почвах молодых районов города) преобладает загрязнение Pb, в урбаноземах – Pb и Hg, а в культуроземах к этим загрязнителям добавляется еще и Zn.

В почвах города Архангельска валовое содержание ртути (Hg) в верхнем слое (0–20 см) на большинстве из исследованных пробных площадей и точечных участков не выходит за рамки ПДК (2,1 мг/кг), но в культуроземах и урбаноземах ее содержание гораздо выше, чем в реплантоземах. В отдельных случаях оно доходит до 4,05–4,90 мг/кг, что составляет 1,9–2,3 ПДК. Минимальное содержание валовых форм Hg (< 0,075 мг/кг) обнаружено в естественных почвах, опесчаненных урбаноземах и песчаных реплантоземах центральной части города Архангельска.

Таблица 1

Среднее содержание валовых форм ТМ (мг/кг) в городских и естественных почвах и предельно допустимые их концентрации (ПДК)

Химический элемент	Естественная почва n = 2	Культурозем n = 2	Урбанозем	Реплантозем	Урбаноземы ЮВАО Москвы [8, 2007]	Почвы Санкт-Петербурга [12, 2005]	Почвы Ленинградской области [12, 2005]	ПДК по ЦИНАО, мг/кг
Pb	14 ± 1,4	106 ± 45	76 ± 33 (n = 20)	59 ± 14 (n = 17)	37	223	19	38 (32*)
Cu	15 ± 1	39 ± 11	48 ± 14 (n = 9)	39 ± 7 (n = 9)	59	120	18	53 (100**)
Zn	73 ± 12	770 ± 246	149 ± 18 (n = 9)	109 ± 24 (n = 9)	208	774	43	87 (300**)
Hg	< 0,075	0,92 ± 0,10	0,50 ± 0,08 (n = 9)	0,15 ± 0,01 (n = 9)	–	0,8	0,0	2,1* (2**)
Cd	< 1	< 1	< 1 (n = 9)	< 1 (n = 9)	2	1,5	0,2	0,6 (3**)
СПЗ	–	30	14	7	–	–	–	–

Примечание: n – количество участков исследования; СПЗ – суммарный показатель загрязнения; * – [7, 1991]; ** – [14, 1980].

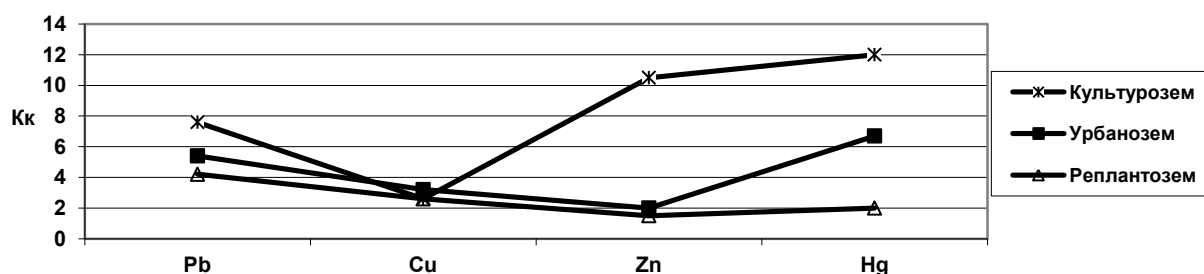


Рисунок 2. Средние показатели коэффициентов концентрации ТМ в различных типах почв города Архангельска

Концентрации кадмия (Cd) на всех исследуемых типах почв менее 1 мг/кг, однако в отдельных случаях содержание валовых форм Cd в почвах составило 1,2 и 1,6 мг/кг, что в 2–2,7 раз превышает его ориентировочно допустимую концентрацию (0,6 мг/кг).

Содержание валовых форм меди (Cu) и цинка (Zn) в верхнем слое городских почв (0–20 см) на разных участках изменяется в широких пределах от 9 до 170 и от 27 до 770 мг/кг соответственно. Содержание валовых форм Cu (53 мг/кг) в верхнем горизонте почв 25 % пробных площадей, среди которых встречаются как урбаноземы, так и реплантоземы, составило 1,1–3,2 ПДК. Валовое содержание Zn превышает ПДК (87 мг/кг) в 1,1–8,8 раз более чем на половине исследованных участков. Максимальных значений (770 и 238 мг/кг) содержание валовых форм Zn достигло в верхнем слое культурозема Петровского парка – самой старой по длительности антропогенного и техногенного воздействия почве, а также в реплантоземе, расположенном вблизи берега Северной Двины и железнодорожного полотна.

Содержание валовых форм свинца (Pb) в почвах города Архангельска на всех исследуемых участках превышает его содержание в естественных почвах в 1,3–73 раза, а на 55 % пробных площадей превышает ПДК (38 мг/кг) в 1,1–27 раз.

В целом, оценка полученных концентраций химических элементов в почвах города по шкале опасности загрязнения почв, составленной на основе величин показателя суммарного загрязнения (СПЗ) [10, 1990], выявила допустимый уровень загрязнения (СПЗ от 1–15 услов-

ных единиц) урбаноземов и реплантоземов и умеренно опасный (СПЗ от 16–32 условных единиц) культуроземов.

Верхний слой почв по периферии города Архангельска в большей степени загрязнен ТМ (рисунки 2, 3, 4). Это исторически центральный район города и часть Привокзального района (проспекты Ломоносова и Дзержинского), где часто встречаются глинистые почвы и торфяные реплантоземы. Концентрическое расположение зон разного уровня содержания ТМ, возможно, связано с двумя причинами: возрастом застройки и с подстилающими грунтами. В центре современного города Архангельска лежат торфа, достигающие глубины более 12 м. Они обеспечивают высокий миграционный сток, который усиливается за счет песчаной отсыпки, нередко мощностью до 4 м и более, осуществляемой при строительстве на торфах. По периферии города расположена глинистая морена, снижающая промывание почв и повышающая концентрацию ТМ в поверхностных слоях почвенного покрова [4, 2000; 5, 2006]. Так, по исследованиям А. В. Никитина, коэффициент фильтрации естественных торфов в центре города Архангельска составляет 2,9–5,1 м/сут. В то же время этот показатель для песчаных грунтов в среднем составляет 10–15 м/сут, а для глинистых – менее 0,001 м/сут.

Помимо оценки загрязнения почв валовыми формами ТМ при почвенно-геохимическом мониторинге необходимо уделять внимание содержанию в почвах их подвижных форм. В связи с этим нами была произведена оценка степени подвижности ТМ в почвах города Архангельска. Результаты анализов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Содержание подвижных форм ТМ (мг/кг) в городских и естественных почвах и предельно допустимые их концентрации (ПДК)

Элемент	Естественная почва n = 2	Культурозем n = 2	Урбанозем	Реплантозем	Урбаноземы ЮВАО Москвы [8, 2007]	Почвы Европейской части России [12, 2005]	ПДК, мг/кг [7, 1991]
Pb	0,40 ± 0,05	0,80 ± 0,16	1,30 ± 0,26 n = 25	1,40 ± 0,78 n = 14	5,44	–	6,0
Cu	1,40 ± 0,25	1,80 ± 0,23	3,40 ± 0,75 n = 21	3,00 ± 1,83 n = 29	5,17	1,0 – 15,0	3,0
Zn	4,60 ± 0,92	18,60 ± 1,86	19,60 ± 2,94 n = 7	27,60 ± 6,35 n = 7	71,03	≤ 3,0	23,0
Fe (г/кг)	12,60 ± 2,77	22,00 ± 2,86	16,90 ± 6,25 n = 29	12,50 ± 2,51 n = 18	–	–	–
Ni	0,20 ± 0,02	1,00 ± 0,13	1,20 ± 0,53 n = 15	0,89 ± 0,64 n = 12	2,41	–	4,0
Co	0,40 ± 0,04	1,70 ± 0,29	1,10 ± 0,57 n = 29	1,20 ± 0,14 n = 19	0,14	0,3 – 4,7	5,0
Mn	20,00 ± 2,42	41,50 ± 6,22	26,00 ± 8,84 n = 9	11,70 ± 1,76 n = 5	29,83	–	140,0

Примечание: n – количество участков исследования.

Содержание подвижных форм Pb на всех исследованных участках не превышает ПДК (6 мг/кг). Содержание подвижных форм Cu на 50 % урбаноземов и 25 % реплантоземов составляет 5–10 ПДК, а Zn на 50 % урбаноземов и 70 % реплантоземов – 1,2–2,6 ПДК. Однако почвы города обеднены подвижными формами кобальта (Co), никеля (Ni) и марганца (Mn), которые являются не только техногенными поллютантами, но необходимыми для растений

микроэлементами. В культуроземах отмечаются максимальные концентрации подвижных форм Fe, Co, Mn, а в реплантоземах – Pb, но на большинстве исследованных участков их содержание значительно ниже ПДК.



Рисунок 2. Содержание валовых форм свинца в почвах города Архангельска (Pb, мг/кг почвы)

По степени подвижности (K_d) ТМ в урбаноземах и реплантоземах можно расположить в ряд $Zn > Cu > Pb$, а в естественных почвах и культуроземах – $Cu > Zn > Pb$. Наибольшей подвижностью данные ТМ обладают в реплантоземах, наименьшей – в культуроземах. Такая тенденция в изменении степени подвижности ТМ связана с тем, что Cu и Pb близки по химическим свойствам и тяготеют к образованию специфических связей с компонентами почвенного поглощающего комплекса (в том числе координационного типа) и образуют с гуминовыми кислотами более прочные комплексы, чем цинк, который связывается неспецифически и более подвижен [12, 2005].



Рисунок 3. Содержание валовых форм цинка в почвах города Архангельска (Zn, мг/кг почвы)



Рисунок 4. Содержание валовых форм меди в почвах города Архангельска (Cu, мг/кг почвы)

Миграция тяжелых металлов в почвах

Наряду с определением уровня загрязненности ТМ верхнего 20-сантиметрового слоя почв города Архангельска было проведено исследование их распределения по горизонтам 25 почвенных профилей разных типов.

Анализ полученных данных показал, что загрязнение валовыми формами ТМ (Pb, Cd, Hg, Cu, Zn) разных типов почв города Архангельска, как правило, имеет гумусово-аккумулятивный характер, то есть максимальное их количество сосредоточено на биогеохимических сорбционных барьерах в верхних слоях почвы, наиболее богатых гумусом. Далее оно резко снижается или изменяется постепенно в зависимости от типа загрязняющего вещества, гранулометрического состава почв, их обеспеченности органическим веществом и других свойств. Однако подобный вариант распределения ТМ в почвах города Архангельска не единственный. Встречаются профили, где с глубиной происходит постепенное увеличение содержания одного или нескольких ТМ. Может наблюдаться два их максимума. Во второй

группе оказались почвы района современной застройки (60–80-х годов) с маломощными профилями, состоящими из горизонтов легкого гранулометрического состава, образованные на торфяниках разной мощности.

В естественных почвах не наблюдается значительных колебаний содержания ТМ по профилю. Кроме того, в отличие от городских почв наблюдается увеличение их накопления с глубиной. По нашему мнению, это явление прежде всего связано со значительно меньшим уровнем азротехногенной нагрузки, соответственно, верхние горизонты естественных почв имеют более кислую реакцию среды, по сравнению с городскими почвами. В таких условиях повышается растворимость соединений большинства ТМ, а значит, и миграционная способность их увеличивается. Кроме того, низкое содержание ТМ в верхнем гумусированном слое и преимущественное их накопление в нижних горизонтах объясняется отсутствием на контрольном участке древесных и кустарниковых форм растительности (луг), что препятствует перекачке ТМ из почвообразующих пород в наземную часть растений, а затем и в верхние горизонты почвы. В данном случае можно говорить о меньшей контрастности биогеохимического барьера, связанного с образованием растительной биомассы. Исключение составляет Zn, содержание которого в верхнем горизонте несколько выше. В отличие от других металлов большая его часть в растениях связана с легкоразрушающимися тканями и быстро удаляется из растительных остатков.

Все почвенные профили (естественной почвы и почв города) имеют достаточно хорошую обеспеченность подвижной Cu, но низкую – другими ТМ, в том числе и Zn (рисунки 5, 6).

Высокое содержание подвижных форм Cu в городских почвах обусловлено высоким уровнем pH, при котором устойчивость мобильных комплексов этого элемента с органическим веществом возрастает. Следует отметить, что содержание подвижных форм ТМ на большинстве проанализированных участков изменяется параллельно их валовым концентрациям. Однако на реплантоземах по сравнению с другими типами городских почв увеличивается доля подвижных форм Cu и Zn. Это указывает на зависимость их содержания от нескольких факторов: степени сформированности почв (накопление ТМ в них происходит с течением времени), наличия в них органического вещества (ТМ образуют стабильные комплексы с почвенным гумусом) и подвижных форм фосфора, с которыми ТМ образуют труднорастворимые соединения.



Горизонты почвенных профилей

	Естественная почва ПП 9		Культурозем ПП 35		Урбанозем ПП 61		Реплантозем ПП 44	
■	Ад $\frac{1-2}{2 \text{ см}}$	$\frac{14,0 \pm 0,8}{1,40 \pm 0,02}$	Ад $\frac{0-8}{8 \text{ см}}$	$\frac{39,0 \pm 1,1}{2,10 \pm 0,01}$	Uha1 $\frac{4-11}{7 \text{ см}}$	$\frac{84,0 \pm 1,6}{2,90 \pm 0,04}$	Uta2 $\frac{4-17}{13 \text{ см}}$	$\frac{16,0 \pm 0,7}{2,10 \pm 0,01}$
■	А1 $\frac{2-14}{12 \text{ см}}$	$\frac{15,0 \pm 0,2}{1,30 \pm 0,01}$	А1 $\frac{8-30}{22 \text{ см}}$	$\frac{26,0 \pm 1,2}{1,90 \pm 0,02}$	(Uh+G)a2 $\frac{11-30}{19 \text{ см}}$	$\frac{40,0 \pm 1,0}{2,10 \pm 0,02}$	Uihsa1 $\frac{17-23}{6 \text{ см}}$	$\frac{6,00 \pm 0,03}{1,90 \pm 0,01}$
■	В $\frac{14-41}{27 \text{ см}}$	$\frac{23,0 \pm 1,0}{2,00 \pm 0,02}$	В $\frac{30-53}{23 \text{ см}}$	$\frac{14,0 \pm 0,9}{1,00 \pm 0,01}$	Sha2 от 30 см	$\frac{5,03 \pm 0,03}{1,90 \pm 0,01}$	Usa2 $\frac{23-42}{19 \text{ см}}$	$\frac{5,10 \pm 0,03}{1,30 \pm 0,01}$
■	BC $\frac{41-47}{6 \text{ см}}$	$\frac{71,0 \pm 2,3}{3,50 \pm 0,06}$		н/д		н/д	Sa1 от 42 см	$\frac{5,05 \pm 0,02}{1,50 \pm 0,01}$

Примечание: столбцы и числитель показывают валовое содержание меди; области, ограниченные ломаной линией, и знаменатель – содержание подвижных форм меди.

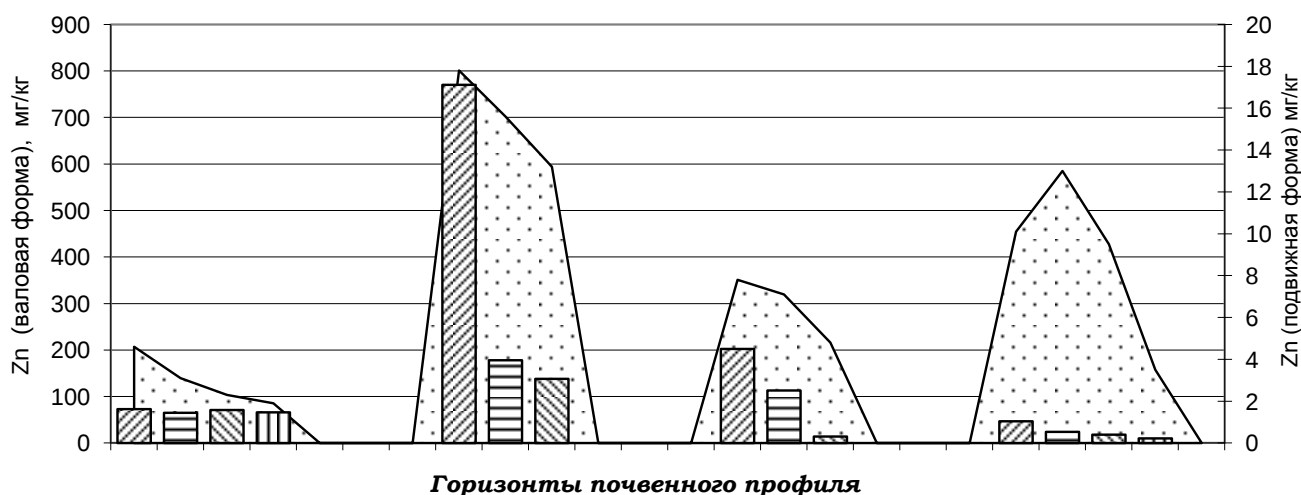
Рисунок 5. Распределение валовых и подвижных форм меди (Cu, мг/кг) по профилю различных типов почв города Архангельска

Содержание тяжелых металлов в системе «почва – растение»

Для выявления особенностей накопления ТМ в растениях города Архангельска и его пригорода было изучено содержание Cu, Zn, Pb, Ni, Co, Fe в растительном материале (фотосинтезирующей части): надземной части травянистой растительности, листьях кустарников (ива) и древесных растений (тополь и береза).

Результаты исследований показали, что травянистая растительность, листья ивы, березы и тополя в городе содержат высокие концентрации ТМ (таблица 3). В листьях деревьев и надземной части разнотравья как в естественных условиях, так и в городе ряд накопления ТМ выглядит следующим образом: $Ni < Co \approx Pb < Cu < Fe < Zn$. Однако в городских условиях растения накапливают значительно большее количество поллютантов, чем в естественных местообитаниях.

Для сравнения степени накопления ТМ растениями города и естественных местообитаний был рассчитан коэффициент концентрации (K_k) для листьев березы и наземной части разнотравья. В городских условиях листья березы активно накапливают Pb, Ni, Zn и Cu, а в надземной части трав интенсивно аккумулируются Fe, Co, Ni и Zn по сравнению с растениями пригорода (рисунок 7). Повышенное биопоглощение Zn и Ni обусловлено биофильностью данных элементов и безбарьерным характером их поглощения большинством видов растений.



	Естественная почва ПП 9		Культурозем ПП 35		Урбанозем ПП 61		Реплантозем ПП 44	
■	Ад $\frac{1-2}{2\text{см}}$	$\frac{73,0 \pm 1,4}{4,60 \pm 0,02}$	Ад $\frac{0-8}{8\text{см}}$	$\frac{770,0 \pm 2,3}{17,81 \pm 1,02}$	Uha1 $\frac{4-11}{7\text{см}}$	$\frac{202,0 \pm 2,1}{7,80 \pm 0,30}$	Uta2 $\frac{4-17}{13\text{см}}$	$\frac{47,0 \pm 0,9}{10,15 \pm 0,40}$
■	А ₁ $\frac{2-14}{12\text{см}}$	$\frac{65,2 \pm 1,0}{3,10 \pm 0,02}$	А ₁ $\frac{8-30}{22\text{см}}$	$\frac{178,0 \pm 1,9}{15,63 \pm 1,10}$	(Uh+G)a2 $\frac{11-30}{19\text{см}}$	$\frac{113,3 \pm 1,6}{7,17 \pm 0,31}$	Uihsa1 $\frac{17-23}{6\text{см}}$	$\frac{24,0 \pm 0,8}{13,00 \pm 0,60}$
■	В $\frac{14-41}{27\text{см}}$	$\frac{71,2 \pm 1,0}{2,30 \pm 0,01}$	В $\frac{30-53}{23\text{см}}$	$\frac{138,0 \pm 1,4}{13,20 \pm 0,90}$	Sha2 от 30 см	$\frac{14,3 \pm 0,9}{4,82 \pm 0,10}$	Usa2 $\frac{23-42}{19\text{см}}$	$\frac{18,0 \pm 0,8}{9,52 \pm 0,11}$
■	BC $\frac{41-47}{6\text{см}}$	$\frac{66,0 \pm 1,1}{1,91 \pm 0,01}$		н/д		н/д	Sa1 от 42 см	$\frac{10,2 \pm 0,8}{3,50 \pm 0,08}$

Примечание: столбцы и числитель показывают валовое содержание цинка; области, ограниченные ломаной линией, и знаменатель – содержание подвижных форм цинка.

Рисунок 6. Распределение валовых и подвижных форм цинка (Zn, мг/кг) по профилю различных типов почв города Архангельска

Следует отметить, что содержание ТМ в зеленых частях растений города Архангельска не превышает ПДК, которые составляют, по данным разных авторов, для Cu – 15–30 мг/кг, для Zn – 150–300 мг/кг, для Ni – 0,5–3 мг/кг и для Pb – 0,2–20 мг/кг [9, 1998; 13, 1985]. Исключение составляют листья тополя, которые накапливают несколько больше Cu. Активно накапливается тополем и Zn, то есть данный вид наиболее эффективно выполняет средоочищающие функции.

На поступление ТМ в растения в значительной степени влияют гранулометрический состав почв, их гумусное состояние и степень сформированности. Так, содержание Fe и Zn неодинаково в фотосинтезирующих органах растений на разных типах городских почв. Травянистая растительность по интенсивности накопления этих металлов может быть расположена в следующем ряду типов почв: культурозем < урбанозем < реплантозем. Листья древесных растений имеют иную тенденцию накопления тех же металлов. Ряд накопления Fe ими несколько меняется: урбанозем < культурозем < реплантозем, а в отношении накопления Zn он имеет обратный порядок: реплантозем < культурозем < урбанозем. Содержание всех остальных металлов (Ni, Co, Pb, Cu) в фотосинтезирующих органах трав и древесно-кустарниковых пород (береза, ива, тополь) на разных типах почв отличается незначительно.

Таблица 3

Содержание ТМ (мг/кг) в листьях древесных растений и надземной части трав

Растение	Химический элемент					
	Cu	Zn	Ni	Fe	Co	Pb
Городская среда обитания						
Разнотравье	11,2 ± 1,1	116,6 ± 22,1	0,74 ± 0,14	94,9 ± 63,5	3,40 ± 0,82	1,6 ± 0,4
Ива	11,0 ± 1,7	88,7 ± 10,6	0,90 ± 0,35	122,4 ± 74,6	2,72 ± 0,76	3,4 ± 1,2
Береза	10,8 ± 2,4	121,7 ± 39,9	0,73 ± 0,35	24,1 ± 9,3	1,54 ± 0,27	2,9 ± 1,2
Тополь	33,2 ± 6,3	250,1 ± 119,2	0,27 ± 0,14	92,8 ± 54,8	2,40 ± 0,55	1,7 ± 0,5
Береза, по данным Т. А. Гурьева (1996)	6,0	–	2,7	282,0	–	4,5
Тополь, по данным М. Д. Уфимцевой (2005)	28,39	146,32	4,91	418,33	–	8,78
Растение	Химический элемент					

	Cu	Zn	Ni	Fe	Co	Pb
Естественная среда обитания						
Разнотравье	$9,2 \pm 2,1$	$24,3 \pm 13,6$	$0,075 \pm 0,026$	$22,6 \pm 4,5$	$0,74 \pm 0,23$	$0,78 \pm 0,15$
Береза	$0,63 \pm 0,35$	$12,8 \pm 9,1$	$0,12 \pm 0,05$	$20,7 \pm 11,5$	$0,90 \pm 0,36$	$0,84 \pm 0,36$

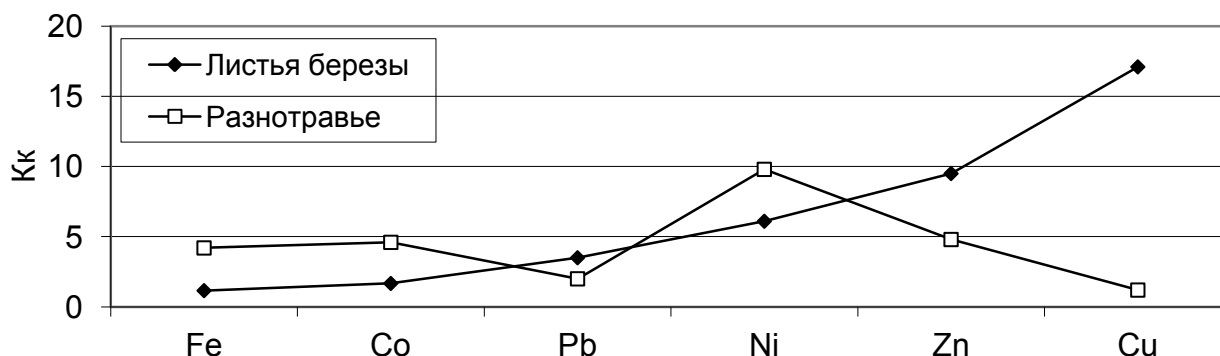


Рисунок 7. Коэффициенты концентраций (Кк) ТМ для травянистой растительности и листьев березы города Архангельска

Основным источником формирования микроэлементного состава растений считается запас обменных форм ТМ в почве. Поэтому для оценки интенсивности поглощения ТМ городскими растениями был выбран коэффициент биогеохимического поглощения (КБП).

Интенсивность загрязнения среды отражается аккумуляцией в листьях Pb, Cu и Zn. Так, средняя величина КБП Pb для листьев березы в естественных условиях составляет 0,48, Cu – 0,45, Zn – 2,79, а в городе интенсивность поглощения этих металлов увеличивается в 3–5, 6–8 и 1,3–2 раза соответственно. Аккумулирующая способность по отношению к Pb, Cu и Zn у листьев исследованных деревьев на всех типах почв снижается в ряду: тополь > береза > ива. По интенсивности поглощения Fe изученные древесные породы образуют ряд: тополь > ива > береза. Накопление Ni и Co в листьях исследованных деревьев зависит от типа почв, на которых они произрастают (таблица 4).

Интенсивность поглощения ТМ фотосинтезирующими органами растений в городе часто значительно снижается или увеличивается по сравнению с естественными условиями местообитания.

ТМ по интенсивности их поглощения травянистой растительностью в естественных условиях можно расположить в возрастающей последовательности: Fe < Ni < Pb < Co < Zn < Cu. В условиях города возрастает интенсивность поглощения травами Fe и Zn, накопление Co и Cu снижается по сравнению с пригородом. Листья деревьев в естественных условиях накапливают ТМ следующим образом: Fe < Cu < Pb < Ni < Co < Zn. В городских условиях величины КБП ТМ листьями растений увеличиваются в ряду Fe < Ni < Co < Pb < Cu < Zn, то есть под действием антропогенного пресса увеличивается интенсивность накопления ими Cu и Pb и снижается потребление Ni и Co.

Коэффициенты биогеохимического поглощения ТМ для трав и листьев деревьев

	Pb	Cu	Zn	Fe*	Ni	Co
Естественная почва						
Разнотравье	0,55	7,36	6,1	1,79	0,38	1,85
Береза	0,48	0,45	2,79	1,64	1,2	2,25
Культурозем						
Разнотравье	0,76	5,76	8,44	2,23	0,38	1,43
Тополь	2,36	7,5	11,39	2,66	1,11	1,38
Урбанозем						
Разнотравье	1,92	3,84	8,71	4,54	0,58	2,25
Ива	2,15	3,24	4,53	1,5	0,75	1,1
Береза	2,3	3,52	5,77	1,16	0,54	1,64
Тополь	2,31	5,12	14,90	1,69	1,67	2,00
Реплантозем						
Разнотравье	1,78	3,48	7,60	11,34	0,96	3,66
Ива	2,34	2,67	3,27	9,79	0,79	2,1
Береза	1,71	2,87	3,70	9,70	0,90	1,25
Тополь	2,36	4,77	4,06	10,20	1,24	1,67
По данным О. Н. Горде- евой (2006)	2,3	1,7	7,0	–	1,5	2,1

Примечание: * – $n \cdot 10^{-3}$.

Интенсивность поглощения железа (Fe) зависит от типа почв, на которых произрастают древесные растения. На реплантоземах этот элемент аккумулируется максимально листьями всех исследованных деревьев, а на культуроземах и урбаноземах величины его КБП близки к таковым на естественной почве и зависят от вида растения.

Выводы

Исследования показали, что для почв города Архангельска характерно полиэлементное загрязнение. Почвы селитебного ландшафта содержат большие количества ТМ, чем естественные почвы. Качественные и количественные характеристики загрязнения почв ТМ зависят от их типа, гранулометрического состава и степени сформированности. Наибольшее загрязнение городских почв валовыми формами Pb, Cu и Zn отмечено в старой части города Архангельска и связано с типом подстилающих грунтов. Почвы Архангельска имеют высокую обеспеченность подвижными формами Cu и Zn, но испытывают дефицит актуальных запасов Co, Ni и Mn. Подвижность ТМ зависит от типа почв – реплантоземы имеют наибольшие значения коэффициента подвижности (K_n), культуроземы – наименьшие.

Распределение валовых и подвижных форм ТМ по профилю почв чаще всего имеет гумусово-аккумулятивный характер, то есть миграция их ограничена сорбционным биогеохимическим барьером. Степень подвижности ТМ в профилях различных типов почв неодинакова: реплантоземы (слабо сформированные почвы легкого гранулометрического состава) содержат значительно большие количества подвижных форм ТМ по сравнению с наиболее сформированными и гумусированными урбаноземами и культуроземами.

Накопление ТМ в фотосинтезирующих органах растений не зависимо от условий произрастания (типа почв) происходит в ряду $Fe < Ni < Co < Pb < Cu < Zn$, но в городе более интенсивно, чем в естественных условиях. В условиях атмосферного загрязнения значительно увеличивается степень поглощения деревьями Cu, Zn и Pb, а травами – Ni, Zn и Fe.

Аккумуляция ТМ растениями зависит от типа почв и содержания в них актуальных запасов этих элементов. На реплантоземах, содержащих большее количество подвижных форм Cu, Zn, зеленые части растений накапливают большие их количества, а на культурозе-

мах – наименьшие. Накопление Zn и Cu растениями зависит от их вида. Эти элементы более активно накапливаются листьями тополя.

Накопление ТМ растениями зависит от гранулометрического состава и степени сформированности почв. При отсутствии контрастных сорбционных барьеров на почвах легкого гранулометрического состава (реплантоземы) древесная растительность накапливает максимальное количество поллютантов.

Исследование содержания и миграции ТМ в почвенно-растительном покрове селитебного ландшафта города Архангельска позволяет дать предварительные рекомендации по поддержанию и улучшению их качества:

- необходима организация в городе мониторинга за состоянием почвенного покрова как основной базовой компоненты экосистем;
- необходимо усилить внимание к подбору ассортимента растений, применяемых при проведении официального озеленения, с учетом их биоэкологических особенностей, устойчивости к аэротехногенному загрязнению и механизмов функционирования в измененных условиях природно-техногенного комплекса урбоэкосистем.

Литература

1. Гордеева О. Н. Макроэлементы в почвах и растениях техногенных и фоновых ландшафтов южного Приангарья // Проблемы устойчивого функционирования водных и наземных экосистем: мат. междунауч. конф. (9–12 октября 2006 г., Ростов-на-Дону). Ростов-на-Дону, 2006. С. 88–90.
2. ГОСТ 17.4.4.02–84 «Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки почв для химического, бактериологического и гельминтологического анализа». Постановление Госстандарта СССР от 19.12.1984 № 4731.
3. Мажайский Ю. А., Торбатов С. А., Дубенок Н. Н. Агроэкология техногенно загрязненных ландшафтов. Смоленск, 2003. 384 с.
4. Невзоров А. Л. Особенности взаимодействия техносферы и геологической среды Архангельска // Поморье в Баренц регионе на рубеже веков: экология, экономика, культура: мат. международной конф. Архангельск, 2000. С. 164–165.
5. Никитин А. В. Геотехническое обеспечение проектирования объектов городской инфраструктуры на заторфованных основаниях: Автореф. дис. канд. техн. наук. Пермь, 2006. 23 с.
6. Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 1997 год. Минприрода // Зеленый мир. 1998. № 20. Специальный выпуск. 30 с.
7. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов и мышьяка в почвах (Дополнение № 1 к перечню ПДК и ОДК № 6229-91): Гигиенические нормативы. М.: Информационно-издательский центр Госкомсанэпиднадзора России. 8 с.
8. Пляскина О. В. Особенности загрязнения тяжелыми металлами городских почв Юго-Восточного административного округа г. Москвы: Автореф. дис. канд. б. н. М., 2007. 26 с.
9. Прохорова Н. В., Матвеев Н. М., Павловский В. А. Аккумуляция тяжелых металлов ди-

- корастущими и культурными растениями в лесостепном и степном Поволжье. Самара: Самар. ун.-т, 1998. 97 с.
10. Сает Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
 11. Строганова М. Н., Мягкова А. Д., Прокофьева Т. В. Городские почвы: генезис, классификация, функции // Почва, город, экология [Под ред. Г. В. Добровольского]. М.: Фонд «За экологическую грамотность», 1997. С. 15–88.
 12. Уфимцева М. Д., Терехина Н. В. Фитоиндикация экологического состояния урбогеосистем Санкт-Петербурга. СПб.: Наука, 2005. 339 с.
 13. Sauerbeck D. Schadstoffeinträge in den Boden durch Industrie, Besiedlung, Verkehr und Landwirtschaft (anorganische Stoffe) // VDLUFA: Schriftenreihe, Kongressband. 1985. S.-H. 16. S. 59–72.
 14. Klope A. Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehalte einiger Elemente in Kulturböden, Mitt // VDLUFA: Richwerte, 1980. Nr. 2. S. 9–11.

Рецензент – Коробов Владимир Борисович,
доктор географических наук.