

М. Д. Уфимцева¹, Н. В. Терехина²

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОЧВ ИСТОРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

¹ Журнал «Биосфера», Российская Федерация, 197110, Санкт-Петербург, ул. Б. Разночинная, 28

² Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

В статье на основе анализа содержания тяжелых металлов и Sr в урбаноэмах дается их эколого-геохимическая оценка для Центрального района Санкт-Петербурга. Основными загрязнителями урбаноэмов по средним значениям коэффициентов концентрации, представляющих собой отношение содержания элемента в почвенной пробе к фоновому содержанию, являются Zn_(11,5), Pb_(7,2), Cd_(4,3), Cu_(3,8). Их концентрации варьируют в пределах: Zn (193–1170 мг/кг), Pb (56,2–499 мг/кг), Cd (0,025–1,56 мг/кг), Cu (38,4–318 мг/кг). Суммарный показатель загрязнения для почв района, рассчитанный с учетом класса опасности тяжелых металлов, составляет 36,5 (максимальное значение показателя — 77), что характеризует опасную категорию загрязнения (к этой категории относится 48% отобранных проб). Факторным анализом выделено три группы элементов: первый фактор с вкладом 48,85% объединяет Cu, Zn, Pb, Cd, Ba; второй фактор с вкладом 16,67% объединяет Cr, Ni, Co; третий фактор с вкладом 12,69% объединяет Fe и Mn. Поступление этих элементов обусловлено разными причинами: первые две группы связаны с техногенным воздействием, третья группа больше связана с естественными процессами почвообразования. Sr не имеет сильных корреляционных связей с другими элементами, а его низкий показатель коэффициентов концентрации свидетельствует о том, что данный элемент нельзя рассматривать как загрязнитель. Основной причиной загрязнения почв, вероятно, является воздействие выбросов автотранспорта, хотя и не исключено локальное загрязнение урбаноэмов (внесение непроверенных почвогрунтов при реконструкции газонов, захоронение строительных материалов и др.). Пространственное распределение загрязнения носит очагово-диффузный характер, что является закономерностью для комплексного городского загрязнения. Библ. 21 назв. Ил. 5. Табл. 8.

Ключевые слова: Санкт-Петербург, Центральный район, тяжелые металлы, опасный уровень загрязнения почв.

ECOLOGICAL-GEOCHEMICAL ASSESSMENT OF SOIL CONDITION IN HISTORICAL CENTER OF ST. PETERSBURG

M. D. Ufimtseva¹, N. V. Terekhina²

¹ Journal «Biosphere», 28, ul. B. Raznochinnaya, St. Petersburg, 197110, Russian Federation

² St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

Ecological-geochemical assessment of Central district of St. Petersburg was made on the base of analysis of heavy metals content in urban soil. The main contaminants of urban soils determined by average coefficient of concentration, which is the element content in soil sample to background content ratio, are Zn_(11,5), Pb_(7,2), Cd_(4,3), Cu_(3,8). Their concentrations vary within: Zn (193–1170 mg/kg), Pb (56,2–499 mg/kg), Cd (0,025–1,56 mg/kg), Cu (38,4–318 mg/kg). Total index of contamination for soil, calculated taking into account hazard class of heavy metals, is 36,5 (the maximum value of the index being 77), which characterizes the hazardous category of contamination (this category refers to 48% of the samples). Factor analysis identified three groups of elements: first factor has contributed 48,85% and unites Cu, Zn, Pb, Cd, Ba; second factor has contributed 16,67% and unites Cr, Ni, Co; third factor has contributed 12,69% and unites Fe and Mn. Delivery of these elements is due to different reasons: the first two groups are associated with the antropogenic factor, the third group is more related to the natural processes of soil formation. Sr has no strong correlations with other elements, and its lowest coefficient of concentration suggests that this element can not be regarded as a contaminant. The main cause of soil contamination is likely to be the impact of vehicle emissions, although local contamination of urban soil (entering of untested soils in the reconstruction of lawns, waste building materials, etc.) can not be ruled out. The spatial distribution of contaminants is focal and diffuse, that being the rule for integrated urban contamination. Refs 21. Figs 5. Tables 8.

Keywords: St. Petersburg, Central district, heavy metals, dangerous level of contamination of soil.

Введение

Урбанизация на современном этапе стала устойчивой глобальной тенденцией развития человеческого общества. По данным ООН в городах проживает половина населения Земли. По прогнозу к 2030 г. эта величина составит 60%. В мире насчитывается 20 мегаполисов с населением до 10 млн и более человек. Это обуславливает актуальность комплексных исследований свойств функционирования городских и антропогенно-нарушенных почв, о чем убедительно свидетельствуют состоявшиеся пять международных конференций в Германии, Франции, Египте, Китае и США, посвященные указанным проблемам [1].

Урботехногенез является геохимическим фактором, определяющим экологическое состояние городской среды. В связи с этим особую актуальность приобретает оценка загрязнения почв и растений самого северного мегаполиса — Санкт-Петербурга и, в частности, его исторического центра, где сосредоточены наиболее значимые памятники культурного наследия прошлых эпох.

Конкретная характеристика экологического состояния урбогеосистем Центрального административного района (ЦР) имеет первостепенное значение для оценки здоровья проживающего в этих условиях населения, в особенности для здоровья детей дошкольного возраста [2], так как городские почвы, являясь депонирующим компонентом городского ландшафта, аккумулируют многие микроэлементы (МЭ), в том числе тяжелые металлы (ТМ). К ТМ, составляющим приоритетную группу загрязнителей городской среды, относятся химические элементы с атомной массой выше 50 атомных единиц (независимо от их плотности) или обладающие высокой плотностью, равной или большей плотности железа — 8 г/см³. В геохимии и биогеохимии термин тяжелые металлы рассматривается с учетом биологической активности и токсичности их концентраций для всех организмов, включая человека. Наиболее распространенными ТМ являются Cu, Zn, Ni, Co, Fe, Mn, Pb, Cr, Cd и др. Многие из них являются биофильными, т. е. необходимыми для нормального функционирования живых организмов элементами, но при существенном повышении их содержания в почве концентрации становятся токсичными.

Официально созданный в 1994 г. после слияния Дзержинского, Смольнинского и Куйбышевского районов, ЦР ведет свою историю от самых первых дней города на Неве. Создававшийся при Петре I и Екатерине II неповторимый архитектурный ансамбль в дальнейшем определил облик всего города. Став «золотым сердцем» Санкт-Петербурга, ЦР сосредоточил на своей территории все знаменитые городские достопримечательности, учреждения культуры, образования, посольства иностранных государств и др.

ЦР занимает площадь 1720 га, что составляет 1,2% от территории города. Однако это самый густозаселенный район, в котором по данным последней переписи населения (2010) проживает 214 525 человек. ЦР практически не имеет веса в промышленности Петербурга, но несколько имеющихся предприятий являются знаковыми в своих областях: прядильно-ниточный комбинат имени С. М. Кирова; галантерейное объединение имени Бебеля; мебельное объединение «Нева», автобаза на ул. Короленько, ТЭЦ на Синопской набережной и промзона вдоль набережной Обводного канала. ЦР имеет хорошо развитую транспортную инфраструктуру. Существенным недостатком ЦР, осложняющим экологическую обстановку, является самая высокая

в городе плотность населения при недостаточном его озеленении, не удовлетворяющей норме ВОЗ, которая составляет 50 м² на человека. Вышеизложенное свидетельствует о необходимости проведения комплексных эколого-геохимических исследований ЦР и анализ их результатов, характеризующих конкретную экологическую обстановку в районе.

Методика исследований

Методика полевых интегральных экофитоиндикационных исследований урбогеосистем ЦР Санкт-Петербурга, карта-схема отбора почвенных образцов из поверхностных горизонтов урбаноземов, а также обсуждение их физико-химических свойств рассмотрены нами ранее [3]. Всего было отобрано 22 поверхностные пробы почв с глубины 0–10 см и заложен почвенный разрез на Марсовом поле. В разрезе было выделено пять почвенных горизонтов, характеризующихся следующей мощностью: U₁ — 0–12 см (отбор проб с глубины 0–10 см), U₂ — 13–35 см (20–30 см), U₃ — 36–72 см (45–55 см), B — 73–98 см (85–95 см), Bc — 105–115 см (105–115 см). В настоящей статье обсуждается содержание ТМ: Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co, Cd, Ba и легкого металла Sr (атомный вес 38) в урбаноземах как преобладающем типе почв под зелеными насаждениями. Анализ почвенных образцов проведен в спектральной лаборатории ВСЕГЕИ атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP AES).

Результаты исследований

Анализ микроэлементного состава почв ЦР основан на системном подходе. Почва как компонент ландшафта одновременно представляет собой и одну из его макросистем, механизмы функционирования и структурной организованности которой определяются, с одной стороны, взаимосвязью с сопряженными компонентами, а с другой — обуславливаются внутренним взаимодействием конкретных природных образований самой почвы от подстилающих и почвообразующих горных пород до гумусовых горизонтов. Для теоретического обоснования процессов, происходящих в городских почвах, приводящих к трансформации исходных нативных почв, большой интерес представляет работа Г. В. Мотузовой о системной организации микроэлементного состава почвы. Определение «что такое почва», данное классиками генетического почвоведения, по её мнению «наряду с функциональной и атрибутивной, содержит и субстантивную характеристику почвы, являющуюся не менее важной, чем функциональная и атрибутивная. Все материальные составляющие компоненты почвы (химические элементы и их соединения) представляют собой организованную систему со своей иерархической структурой. Элементарной структурной единицей микроэлементной системы, являющейся материальным носителем химических элементов почвы, является почвенный горизонт, содержащий их необходимый и достаточный запас. Периодическая повторяемость элементарных систем соединений химических элементов как однотипно организованных инвариантных структур, взаимосвязанных процессами водной и биогенной вертикальной миграции формирует систему соединений химических элементов почвенного профиля. В свою очередь, латеральная миграция химических элементов и их глобальный перенос формируют геохимическую систему биосферы в целом» [4].

Приведенные выше положения о системной организации микроэлементного состава почв применимы и к городским почвам. При этом необходимо отметить, что микроэлементная система урбаноземов и других типов городских почв на уровне низших элементарных подсистем (почвенные горизонты, профиль) испытывает сильное воздействие урботехногенеза, обуславливающего изменение содержаний химических элементов, их взаимодействие между собой и, в конечном итоге, трансформацию самих подсистем.

Содержание ТМ в городских почвах, как депонирующем компоненте урбогеосистем, обусловлено разными источниками: 1) почвообразующими горными породами, 2) насыпными субстратами, 3) атмосферными выпадениями и др. Перенос и выпадение атмосферных аэрозолей и пыли техногенного происхождения корректируется высотой и характером застройки, продуваемостью кварталов, соотношением заасфальтированной и озелененной площадей [5].

По данным федерального государственного бюджетного учреждения «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», в ЦР на двух постах №6 (Инженерная ул., д. 6) и № 10 (пл. Александра Невского), в 2010 г. отмечался повышенный уровень загрязнения воздуха пылью на обоих постах; высокие концентрации диоксида азота/оксида азота зафиксированы на посту № 10; максимальные из среднемесячных по городу концентраций бензпирена — на посту № 6; высоко здесь и загрязнение воздуха аммиаком. Что касается ТМ, то превышение ПДК за год отмечено только на посту № 10 в июле 2010 г. Индекс загрязнения воздуха (ИЗА) на посту № 6 рассматривается как очень высокий (ИЗА — 16,4), на посту № 10 — как высокий (ИЗА — 9,7). На территории района также находятся две станции автоматизированной системы мониторинга атмосферного воздуха (АСМ): № 7 (Шпалерная ул., д. 56) и № 12 (ул. Пестеля, д. 1), где ведется измерение ряда параметров, в том числе оксидов углерода, азота и разных органических соединений. Превышения по этим параметрам отмечены на обеих станциях. Что касается концентраций взвешенных частиц и ТМ — эти показатели на данных станциях не определяются. Наиболее загрязнен воздух над центральными магистралями района — Невским, Лиговским и Литейным проспектами. Основным источником загрязнения воздуха является непрерывный ежедневный поток через территорию ЦР внутригородского и транзитного транспорта. Определенный вклад вносят и имеющиеся промышленные предприятия [6, 7].

Загрязнение почв отражает приведенную выше общую экологическую обстановку ЦР. Статистический анализ концентраций химических элементов в верхнем горизонте урбаноземов выявил их большую вариабельность (табл. 1). Наибольшую трансформацию в урбогеосистемах претерпевает Mn, возглавляющий биологический круговорот в природных зональных геосистемах; его коэффициент вариации (V) составляет 88,6%.

Высокий коэффициент вариации отмечен и для биофильных элементов Cu ($V=60,52\%$) и Zn ($V=55,32\%$), что обусловлено, как и для основного загрязнителя Pb ($V=61,36\%$), локальными ситуациями.

Минимальные концентрации ТМ выявлены в урбаноземах двух объектов: Таврический сад (Fe, Mn, Zn, Pb) и Марсово поле (Cu, Ni, Cr, Co), но по разным причинам. В Таврическом саду — удаленность точки пробоотбора от автотранспортных магистралей и регулярное обновление там почвогрунтов. На окраинных же

Таблица 1. Статистические характеристики содержания химических элементов в поверхностных горизонтах урбаноземов (n = 22)

Параметры	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Ba	Cr	Ni	Co	Cd	Sr
Среднее	25922,3	726,6	117,6	512,6	190,6	938,0	60,14	32,40	11,78	0,73	211,45
Стандартная ошибка	1632,5	137,3	15,18	60,46	24,93	32,3	2,57	2,02	0,56	0,09	5,15
Медиана	25423,2	600,2	104	395	160,5	906,5	61,1	31,45	11,2	0,78	210
Мода	29934,3	673,8	106	Н/Д	Н/Д	1070	58,8	Н/Д	Н/Д	0,91	202
Стандартное отклонение	7657,2	644,1	71,20	283,59	116,94	151,5	12,05	9,46	2,63	0,41	24,18
Экссесс	-0,61	13,8	1,84	0,21	1,02	0,99	0,59	-0,48	0,61	-0,39	1,45
Асимметричность	0,62	3,6	1,47	0,98	1,24	1,06	-0,87	-0,16	0,84	0,04	0,86
Минимум	17135,3	348,5	38,4	193	56,2	745	29,5	14,1	7,76	0,026	176
Максимум	41264,6	3330,4	318	1170	499	1330	75,8	48,4	18,5	1,56	279
Коэффициент вариации, %	29,5	88,6	60,52	55,32	61,36	16,15	20,04	29,21	22,36	55,42	11,43

участках территории Марсова поля низкие концентрации ряда химических элементов связаны с тем, что почва сильно деградирована, содержание общего углерода в ней составляет всего 1,7–2,3% [3], а разрушение почвенного поглощающего комплекса сопровождается снижением емкости поглощения по отношению к катионам тяжелых металлов. Таким образом, в поверхностном слое почвогрунтов (урбаноземов) могут фиксироваться более низкие концентрации по сравнению с удаленными от него участками с сохраняющимся слабоизмененным гумусовым горизонтом [8].

При сравнении химического состава урбаноземов разных объектов озеленения ЦР (табл. 2) установлено, что тип зеленых насаждений не всегда обуславливает степень загрязнения почв. Так, урбаноземы Сангальского сада по содержанию всех элементов, кроме Sr, превосходят почвы Таврического сада, несмотря на то что его территория достаточно изолирована от Лиговского пр. По всей вероятности, здесь существенную роль в загрязнении играет близко расположенная железная дорога. Как один из наиболее загрязненных участков, в таблице приведена территория школы № 169 (Харьковская ул. 13), урбанозем которой содержит если не максимальные, то довольно высокие концентрации всех изученных элементов. Сравнение результатов с фоновыми данными позволяет оценить степень загрязнения городских почв ТМ.

Сравнение наших данных с данными по центральной части Санкт-Петербурга, приводимыми в литературе [9], демонстрирует в целом сходную картину. Отличия заключаются лишь в том, что для Fe, Cr, Zn, Cd средние значения в 1,5 раза выше, а для Mn, Ba средние значения в 1,5 раза ниже содержаний, приводимых в экологическом обзоре.

В статье Э.И. Слепьяна с соавторами [10] показано некоторое превышение концентраций Cr, Ni, Cu, Zn, Pb в почвах вдоль Невского пр. (табл. 3), что подтверждает факт первичности автотранспортного источника загрязнения. Содержание Sr существенно отличается от наших данных, что возможно связано с аналитической ошибкой. В этой же таблице приведены концентрации хрупкого полуметалла As, от-

Таблица 2. Содержание химических элементов в урбаноземах некоторых объектов озеленения ЦР Санкт-Петербурга и фоновые данные (мг/кг)

Объект	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Ba	Cr	Ni	Co	Cd	Sr
Таврический сад, центр	17135,3	348,5	46	193	56,2	844	56,9	22,3	10,2	0,14	233
Сангальский сад на Лиговском пр.	27276,6	596,4	196	637	350	952	68,7	39,7	14,0	0,84	192
Харьковская ул., д. 13, территория школы № 169	28255,8	619,6	71,8	1110	378	1070	71,8	47,6	13	1,56	235
Локальный фон, мг/кг	21800	399,9	33,3	48,55	27,03	300	30,5	23,6	7,95	0,17	150,3

Таблица 3. Содержание химических элементов (мг/кг) в поверхностных горизонтах урбаноземов Невского проспекта (по: [10])

Объект	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Cr	Ni	Co	Sr	As
Невский 6, двор	1906	275,1	78,65	893,7	140,3	59,1	42,65	0,06	18,2	2,0
Невский 22–24	4215	758,8	239	983,1	171,6	383,0	188,1	17,9	57,3	9,1
Невский/М. Конюшенная	3993	1134	170,1	1335	566,5	70,2	39,3	16,5	34	3,9
Екатерининский сад / Александринский театр/	1982	320,3	92,15	297,9	171,5	2,0	14	6,8	51,4	11,65
Аничков сад (у решетки вдоль Невского пр.)	2913	524,5	268,9	341,5	35,6	89,5	71,2	0,09	68,2	5,55
Среднее	3001,8	602,54	169,8	770,3	217,1	120,8	71,05	8,27	45,82	6,44

носящегося к 1 классу опасности. Его содержание почти во всех пробах превышает среднее по городу значение в 2–4 раза.

Анализ полученных нами результатов по ЦР Санкт-Петербурга и приведенных выше опубликованных данных свидетельствует о пространственной мозаичности и временной вариабельности содержаний микроэлементов, что является закономерностью техногенного загрязнения городских почв.

Распределение ТМ по профилю урбанозема супесчаного на среднем суглинке пылевато-песчаном (разрез на Марсовом поле) имеет определенные особенности. Выделяется два типа профильных концентрационных кривых. Первый тип объединяет группу элементов, максимальные (или близкие к максимальным) содержания которых приурочены к нижнему гумусированному горизонту U_3 (глубина отбора образца 45–55 см, мощность горизонта 36–72 см). Это — Fe, Mn, Pb, Cu (рис. 1а). Содержание Fe в данном горизонте составляет 23429,9 мг/кг (против 18354,3 и 18464,2 в двух вышележащих горизонтах), Mn — 580,9 мг/кг (в двух верхних 464,7 и 472,5, соответственно, но максимальное содержание в нижнем горизонте BC — 619,6 мг/кг). Для Cu горизонты U_2 и U_3 имеют близкие значения — 167,0 и 163,0 мг/кг, соответственно, превышая в 2,8 раза концентрацию этого элемента в поверхностном горизонте и в 4,7–5,0 раз ее содержание в нижних горизонтах. Профильная кривая для Pb аналогична таковой для Cu. Максимальное

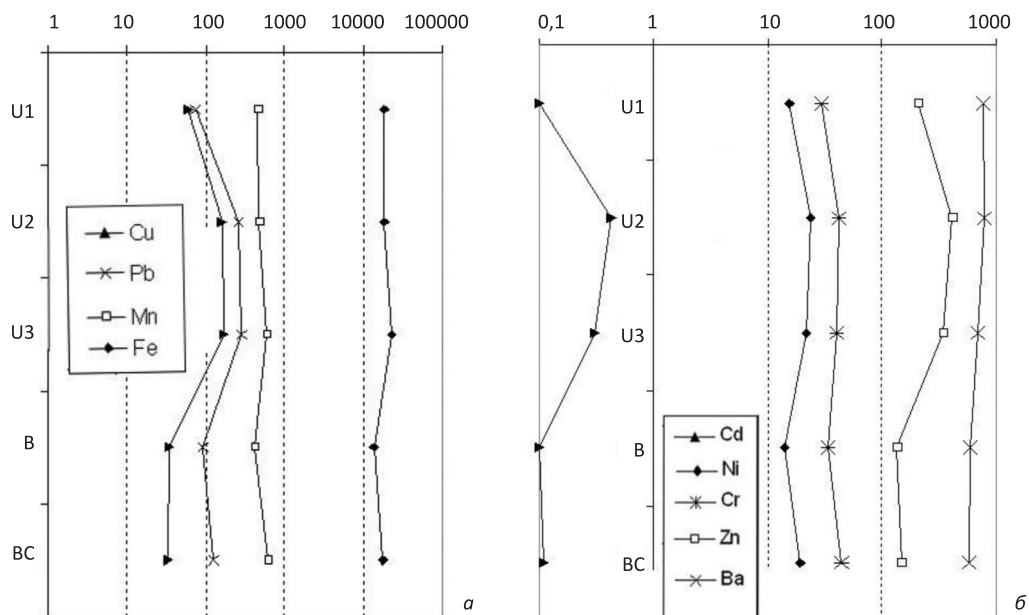


Рис. 1. Распределение химических элементов (мг/кг; логарифмическая шкала) по почвенному профилю (Марсово поле)

содержание Pb отмечается в нижнем гумусированном горизонте U_3 (283,0 мг/кг) и вышележащем горизонте U_2 (265,0 мг/кг), что превышает в 3,5–3,8 раз его содержание в поверхностном горизонте (74,9 мг/кг). Нижние минеральные горизонты B и BC содержат 93,6 и 125,0 мг/кг Pb соответственно.

Второй тип профильных концентрационных кривых включает группу элементов, характеризующихся смещением максимума их содержаний в горизонт U_2 (глубина отбора образца 20–30 см, мощность горизонта 13–35 см) со значениями для Ni, Zn, Ba и Cd соответственно равными 24,1, 406,0, 793,0, и 0,43 мг/кг (рис. 1б). Однако следует отметить, что и в нижнем гумусированном горизонте U_3 содержание Ni, Zn, Ba, и Cd близко к значениям этих элементов в U_2 и составляет 21,8, 344,0, 691,0, и 0,3 мг/кг. Максимальное содержание Cr отмечается в нижнем горизонте BC (44,1 мг/кг). Тот факт, что для большинства элементов наблюдается увеличение концентрации в горизонтах U_2 – U_3 , вероятно, объясняется как различным генезисом насыпных грунтов, сформированных за историю существования Марсового поля, так и выносом микроэлементов из верхнего горизонта с последующим осаждением на нижних горизонтах, характеризующихся высоким содержанием илистой фракции, и выступающих геохимическим барьером на пути миграции химических элементов [3].

Содержание Sr и Co слабо дифференцировано по профилю. Их концентрации в горизонте U_1 составляют 194,0 и 7,76 мг/кг, варьируя по профилю для Sr от 177,0 до 188,0 и для Co — от 7,09 до 8,97 мг/кг.

В целом содержания всех элементов, за исключением Cu и Pb, по профилю не превышают средних значений в поверхностных горизонтах урбанизированных территорий ЦР. Содержания Cu и Pb в горизонтах U_2 и U_3 в 1,3–1,5 раза превышают указанные средние значения, но ниже максимумов этих элементов в урбанизированных ЦР.

Для выявления закономерностей взаимосвязи изученных ТМ был проведен корреляционный анализ (табл. 4).

Таблица 4. Корреляционные связи химических элементов верхнего горизонта урбаноземов ЦР Санкт-Петербурга

Элемент	Fe	Mn	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd	Sr	Ba	Co
Fe	1,00										
Mn	0,68	1,00									
Cr	0,44	-0,09	1,00								
Ni	0,64	0,06	0,85	1,00							
Cu	0,32	-0,09	0,46	0,49	1,00						
Zn	0,24	-0,07	0,51	0,45	0,64	1,00					
Pb	0,27	-0,02	0,48	0,53	0,75	0,66	1,00				
Cd	0,32	-0,03	0,44	0,52	0,61	0,72	0,77	1,00			
Sr	0,27	-0,23	0,39	0,34	0,39	0,24	0,30	0,31	1,00		
Ba	0,49	0,22	0,44	0,39	0,81	0,54	0,64	0,53	0,51	1,00	
Co	0,56	0,10	0,81	0,78	0,23	0,35	0,34	0,30	0,13	0,19	1,00

Функциональную связь между ТМ выражают корреляционные плеяды [11–13]. Исследование микроэлементного состава поверхностных горизонтов урбаноземов с помощью корреляционного анализа позволило выявить три плеяды, объединяющие жестко связанные между собой ТМ с достоверными коэффициентами корреляции высокого уровня значимости 0,68–0,85 ($P_{0,001}$) при критическом значении $r=0,54$ на уровне $P_{0,01}$ (рис. 2).

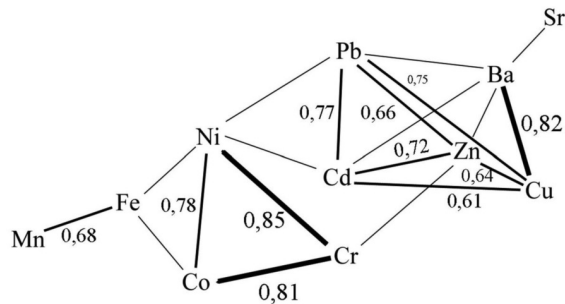


Рис. 2. Корреляционные плеяды химических элементов в поверхностных горизонтах урбаноземов ЦР Санкт-Петербурга

В первую плеяду входят Ni, Cr и Co; на более низком уровне оценки достоверности корреляционной взаимосвязи число связей у Cr с другими элементами существенно возрастает, в том числе и с Pb ($r=0,48$ при $P_{0,05}=0,42$).

Вторую плеяду образуют Pb, Cu, Cd, Zn, Ba как результат, в первую очередь, автотранспортного загрязнения. Основным элементом этой плеяды является такой индикаторный элемент, как Pb; участие Ba также связано с влиянием автотранспортного загрязнения [14].

Третья плеяда взаимосвязи ТМ включает Fe и Mn и имеет свои особенности. Mn представляет собой дериват биологического круговорота в исходных природных геосистемах и связан с другими элементами лишь через Fe.

Корреляционный граф интересен тем, что он определяет в системе микроэлементного состава поверхностных горизонтов положение Sr, характеризующегося определенной изолированностью и имеющего достоверный коэффициент корреляции лишь с Ba ($r=0,51$) на уровне $P_{0,05}$ (табл. 4).

С той же целью, что и построение плеяд, а также для сравнения результатов двух методов, проведен факторный анализ методом главных компонент. Анализ признаков структуры трех выявленных факторов позволяет предположить, что химический состав почв формируется под воздействием трех причин (табл. 5, 6). Величины собственных значений и веса факторов показывают, что содержания Cu (0,89), Zn (0,76), Pb (0,84), Cd (0,79), Ba (0,84) определяются на 48,85% действием фактора F1. Связь этих элементов с другими не столь значима, а их зависимость от Mn (-0,1) носит хоть и не существенный, но отрицательный характер, что подтверждает техногенный источник происхождения этих элементов. Фактор F2 объединяет такие элементы, как Cr (0,87), Ni (0,85), Co (0,93); вклад его составляет 16,67%. Третий фактор F3 включает два элемента Fe (0,79) и Mn (0,97); его вклад 12,69%. Оба элемента являются биофильными. Железо, хоть и присутствует в урбогеосистемах в повышенных концентрациях, не представляет опасности для живых организмов. Что касается марганца, то неоднократно подчеркивался факт снижения его содержания в биотическом круговороте в городских условиях из-за вытеснения его железом, что свидетельствует о сильной антропогенной трансформации природного

Таблица 5. Результаты факторного анализа элементной структуры поверхностных горизонтов урбаноземов ЦР. Факторные нагрузки (Varimax normalized); выделение: главные компоненты (отмечены нагрузки > 0,700)

Признаки	Факторные нагрузки		
	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Fe	0,233344	0,491548	0,788076
Mn	-0,096276	-0,041040	0,970988
Cr	0,376403	0,869316	-0,043636
Ni	0,375573	0,854107	0,151430
Cu	0,890816	0,136265	0,048940
Zn	0,756742	0,272005	-0,050339
Pb	0,839700	0,230711	0,032623
Cd	0,789187	0,243986	0,021063
Sr	0,506316	0,207655	-0,122811
Ba	0,836069	0,066742	0,344142
Co	0,091275	0,931102	0,143766
Общая дисперсия	4,004277	2,848351	1,749338
Доля общей дисперсии	0,364025	0,258941	0,159031

биогеохимического цикла, в котором Mn играет главенствующую роль [15]. Таким образом, выявленные факторным анализом группы по составу химических элементов аналогичны рассмотренным выше плеядам.

Таблица 6. Результаты факторного анализа

Фактор	Собственное значение	% общей дисперсии	Кумулятивные собственные значения	Кумулятивные проценты
1	5,37	48,85	5,37	48,85
2	1,83	16,67	7,21	65,52
3	1,39	12,68	8,60	78,2

Сопоставление двух методов анализа элементной системы поверхностных горизонтов урбаноземов утверждает идентичность корреляционной ассоциированности как по составу изученных микроэлементов, так и по обособленности выделяемых единиц (плеяд, факторов). Безусловно, факторный анализ полнее характеризует происходящие в городских почвах изменения, в частности, указывает на вклад каждого фактора в общую дисперсию изменения микроэлементной системы почв. Но главное заключается не столько в выборе метода, сколько в интерпретации причинно-геохимической обусловленности полученных результатов (плеяд, факторов).

С целью организовать данные в наглядные структуры был проведен кластерный анализ. Перед проведением кластерного анализа данные стандартизировались. В качестве метрики выбрано евклидово расстояние, в качестве алгоритма кластеризации — метод Уорда. При пороговом расстоянии 6 выделено 4 класса. Как видно на дендрограмме (рис. 3), в первый класс входят Fe и Mn, во второй — Co, Ni, Cr, в третий — Cd, Pb, Zn, Ba, Cu, в четвертом классе находится лишь один элемент — Sr. Интерпретация этих результатов аналогична приведенным выше, что еще раз подтверждает их объективность.

Оценка современного экологического состояния почв урбогеосистем, претерпевших антропогенный пресс, проведена по относительным показателям, что позволяет сравнивать их уровни загрязнения. Такими показателями являются коэффициенты концентрации (Кк), представляющие собой отношение содержания ТМ в исследуемом почвенном образце к локальному фоновому значению соответствующего элемента, вычисленные по трем уровням (среднее, минимум, максимум) их содержаний, и суммарный показатель загрязнения (Zс) для всех опробованных площадок ЦР и площадок, приведенных в статье Э. И. Слепяна [10]. Локальные значения фона получены путем обобщения опубликованных ранее данных [6, 16, 17]. Суммарный показатель загрязнения (Zс) рассчитан с учетом класса опасности тяжелых металлов (1-й класс — Zn, Pb, Cd; 2-й — Cr, Ni, Cu, Co; 3-й — Fe, Mn, Sr, Ba), которым придавались коэффициенты веса 1,5, 1,0 и 0,5, соответственно [18].

Основными загрязнителями урбаноземов в ЦР по значениям Кк являются Zn, Pb, Cd, Cu. По цинку максимальный Кк отмечен во дворе ФИНЭКа (Банковский пер., д. 6), высокие значения на Невском пр. (по данным Э. И. Слепяна, 1999); по свинцу существенные показатели Кк отмечены в сквере Галины Старовойтовой (Суворовский пр., 35), на Преображенской пл., на Харьковской ул. и в Сангальском саду; по данным Э. И. Слепяна с соавторами [10] точка максимального загрязнения

Таблица 7. Коэффициенты концентраций и суммарное загрязнение урбоземов территории ЦР Санкт-Петербурга

Значение	Zn	Pb	Cd	Cu	Ba	Cr	Mn	Ni	Co	Sr	Fe	Zc
Среднее	11,54	7,24	4,30	3,82	3,13	2,34	1,76	1,68	1,40	1,20	0,99	36,52
Минимум	3,98	1,32	0,15	1,15	2,48	0,07	0,69	0,59	0,01	0,12	0,09	9,97
Максимум	27,50	20,96	9,18	9,54	4,43	12,56	8,33	7,97	2,33	1,86	1,89	77,06

Таблица 8. Ориентировочная оценочная шкала опасности загрязнения почв по суммарному показателю загрязнения Zc [20]

Категория загрязнения почв	Значение Zc	Изменения показателей здоровья населения в очагах загрязнения
Допустимая	Менее 16	Наиболее низкий уровень заболевания детей и минимальная частота встречаемости функциональных отклонений
Умеренно опасная	16–32	Увеличение уровня общей заболеваемости
Опасная	32–128	Увеличение уровня общей заболеваемости, числа часто болеющих детей, детей с хроническими заболеваниями, нарушениями функционального состояния сердечно-сосудистой системы
Чрезвычайно опасная	Более 128	Увеличение уровня общей заболеваемости детского населения, женщин с нарушением репродуктивной функции (увеличение числа преждевременных родов и др.)



Рис. 4. Суммарный показатель загрязнения почв Центрального района Санкт-Петербурга: опасное загрязнение (32–128), умеренно опасное загрязнение (16–32), допустимое (менее 16)

Для Шереметьевского сада, находящегося на территории ЦР, Zc составляет 20–88 [21], что согласуется с указанными выше данными.

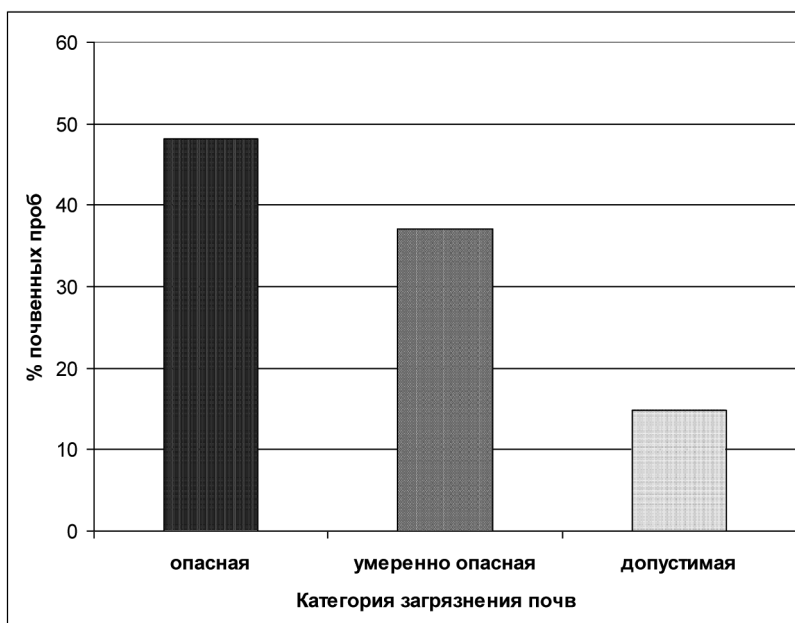


Рис. 5. Распределение почвенных образцов ЦР по группам с различной степенью загрязнения.

Дифференцированная оценка базы данных показывает, что к опасной категории загрязнения принадлежит 48% отобранных проб, к умеренно опасной — 37% и к допустимой — 15% (рис. 5). Таким образом, почти половина ЦР характеризуется как опасная по уровню загрязнения почв.

Заключение

Анализ микроэлементной системы урбанизированных почв выявил на большей части территории опасный уровень их загрязнения. Полученные результаты дают основание считать урбанизированные почвы инвариантом природных дерново-подзолистых почв, характеризующихся устойчивыми отличительными особенностями их микроэлементного состава как системы.

Изучение распределения ТМ по почвенному профилю показало их миграцию и аккумуляцию в горизонтах U_2-U_3 . Поверхностный горизонт содержит меньше ТМ, что может быть связано как с их вымыванием, так и с деградацией почвы, сопровождающейся снижением емкости поглощения.

Метод построения корреляционных плеяд и факторный анализ позволили выявить три группы МЭ, имеющих сильную и значимую связь друг с другом: Pb–Cu–Cd–Zn–Ba, Ni–Cr–Co, Fe–Mn. Элементы первой группы характеризуются высокими значениями Кк и выступают основными загрязнителями — их содержания превышают фоновые значения в 3–36 раз. Sr не имеет сильных связей с другими элемен-

тами, а его низкий показатель Кк свидетельствует о том, что данный элемент нельзя рассматривать как загрязнитель.

Пространственное распределение показателя суммарного загрязнения выявило несколько очагов загрязнения, причины возникновения которых могут быть различными. Основной причиной, вероятно, является воздействие выбросов автотранспорта, хотя и не исключено локальное загрязнение урбаноземов (внесение непроверенных почвогрунтов при реконструкции газонов, захоронение строительных материалов и др.). Тем не менее, назрела необходимость системного решения проблемы интенсивности движения автотранспорта по историческому центру города как основного фактора загрязнения почв.

Литература

1. Кошелева Н. Е. Почвы урбанизированных, промышленных, горнодобывающих и военных территорий (Нью-Йорк, США) // Почвоведение. 2010. № 9. С. 1146–1150.
2. Уфимцева М. Д., Банарь С. А. Биогеохимические критерии оценки экологического риска для здоровья городского населения // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Серия 7. Геология. География. 2003. Вып. 1 (№ 7). С. 99–110.
3. Уфимцева М. Д., Терехина Н. В., Абакумов Е. В. Физико-химическая характеристика урбаноземов Центрального района Санкт-Петербурга // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Серия 7. Геология. География. 2011. Вып. 4. С. 85–97.
4. Мотузова Г. В. Соединения микроэлементов в почвах: Системная организация, экологическое значение, мониторинг. Изд. 2-е. М.: Книжный дом «ЛИБРИКОМ», 2013. 168 с.
5. Капелькина Л. П. Эколого-гигиенические аспекты нормирования загрязняющих веществ в почвах мегаполисов // Сб. мат. V Междунар. конф. «Проблемы обращения с отходами лечебно-профилактических учреждений». М., 2009. С. 58–68.
6. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 2002 году / под ред. Д. А. Голубева, Н. Д. Сорокина. СПб., 2003. С. 241–254.
7. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 2010 году. Санкт-Петербург, 2011. С. 241–254.
8. Капелькина Л. П., Самуленков Д. А. Эколого-гигиенические аспекты поведения бенз(а)пирена в почвах // Сб. мат. V Междунар. конф. «Проблемы обращения с отходами лечебно-профилактических учреждений». М., 2009. С. 68–77.
9. Экологическая обстановка в Санкт-Петербурге в 1992 году. Аналитический обзор. СПб., 1993. 218 с.
10. Слепян Э. И., Волошко Л. Н., Дзюба О. Ф. и др. Растительный мир Невского проспекта и природная среда исторического центра Санкт-Петербурга // Жизнь и безопасность. 1997. № 2–3. С. 406–453.
11. Терентьев П. В. Метод корреляционных плеяд // Вестн. Ленингр. ун-та. Серия: Биология. 1959. Вып. 2, № 9. С. 137–141.
12. Терентьев П. В. Дальнейшее развитие метода корреляционных плеяд // Применение математических методов в биологии. Т. 1. Л.: 1960. С. 42–58.
13. Ростова Н. С. Корреляции: структура и изменчивость. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2002. 308 с.
14. Monaci F, Bargagli R. Barium and other trace metals as indicators of vehicle emissions // Water, Air and Soil Pollut. 1996. Vol. 100, N 1–2. P. 89–98.
15. Уфимцева М. Д., Терехина Н. В. Фитоиндикация экологического состояния урбогеосистем Санкт-Петербурга. СПб.: Наука, 2005. 340 с.
16. Сапрыкин Ф. Я. Разработка методики крупномасштабного геохимического районирования почв и минералого-геохимической оценки горных пород и отходов горнодобывающей промышленности с целью использования в качестве добавок в почвы для повышения плодородия: Отчет / Геолфонды ВСЕГЕИ. Л., 1983. 366 с.
17. Парибок Т. А., Сазыкина Н. А., Тэмн Г. А. и др. Содержание металлов в листьях деревьев в городе // Ботан. журн. 1982. Т. 67, № 11. С. 1533–1539.
18. Водяницкий Ю. Н. Формулы оценки суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами и металлоидами // Почвоведение. 2010. № 10. С. 1276–1280.

19. Горький А. В., Петрова Е. А. Загрязнение почв Санкт-Петербурга тяжелыми металлами // Сайт Российского геоэкологического центра. URL: <http://www.rges.ru/articles/> (дата обращения: 27.04.2013).

20. Сает Ю. Е., Ревич Б. А. Эколого-геохимические подходы к разработке критериев нормативной оценки состояния городской среды // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1988. № 4. С. 37–46.

21. Матинян Н. Н., Бахматова К. А., Шешукова А. А. Почвы бывшей усадьбы Шереметьевых (Санкт-Петербург, наб. р. Фонтанки, 34) // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 3. Биология. 2008. Вып. 2. С. 91–100.

Статья поступила в редакцию 27 января 2014 г.

Контактная информация

Уфимцева Маргарита Дмитриевна — кандидат географических наук, доцент;
margufim@mu2881.spb.edu

Терехина Наталия Владимировна — кандидат географических наук, доцент;
natalia_terekhin@mail.ru

Ufimtseva M. D. — Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor;
margufim@mu2881.spb.edu

Terekhina N. V. — Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor; natalia_terekhin@mail.ru