

На правах рукописи



Цагааны Бямбасурэн

**ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА
Г. УЛАН-БАТОР**

Специальность 1.6.21. Геоэкология

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук

Улан-Батор – 2024

Работа выполнена в Институте физики и технологии Академии наук Монголии,
г. Улан-Батор

Научный руководитель: **Шабанова Елена Владимировна**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник группы атомно-эмиссионных методов анализа и стандартных образцов ИГХ СО РАН, г. Иркутск

Официальные оппоненты: **Таловская Анна Валерьевна**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Федерального государственного бюджетного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ, г. Томск)

Лопатовская Ольга Геннадьевна, доктор биологических наук, профессор кафедры Почвоведения и оценки земельных ресурсов, Биолого-почвенного факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет» (ИГУ, г. Иркутск)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт географии им. В.Б. Сочавы» Сибирского отделения Российской академии наук (ИГ СО РАН, г. Иркутск)

Защита диссертации состоится 24 декабря 2024 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.1.053.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (ФГБУН «ИГХ СО РАН»)

Адрес: 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а
e-mail: amosova@igc.irk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН «Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН», адрес сайта: <http://www.igc.irk.ru/ru/zashchita>

Автореферат разослан « ____ » ноября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.х.н.



Амосова А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Процесс урбанизации г. Улан-Батор, как и других мегаполисов, оказывает влияние на уровень техногенного загрязнения экосистемы. Однако выбор способа оценивания степени загрязнения почвенно-растительного покрова различными токсикантами и их соединениями по сей день является серьёзной проблемой. Благодаря современным методам химического анализа в природных средах можно определить большинство элементов Периодической таблицы Д.И. Менделеева, но вопрос о выборе аналитических методов/методик и их комбинации в рациональную схему для получения достоверных данных об элементном составе почв и растений до сих пор открыт.

Комплексное исследование биогеохимических особенностей в сопряжённой системе "почва – растение" включает установление закономерностей миграции и аккумуляции химических элементов (ХЭ) и их подвижных форм, оценку состояния почвенной среды, выделение источников загрязнения. В существующих отечественных и зарубежных исследованиях территории г. Улан-Батор отсутствует изучение влияния макроэлементного состава на поведение широкого круга химических элементов в сопряжённой системе "почва – растение".

Выводы о состоянии почвенной среды обычно основаны на разных статистических оценках, например, индексах загрязнения. В настоящее время предложено множество индексов, но условия их применимости при экологических исследованиях городских почв, и тем более растений, мало изучены. В связи с необходимостью нетривиальной обработки разноплановой первичной геохимической информации, применение многомерных методов статистического анализа (разведочный анализ данных, дисперсионный и дискриминантный анализ, вариации кластерного и факторного анализов) является перспективным для выявления ХЭ, обладающих схожим геохимическим поведением, особенностям их перераспределения в городских почвах. Поэтому остаётся необходимым и актуальным выявление оптимальных способов получения и структурирования первичных геохимических данных, а также способов и критериев оценки экологического состояния окружающей среды г. Улан-Батор для создания научно обоснованных моделей, позволяющих описать динамику изменения отдельных геохимических показателей, происходящих в системе "почва – растение".

Цель исследований заключалась в выявлении эколого-геохимических особенностей почвенно-растительного покрова г. Улан-Батор путём изучения взаимоотношения между макро- и микроэлементами; установлении источников поступления микроэлементов в поверхностные почвы и растения, а также интерпретации выявленных геохимических связей.

Для установления закономерностей миграции и аккумуляции химических элементов в почвенно-растительном покрове г. Улан-Батор было необходимо решить

следующие задачи:

- изучить макро- и микроэлементный состав городских почв и растений, произрастающих на них, с целью определения валовых содержаний и форм нахождения биофильных и токсичных элементов;
- составить рациональные схемы анализа проб сопряжённых сред "почва – растение" для получения надёжной первичной геохимической информации при минимальных финансовых и временных затратах;
- сравнить и выбрать из индивидуальных и комплексных индексов загрязнения (PI , I_{geo} , Zc и IPI – для почв; показателей фотосинтеза, интенсивности ферментогенеза и токсичности – для растений) наиболее полно описывающие экологическую ситуацию для городских почв и растений;
- оценить применимость статистических методов анализа и моделирования пространственных данных для установления источников загрязнения; построения карт загрязнения и выявления границ повышенного уровня загрязнения.

Объекты, методы и методология исследования, личный вклад соискателя.

Материал для исследований представлен более 600 образцами почв и растений, отобранных лично автором на территории г. Улан-Батор в местах с разной степенью антропогенной нагрузки в 2010, 2011, 2017 и 2019 гг., и приготовленных к аналитическим исследованиям лично автором. Валовый состав почв и растений, концентрации подвижных форм элементов, экстрагируемых аммонийно-ацетатным буфером из почв, определены методами атомно-эмиссионной, атомно-абсорбционной и рентгенофлуоресцентной спектроскопии в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН. При выполнении работы получены и обработаны значения более 28 000 элементо-определений для макро- и микроэлементов. Степень загрязнения почв оценена с помощью индивидуальных и комплексных индексов загрязнения, и с использованием интегральных биохимических характеристик растений. Источники загрязнения химическими элементами, а также направления миграции их подвижных форм установлены с помощью методов многомерного статистического анализа (разведочный анализ данных, вариации кластерного и факторного анализов). Все вычисления выполнены лично автором в программах Microsoft Office Excel 2013, STATISTICA 13 и ArgGIS 13.

Научная новизна. Установлены закономерности миграции и аккумуляции химических элементов в почвенно-растительном покрове г. Улан-Батор на основе аналитических данных, полученных с помощью разработанных рациональных схем анализа почв и растений. Выявлены структуры первичной геохимической информации, с помощью которых возможна характеристика элементного и вещественного составов почв, и построение карт с их пространственным распределением. Показано, что

комплексный индекс загрязнения Z_c более чётко выделяет очаги накопления потенциально токсичных элементов и даёт более категоричные характеристики загрязнения почв г. Улан-Батор, чем комплексный индекс IPI . Продемонстрировано, что для надёжного выявления очагов заражения и поиска их источников необходимо сочетать индексный подход с геостатистическим оцениванием на основе факторного анализа (цифровое почвенное картирование). Оценено влияние генетических особенностей растений и природных ландшафтно-климатических условий на перенос микроэлементов в системе "почва – растение".

Практическая значимость

- По итогам опробования разных схем химического анализа образцов сопряжённых сред "почва – растение" составлены рациональные схемы химического анализа, результаты применения которых обеспечили получение надёжной геохимической информации при минимальных финансовых затратах.
- По результатам 2010, 2011, 2017 и 2019 гг. выявлены районы города, подверженные загрязнению потенциально токсичными элементами.
- Установлены источники загрязнения и направления миграции химических элементов с помощью многомерного статистического анализа данных.
- Доказано преобладание генетической устойчивости растений вида *Thymus* L. на изменение элементного состава органов по сравнению с влиянием почвенно-климатических условий произрастания.
- Показана высокая контрастность показателя токсичности (отношение содержаний токсичного Pb и биофильного Mn) для оценки экологического состояния по листьям (цветам) как травянистых, так и древесных растений.

Защищаемые положения

1. Предложенные рациональные схемы химического анализа образцов сопряжённых сред "почва – растение" обеспечивают необходимым и достаточным объёмом данных процедуры геостатистического моделирования для установления распределения макро- и микроэлементов, выявления источников их поступления в эти среды.
2. Для корректной интерпретации экологической ситуации и классификации источников поступления микроэлементов в городские почвы с помощью многомерного статистического анализа структура аналитико-геохимических данных должна содержать информацию о макро- и микроэлементном составе, а также показателях рН и $C_{орг}$.
3. Для описания экологического состояния городских почв и растений, произрастающих на них, необходимо сочетание геостатистического картирования (поиск и выделение источников загрязнения) и вычисление двух индексов:

комплексный индекс загрязнения почв (Z_c) и показатель токсичности для растений (отношение содержаний Pb/Mn). Оценивание степени загрязнения почв г. Улан-Батор выявило только точечные потенциально опасные участки.

Достоверность защищаемых положений. Большой объём собранного, проанализированного и обработанного фактического материала за многолетний период подтверждает достоверность результатов исследования. Отбор и подготовка материала выполнены в соответствии с ГОСТ Р 58595-2019, МУ 2.1.7.730-99 и MNS 5850-2019. Контроль правильности и надёжности полученных аналитических результатов подтверждён анализом российских и международных стандартных образцов состава почв, золы углей, рыхлых и донных отложений, а также профессиональным тестированием. Корректность результатов обработки гарантирована применением современного математического аппарата и согласованностью с результатами эколого-геохимических наблюдений, выполненных ранее.

Исследования проведены в 2010-2019 гг. в рамках международных Договоров о научном сотрудничестве между Институтом геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск (Россия), и Институтом физики и технологии Академии наук Монголии, Улан-Батор (Монголия).

Апробация результатов работы и публикации по теме диссертации. Основные результаты работы и представлены на конференциях и совещаниях: Всероссийское совещание Современные проблемы геохимии (Иркутск, 2012); Всероссийская конференция по аналитической спектроскопии (Туапсе, 2012); IX и XII Международная конференция «Окружающая среда и устойчивое развитие Монгольского плато и сопредельных территорий» (Улан-Удэ, 2013; Улан-Батор, 2016); Международная научно-практическая конференция «Социально-экологические проблемы Байкальского региона и сопредельных территорий» (Иркутск, 2018 и 2019); GMIT Symposium on Environmental Science and Engineering (Nalaikh, 2018); 2nd International conference on environmental science and technology (Ulaanbaatar, 2018); VII Всероссийский симпозиум «Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий» и XIV Всероссийское чтение памяти акад. А.Е. Ферсмана (Чита, 2018); 16th East Eurasia International Workshop – Present Earth Surface Processes and Long-term Environmental Changes in East Eurasia (Ulaanbaatar, 2019); Всероссийская конференция «Современные направления развития геохимии» (Иркутск, 2019 и 2022); XIII Всероссийское петрографическое совещание (Иркутск, 2021).

Основные результаты по теме диссертации изложены в 22 печатных работах, четыре из которых проиндексированы международными базами данных (Scopus, WoS и RSCI) и две опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность за всестороннюю поддержку на всех стадиях подготовки научной работы научному руководителю д.ф.-м.н Шабановой Е.В., д.т.н. Васильевой И.Е, д.г.-м.н. Королькову А.Т. и к.т.н. Б. Хуухэнхуу. Автор выражает особую благодарность за проведение аналитических исследований сотрудникам ИГХ СО РАН д.т.н. Васильевой И.Е, д.х.н. Гуничевой Т.Н., к.х.н. Пройдаковой О.А., вед. инж. Долгих П.Т. и вед. инж. Чернышовой О.М., а также за помощь в обработке и графическом представлении первичной геохимической информации сотруднику ИФиТ АНМ Очирбату Г.

Структура и объём работы. Диссертационная работа изложена на 232 страницах; состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (256 источников) и четырёх приложений. Работа содержит 57 рисунков и 29 таблиц.

Во *Введении* обоснована актуальность работы, определены цели и задачи исследования, приведены положения, выносимые на защиту и показана практическая значимость. В *главе 1* приведена информация об изучаемой территории Монголии и г. Улан-Батор; показаны степень изученности элементного состава почв и растений города, а также используемые в мировой практике методы исследования сопряжённых сред "почва-растение" и оценки экологического состояния почв. В *главе 2* описаны выполненный отбор проб сопряжённых сред "почва – растение" на территории г. Улан-Батор и варианты составления рациональных схем в зависимости от аналитических возможностей методов. В *главе 3* изложены основные результаты статистического разведочного анализа экспериментальных данных по 36 элементам и двум показателям почв; изучена связь макроэлементного состава почв с водородным показателем (рН), содержанием органического углерода ($C_{орг}$) и микроэлементным составом. В *главе 4* рассмотрены применимость индивидуальных и комплексных индексов для эколого-геохимической оценки почв г. Улан-Батора; цифровое картирование в течение всего времени наблюдений с установлением пространственного распределения уровней загрязнения городски почв и источников поступления потенциально опасных микроэлементов. В *главе 5* изложены особенности распределения и переноса биофильных и токсичных элементов в растениях, произрастающих в городских и естественных условиях; выявлена наиболее информативная оценка степени загрязнения почв с использованием биохимических характеристик древесных и травянистых растений в качестве индикаторов. В *Заключении* кратко обобщены полученные аналитические и статистические результаты состояния почвенно-растительного покрова г. Улан-Батор.

ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1. Предложенные рациональные схемы химического анализа образцов сопряжённых сред "почва – растение" обеспечивают необходимым и достаточным объёмом данных процедуры геостатистического моделирования для установления распределения макро- и микроэлементов, выявления источников их поступления в эти среды.

Существует большое количество аналитических методов и методик, которые могут быть использованы для определения элементного состава почв и растений. Однако каждому из них присущи свои ограничения, связанные с физико-химическими процессами, и, как следствие, содержание и качество аналитической информации, получаемые с их помощью, не всегда соответствует жёстким требованиям экологического мониторинга [Reimann, Garrett, 2005]. Поэтому широко используют комбинирование нескольких аналитических методов и методик, отвечающих следующим требованиям:

- одновременное определение макро- и микроэлементов, желательно без изменения агрегатного состояния анализируемого вещества;
- обеспечение нижних границ определяемых содержаний элементов ниже значений регионального фона (мировых кларков) и ПДК в 2-10 раз для валовых и подвижных форм элементов [Юфа, 1979];
- реализация аналитических процедур при минимальных финансовых и временных затратах.

С помощью теории информации перечисленные критерии можно выразить через понятие единой количественной меры каждой методики [Остроумов и др., 1988] – количество информации (P_{inf}), которая выражается в битах:

$$P_{inf} = \sum_{u,i} \log_2 g_{u_i} = \sum_{u,i} \log_2 \frac{(C_{\text{верх}} - C_{\text{ниж}}) \times \sqrt{n}}{2t\sigma_u}$$

где u – число одновременно определяемых элементов; g_u – число различных градаций содержаний (концентраций) u -го элемента, $C_{\text{верх}}$ и $C_{\text{ниж}}$ – верхняя и нижняя границы определяемых содержаний u -го элемента при некотором значении абсолютного среднеквадратичного отклонения, принимаемом за постоянное (σ_i), %; t – критерий Стьюдента; n – число параллельных определений. Под градацией концентрации понимается доверительный интервал величиной $2t\sigma_i$ с границами $\pm t\sigma_i$. Величина P_{inf} тем больше, чем лучше прецизионность, шире диапазон определяемых содержаний и больше число одновременно определяемых элементов.

Для анализа почв рассмотрено два метода, которые не требуют изменения агрегатного состояния образцов: рентгенофлуоресцентная спектрометрия (РФС) и атомно-эмиссионная спектрометрия с дуговым разрядом (АЭС-ДР) по способам испарения порошковых проб из канала электрода и вдувания-просыпки; а также два

метода со специальной химической пробоподготовкой: атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС) в вариантах пламенной и электротермической атомизации, и пламенная атомно-эмиссионная спектрометрия (ПАЭС). Содержания подвижных форм элементов, экстрагированных аммонийно-ацетатным буфером (рН 4.8) из проб почв, определены методами ПАЭС, ААС и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП). Таким образом, в пробах почв определяли валовые содержания 33 элементов (Si, Al, Mg, Ca, Fe, Ti, Mn, Ba, Sr, Na, K, Li, Rb, В, Р, Ni, Co, V, Cr, Mo, Sn, Pb, Cu, Zn, Ag, Bi, Cd, Sb, As, Ge, Tl, F, S): РФС – 12; ПАЭС – 4; АЭС-ДР (1: испарение) и АЭС-ДР (2: вдувание-просыпка) – соответственно 15 и 21; ААС – 16 элементов. Определение содержания подвижных форм 26 элементов выполнено по методикам АЭС-ИСП (весь набор), ПАЭС (4 элемента) и ААС (14 элементов).

Содержания химических элементов в проанализированных пробах почв и аммонийно-ацетатных вытяжках варьировали в широких пределах при повторяемости, соответствующей требованиям [ОСТ 41-08-214-04, 2004]. Корреляционный анализ результатов, полученных различными методами/методиками, подтвердил их согласованность (коэффициенты корреляции варьируют от 0.85 до 0.99). Правильность результатов анализа каждой методики проконтролирована с использованием российских и международных стандартных образцов разного состава (например, рис. 1).

Оценены показатели информативности каждого метода. Для определения валовых содержаний методы были сгруппированы в две схемы со своими показателями информативности: (1) РФС – ААС – ПАЭС и (2) РФС – АЭС-ДР. Схема (1) имела P_{inf} равный 306 бит, а показатель для схемы (2) составил 462 бит; т.е. схема (1) уступает по информативности схеме (2). Аналогично для определения подвижных форм составили две схемы: АЭС-ИСП – ПАЭС и ААС – ПАЭС (P_{inf} 356 и 200 бит, соответственно). Многоэлементные прямые методы анализа оказываются более информативными. Схожая ситуация наблюдается по показателям информативности для

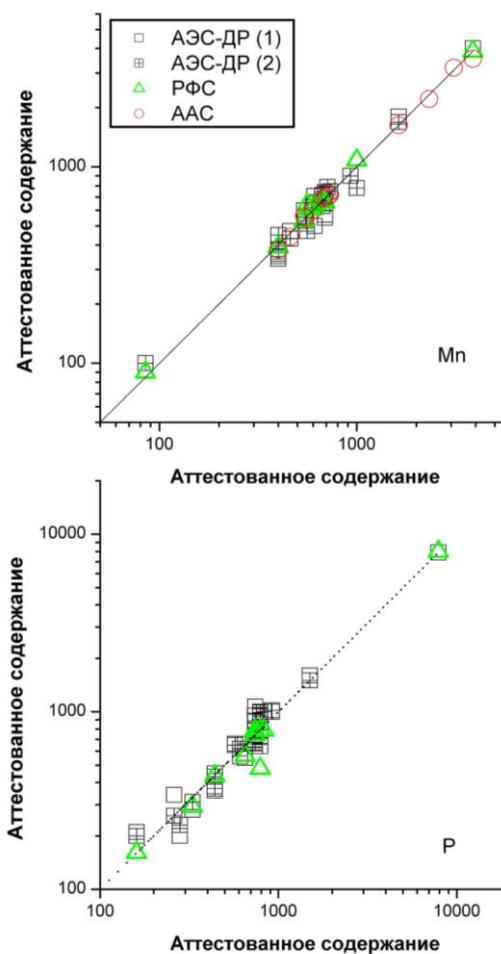


Рисунок 1. Результаты определения Р и Мп в российских и международных сертифицированных эталонных материалах почв, донных отложений, зола, полученных методами АЭС-ДР (1), АЭС-ДР (2), ААС и РФС.

схем определения элементного состава растений. Более информативным оказалось сочетание метода инфракрасной спектроскопии (ИКС) с АЭС-ДР (1) [Васильева, Шабанова, 2019]. В связи с морфологическими особенностями почв рассмотренные наборы аналитических методов анализа почв были дополнены методами определения водородного показателя (рН – потенциометрический метод [Пансю, Готеру, 2014]) и органического углерода ($C_{орг}$ – метод Тюрина [ГОСТ 26213-2021]).

Таблица 1 – Рациональные схемы комбинирования аналитических методов для определения биофильных и токсичных элементов в почвах и растениях, а также подвижных форм нахождения элементов в почвах

Объект	Аналитические методы		Аналит	
			Валовое содержание	Концентрация в подвижной форме
Почва	РФС или ИКС		S	
	ПАЭС		Na, K, Li, Rb	
	АЭС-ДР	(1: испарение)	Si, Al, Mg, Ca, Fe, Ti, Mn, Ba, Sr, Be, Zr	
		(2: вдувание-просеивка)	B, P, Ni, Co, V, Cr, Mo, Sn, Pb, Cu, Zn, Ag, Bi, Cd, Sb, As, F, W, Li, Ge, Tl	
	Потенциометрия		рН	
Метод Тюрина		$C_{орг}$		
Растения	РФС или ИКС		S, Cl и Br	
	АЭС ДР (1: испарение)		Al, B, Ba, Be, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Si, Sr, Ti, V, Zn и Zr	
Почва	АЭС-ИСП		–	
Растения			Si, Al, Mg, Ca, Na, K, Fe, Ti, Mn, Ba, Rb, Sr, Se, Hg, S, B, P, Ni, Co, V, Cr, Mo, Sn, Pb, Cu, Zn, Bi, Cd, Sb, As, Li	
			Si, Al, Mg, Ca, Fe, Ti, Mn, P, Na, K, Li, Rb, Ba, Sr, B, Ni, Co, V, Cr, Mo, Sn, Pb, Cu, Zn, Ag, Bi, Cd, S, Se, Sb, As, Hg	

Таким образом, для изучения распределения элементов в сопряженных средах "почва – растение" составили рациональные схемы комплексования методов/методик (табл. 1). Согласно предложенным схемам, определяется широкий круг элементов без изменения агрегатного состояния анализируемого вещества (при определении валовых содержаний элементов), обеспечиваются нижние границы аналитов меньше значений регионального фона и ПДК для валовых и подвижных форм элементов при минимальных финансовых и временных затратах [Shabanova et al., 2022].

При выявлении геохимических особенностей почвенного покрова г. Улан-Батор и установлении элементных профилей разновидовых растений, произрастающих в разных почвенно-климатических условиях, предложенные рациональные схемы показали свою полноту и состоятельность. Полученная первичная геохимическая информация позволяет: выполнить картирование распределения валовых содержаний и подвижных

форм элементов; оценить степень загрязнения почвы; установить источники загрязнений с помощью многомерных методов статистического анализа данных.

2. *Для корректной интерпретации экологической ситуации и классификации источников поступления микроэлементов в городские почвы с помощью многомерного статистического анализа структура аналитико-геохимических данных должна содержать информацию о макро- и микроэлементном составе, а также показатели pH и $C_{орг}$.*

При изучении городских почв, которые имеют мелкоконтурность, широкое пространственное варьирование свойств, низкую буферную способность и утрату плодородия, важно знать не только содержание химических элементов в них, но и их геохимическую структуру для отслеживания связи с подстилающими породами и выявления потенциальных загрязнителей [Бямбасурэн и др., 2018а]. Информация о макросоставе почв необходима при изучении механизмов закрепления микроэлементов (процессы сорбции, окисления-восстановления) на геохимических барьерах, т.е. образования новых алюмосиликатных, железистых, карбонатных и марганцевых минералов [Водяницкий, 2008]. Изучение миграции микроэлементов с учётом поведения макроэлементов позволяет однозначно выявить источники загрязнения почвы, охарактеризовать их природное и/или антропогенное происхождение и оценить класс опасности заражения поверхностных почв г. Улан-Батор с помощью геостатистического анализа данных (корреляционный, кластерный и факторный анализ) [Byambasuren et al., 2014; Бямбасурэн и др., 2018а; 2018б; Shabanova et al., 2019; Tsagaan et al., 2021]. Результаты этих статистических методов значительно зависят от структуры изучаемых данных. Незначительное изменение структуры или отсутствие в ней каких-либо данных могут привести к искажённым или ошибочным экологическим выводам.

Выявление структуры данных для установления связи между макро- и микроэлементами на территории города выполнено по аналитическим данным для образцов, отобранных в 2010 г. и характеризующих только старую часть города вдоль долины р. Туул, т.е. районы: Сухэ-Батор (СБ: юг); Чингэлтэй (Ч: юг); Баянгол (БГ: весь район); Хан-Уул (ХУ: север); Баянзурх (БЗ: центр). Во всех точках районов ХУ, СБ и Ч растительный покров занимал более 50 % территорий, а в районах БЗ и БГ присутствуют точки с полностью уничтоженной растительностью. Составлено три варианта наборов данных: (а) полный список только макро- и микроэлементов; (б) полный список макро- и микроэлементов с дополнением почвенных показателей $C_{орг}$ и pH; (в) сокращённый список макроэлементов и полный список микроэлементов с включением $C_{орг}$ и pH.

С одной стороны, при описании взаимосвязи макроэлементов (Si, Al, Mg, Ca, Fe, Ti, Na, K, P, S) и показателей (pH и $C_{орг}$) в почвах г. Улан-Батор с помощью кластерного и факторного анализов выделены группы макроэлементов, которые отражают механический состав почв [Shabanova et al., 2019; Бямбасурэн и др., 2018б] отдельных

районов (рис. 2), и подтверждают геохимическую структуру почв ранее установленную с помощью дорогостоящих аналитических исследований [Баярсайхан, 2009; Amarsaikhan et al., 2014; Amgalan et al., 2016].

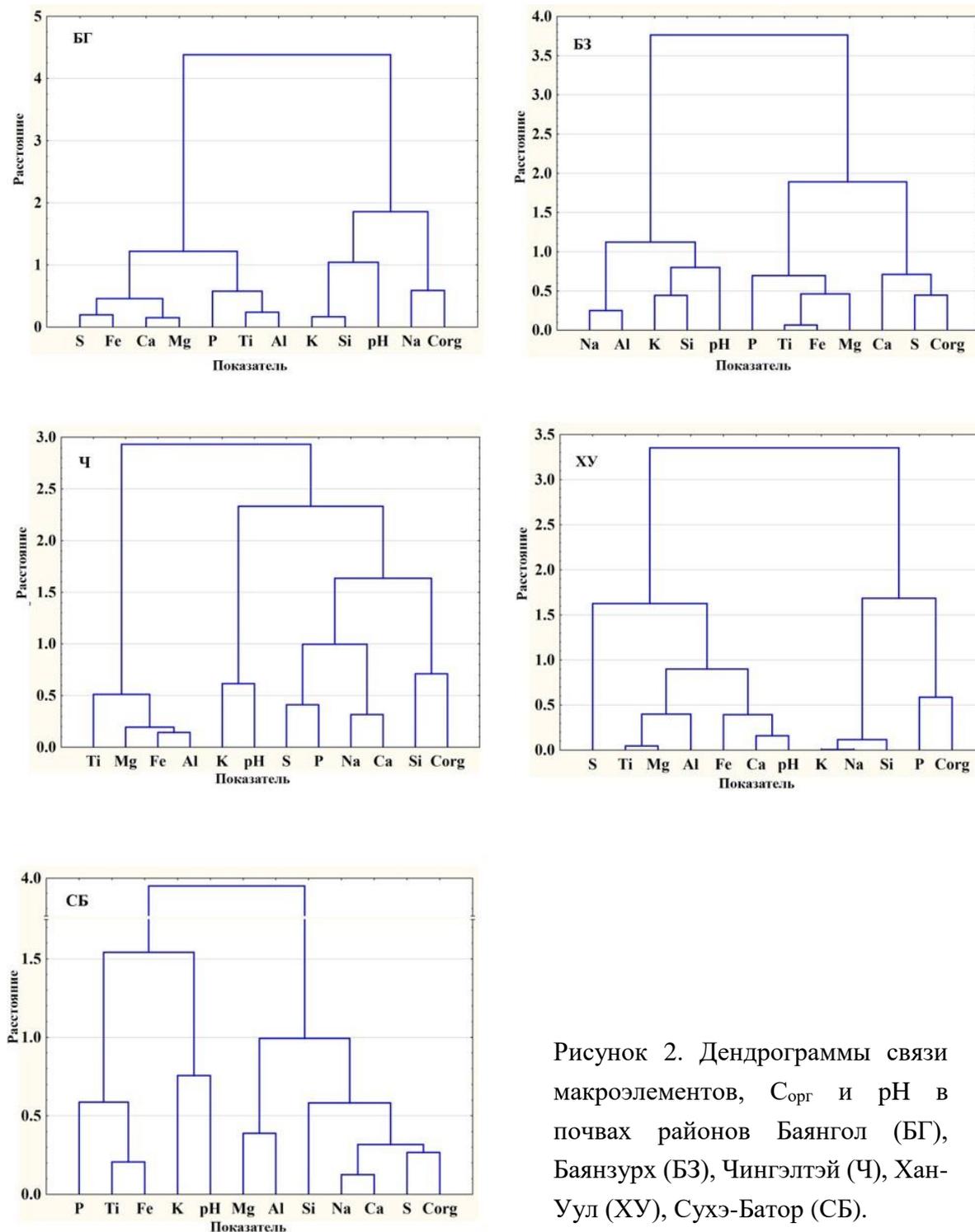


Рисунок 2. Дендрограммы связи макроэлементов, $C_{орг}$ и pH в почвах районов Баянгол (БГ), Баянзурх (БЗ), Чингэлтэй (Ч), Хан-Уул (ХУ), Сухэ-Батор (СБ).

В каждом из районов выделяется песчаная фракция (Si-K-Na-pH). В этой ассоциации кремний соответствует, в основном, кварцу и характеризует песчаный грунт, образующийся механическим выветриванием кварца, полевых шпатов, глины и обломков гипса в сухом климате Монголии. Материнские породы на этой территории

состоят, в основном, из кислых щелочных горных пород, содержащих натрий и калий [Shabanova et al., 2019]. Появление фосфора в группах, представляющих песчаную фракцию в районах ХУ и Ч, объясняется повышенной адсорбцией фосфатов почвами обогащённых натрием и имеющих рН выше 6.5 [Mourice, 2009]. Причём в районах, где наблюдается растительный покров, к элементам песчаной фракции подключается органический углерод, и чем ближе районы к реке, тем выше вероятность вхождения в группы фосфора и серы. Последнее указывает на увеличение глинистых и илистых фракций почв. Схожесть элементного состава глинистой и илистой фракций затрудняет однозначное их разделение. Поэтому выдвинуто предположение, что на территории города глинистая фракция почвы, характеризуемая элементами Mg, Ti, Fe и Al, трудно отделима от илистой фракции, которая чаще обогащена Ca и S. В разных районах содержания этих элементов также коррелируют с $C_{орг}$ и P, что косвенно указывает на их антропогенное происхождение [Shabanova et al., 2019]. Во всех районах увеличение $C_{орг}$ обеспечивает снижение показателя рН. Следовательно, для озеленения города необходимо проводить мероприятия по нейтрализации почв. Во всех районах наблюдаются образования алюмосиликатных, железистых и карбонатных минералов.

Таблица 2 – Коэффициенты двумерной корреляции между макро- и микроэлементами: структура данных вариант (а); значимые величины отмечены звездочкой ($p > 0.05$)

Элемент	Si	Na	K	P	Al	Mg	Fe	Ti	Ca	S
Mn	-0.08	-0.26*	-0.02	0.31*	0.40*	0.75*	0.72*	0.48*	0.03	-0.19
Li	0.28*	0.09	0.35*	0.33*	0.62*	0.73*	0.51*	0.43*	-0.33*	-0.37*
Ba	-0.12	0.06	0.09	0.31*	0.03	0.05	0.03	0.00	-0.08	0.12
Sr	-0.11	0.10	-0.17	0.17	0.10	-0.15	-0.14	0.05	0.37*	0.11
B	0.07	0.16	0.25*	0.04	0.33*	0.22	0.36*	0.11	-0.05	-0.38*
Ge	0.03	-0.05	0.00	0.19	0.30*	0.24	0.33*	-0.06	0.14	-0.15
F	-0.76*	-0.33*	-0.36*	0.14	-0.20	-0.18	0.30*	-0.31*	0.10	0.24
Ni	-0.39*	-0.05	-0.17	0.26*	0.03	0.01	0.08	0.06	0.22	0.16
Co	-0.67*	-0.29*	-0.29*	0.41*	-0.07	0.12	0.25*	-0.05	0.14	0.07
V	-0.40*	-0.12	-0.12	0.44*	0.25*	0.42*	0.45*	0.27*	-0.10	-0.38*
As	-0.63*	-0.44*	-0.41*	-0.06	-0.20	-0.14	0.30	-0.23	0.09	0.24
Pb	0.25*	-0.17	-0.09	0.15	0.06	0.06	-0.08	0.12	0.05	0.23
Cu	-0.42*	-0.41*	-0.47*	-0.11	-0.29*	-0.26*	0.06	-0.29*	0.34*	0.49*
Zn	-0.20	-0.29*	-0.34*	0.01	-0.09	0.02	0.18	-0.13	0.25*	0.20
Sn	-0.08	-0.27*	-0.24	0.02	-0.12	-0.15	0.04	-0.25*	0.20	0.18
Ag	-0.09	-0.22	-0.05	0.61*	0.08	0.09	0.08	0.05	0.07	0.19
Sb	0.00	-0.23	-0.25*	-0.22	-0.18	-0.11	0.05	0.00	-0.01	0.28*
Mo	-0.34*	-0.46*	-0.60*	-0.34*	-0.48*	-0.32*	0.12	-0.57*	0.34*	0.73*
Cr	-0.02	-0.41*	-0.39*	-0.19	-0.44*	-0.39*	0.02	-0.30*	-0.06	0.50*
Tl	-0.37*	-0.31*	-0.40*	0.01	-0.37*	-0.22	0.01	-0.45*	0.32*	0.45*
Bi	-0.32*	-0.38*	-0.32*	-0.11	-0.29*	-0.26*	0.21	-0.24	0.09	0.46*
Cd	-0.65*	-0.39*	-0.51*	0.12	-0.36*	-0.19	0.17	-0.41*	0.35*	0.58*

С другой стороны, использование при корреляционном анализе варианта (а) набора данных (табл. 2), выделяет для членов группы (Mn-Li-Ba-Sr-B-Ge) положительную

корреляцию с такими элементами как Si, Na, K, P, Al, Fe, Mg, Ti и отрицательную с Ca и S, что, несомненно, подтверждает их природное происхождение [Shabanova et al., 2019; Бямбасурэн и др., 2018]. Наиболее значимая корреляция с элементами глинистой фракции почвы наблюдается для Mn и Li, источником которых, вероятно, являются углистые метаморфические сланцы и неценовые пестрые глины подстилающих пород. Следующие группы элементы (Mg-Ti-Fe-Al) и (K-Na-Si) имеют, в основном, отрицательные взаимосвязи с типичными поллютантами (Pb-Sb-Ag-Cu-Zn-Sn) и (Ni-Co-V-As-F)-(Mo-Bi-Cd-Cr-Tl). Каждый из перечисленных загрязнителей имеет положительные корреляции только с S и/или P. Содержания этих поллютантов в 50-90 % проб выше геохимического фона и связаны с серой, что предполагает поступление этих загрязнителей из продуктов горения твёрдого топлива (уголь, древесина) и горюче-смазочных материалов (дизельное топливо, бензин) [Бямбасурэн и др., 2012; Vasilyeva et al., 2013]. Положительная корреляция (Ni, Co, V, As, F и Ag) с P и Ca, предположительно, характеризует их как вовлеченные в природное формирование поверхностных почв города в процессе седиментации органических веществ.

Таблица 3 – Коэффициенты двумерной корреляции между макро- и микроэлементами: структура данных вариант (б); значимые величины отмечены звездочкой ($p > 0.05$)

Элемент	C _{орг}	pH	Si	Na	K	Al	Mg	Ca	Fe	Ti	P	S
Mn	-0.13	0.68*	-0.19	0.56*	-0.21	0.94*	0.11	0.04	0.40*	0.19	-0.67*	0.36*
Li	-0.14	-0.25	0.82*	-0.15	-0.21	-0.17	-0.23	0.07	-0.32	0.53*	-0.05	0.05
Ba	-0.17	0.22	-0.38*	0.09	0.83*	-0.29	0.04	0.00	-0.28	-0.83*	0.23	-0.63*
Sr	-0.08	0.67*	-0.16	0.61*	-0.19	0.91*	0.08	0.12	0.28	0.17	-0.75*	0.36*
B	-0.11	0.76*	-0.18	0.66*	-0.21	0.94*	0.00	-0.02	0.24	0.18	-0.72*	0.38*
Ge	-0.10	-0.42*	0.49*	-0.33	-0.09	-0.35*	-0.06	0.20	-0.24	0.26	0.27	-0.01
F	-0.15	-0.26	0.82*	-0.17	-0.21	-0.17	-0.26	-0.02	-0.33	0.54*	-0.06	0.02
Ni	-0.43*	-0.58*	0.19	-0.20	-0.37*	-0.39*	0.39*	-0.28	0.46*	0.25	0.32	0.04
Co	-0.23	0.49*	0.39*	0.35*	-0.14	0.64*	-0.10	0.07	-0.02	0.42*	-0.59*	0.19
V	-0.16	-0.26	0.82*	-0.18	-0.21	-0.17	-0.30	-0.05	-0.33	0.54*	-0.05	0.02
As	-0.31	-0.65*	0.15	-0.32	-0.41*	-0.41*	0.38*	-0.30	0.47*	0.26	0.38*	0.06
Pb	-0.19	-0.33	0.95*	-0.17	-0.21	-0.24	-0.21	0.10	-0.34	0.55*	-0.03	0.04
Cu	-0.16	0.76*	-0.09	0.47*	-0.21	0.82*	-0.01	-0.02	0.29	0.22	-0.83*	0.36*
Zn	-0.08	0.70*	-0.17	0.65*	-0.20	0.87*	0.03	0.07	0.23	0.17	-0.79*	0.37*
Sn	-0.05	0.72*	-0.15	0.51*	-0.23	0.79*	-0.05	0.06	0.25	0.21	-0.86*	0.41*
Ag	0.13	-0.79*	0.17	-0.56*	0.20	-0.80*	0.02	0.01	-0.23	-0.16	0.93*	-0.36*
Sb	0.13	-0.16	0.22	-0.09	0.25	-0.30	-0.25	0.08	-0.38*	-0.20	0.20	-0.17
Mo	0.22	0.58*	-0.10	0.41*	-0.18	0.70*	-0.24	0.20	0.02	0.17	-0.68*	0.50*
Cr	-0.16	-0.27	0.91*	-0.13	-0.22	-0.18	-0.27	0.09	-0.35*	0.56*	-0.08	0.07
Tl	0.51*	-0.03	-0.13	-0.15	-0.33	0.26	-0.20	0.22	0.02	0.25	-0.09	0.53*
Bi	0.26	-0.67*	0.22	-0.40*	-0.05	-0.41*	-0.03	0.32	-0.21	0.07	0.73*	-0.02
Cd	0.65*	-0.16	-0.01	-0.27	-0.27	0.13	-0.23	0.27	-0.09	0.26	0.10	0.44*
Be	0.54*	-0.17	-0.01	-0.36*	-0.01	-0.05	-0.22	0.50*	-0.28	0.06	0.22	0.17
Zr	-0.25	-0.40*	-0.34	-0.12	-0.30	-0.23	0.48*	-0.35*	0.59*	-0.02	0.32	0.09

Анализ структуры данных варианта (б) подтверждает сделанные выводы о генезесе микроэлементов в изучаемых почвах (табл. 3.) с некоторыми дополнениями. Например,

накопление Mn железистыми минералами из глинистой фракции зависит от pH. Калий имеет положительную значимую корреляцию только с барием, что указывает на поступление Ba из подстилающих пород. Натрий оказывается более информативным макроэлементом, так как он влияет на состав групп и подгрупп песчаной и илистой фракций почв. Поэтому из структуры данных возможно исключение K. Показатель pH демонстрирует, что влажность почв способствует накоплению Cu, Zn, Sn и Mo. Вариации содержания Pb, наиболее вероятно, связано с разной автотранспортной нагрузкой районов [Tserenpil et al., 2016]. Положительные корреляции S с разными микроэлементами указывают на её поступление в почвы из продуктов горения твёрдого топлива и горюче-смазочных материалов. Корреляционная матрица указывает на литогенную природу Li, Ba, Sr и Zr, а также на образование железистых минералов, обогащённых типичными для городской среды поллютантами.

Таблица 4 – Коэффициенты двумерной корреляции между макро- и микроэлементами: структура данных вариант (в); значимые величины отмечены звездочкой ($p > 0.05$)

Элемент	C _{орг}	pH	Si	Na	Al	Mg	Ca	Fe	Ti	P
Mn	-0.09	0.07	-0.51*	-0.41*	-0.02	0.21	-0.11	0.58*	0.31	0.13
Li	-0.17	0.23	-0.22	-0.26	0.38*	0.58*	-0.10	0.56*	0.62*	0.20
Ba	-0.17	0.14	0.24	0.36*	0.54*	0.30	0.12	0.07	0.07	-0.01
Sr	-0.04	0.16	-0.11	0.16	0.41*	0.28*	0.32*	0.30*	-0.02	-0.22
B	-0.12	0.33*	-0.03	-0.12	0.26	0.30*	0.09	0.46*	0.18	0.05
Ge	0.01	0.26*	-0.01	-0.15	0.06	0.09	0.21	0.37*	0.05	0.12
F	0.13	0.03	-0.71*	-0.57*	-0.07	0.21	0.24	0.72*	0.17	0.00
Ni	-0.02	-0.07	-0.24	-0.08	-0.06	0.26	0.19	0.32	0.32	0.42*
Co	0.02	-0.06	-0.54*	-0.50*	-0.09	0.31	-0.09	0.52*	0.51*	0.44*
V	-0.11	0.02	-0.24	-0.36*	0.23	0.56*	-0.32	0.49*	0.61*	0.40*
As	0.22	-0.06	-0.62*	-0.60*	-0.13	0.13	0.15	0.55*	0.03	-0.06
Pb	0.03	-0.03	0.26	0.22	-0.20	-0.28	0.13	-0.36	-0.17	0.30
Cu	0.18	-0.03	-0.35*	-0.16	-0.27	-0.14	0.39*	0.26	-0.22	-0.04
Zn	0.26	-0.03	-0.12	-0.16	-0.17	-0.11	0.26	0.16	-0.21	0.16
Sn	0.14	0.05	-0.11	-0.09	-0.13	-0.23	0.21	0.18	-0.18	-0.06
Ag	-0.05	0.20	-0.06	-0.09	-0.26	-0.14	0.24	0.02	0.01	0.50*
Sb	0.12	-0.14	0.02	0.19	-0.12	-0.19	0.05	-0.24	-0.16	0.09
Mo	0.38*	-0.20	-0.34*	-0.18	-0.35*	-0.39*	0.32	0.07	-0.61*	-0.28
Cr	0.22	-0.22	-0.09	-0.12	-0.43	-0.48*	-0.05	-0.26	-0.41	-0.18
Tl	0.21	-0.12	-0.49*	-0.35*	-0.32	-0.30	0.16	0.19	-0.28	-0.12
Bi	0.35*	-0.10	-0.36*	-0.22	-0.30	-0.29	0.44*	0.13	-0.47*	-0.17
Cd	0.29	-0.23	-0.64*	-0.41*	-0.35*	-0.13	0.21	0.31	-0.13	0.14
Be	-0.16	0.43*	0.02	0.00	0.24	0.06	0.25	0.36*	0.05	-0.08
Zr	-0.29	0.11	0.47*	0.29	0.31	0.33	-0.13	-0.01	0.58*	0.47*

Вариант (в) структуры данных, исключаящий из набора данных K и S, не меняет сделанные выводы о связи макро- и микроэлементов (табл. 4). Необходимость включения в структуру данных показателей pH и C_{орг} подтверждена значением показателя общности данных – одним из результатов факторного анализа по разным наборам данных (табл. 5). Высокие значения общности (более 85 %) указывают на то, что

извлечённые главные компоненты хорошо представляют переменные. Низкий уровень общности указывает на необходимость включения в статистическую модель дополнительных химических элементов / показателей [Бямбасурен и др., 2018;

Таблица 5. – Величина показателя общности данных в зависимости от структуры данных

Показатель	Общность данных для варианта структуры данных		
	(а)	(б)	(с)
pH	–	0.99	0.81
C _{орг}	–	0.90	0.87
Si	0.94	1.00	0.91
K	0.89	0.96	–
Na	0.93	0.97	0.9
P	0.84	0.99	0.91
F	0.95	0.98	0.91
Al	0.77	1.00	0.92
Mg	0.95	0.96	0.94
Ca	0.86	0.95	0.88
Fe	0.86	0.98	0.95
Ti	0.88	0.95	0.96
S	0.96	0.96	–
Ba	0.81	0.90	0.85
Sr	0.77	1.00	0.86
Li	0.92	0.96	0.95
B	0.9	1.00	0.85
Mn	0.95	1.00	0.93
Ni	0.80	0.95	0.80
Co	0.92	0.99	0.90
V	0.95	0.98	0.95
Cr	0.87	0.96	0.89
Mo	0.97	0.99	0.95
Sn	0.93	1.00	0.96
Pb	0.94	0.99	0.94
Cu	0.92	1.00	0.94
Zn	0.81	1.00	0.86
Ag	0.89	1.00	0.88
Sb	0.87	0.72	0.87
As	0.94	0.97	0.89
Tl	0.97	0.94	0.96
Bi	0.78	0.85	0.88
Ge	0.91	0.96	0.90
Cd	0.96	0.95	0.94
Be	0.76	0.98	0.81
Zr	0.79	0.91	0.80
Число главных компонент	9	6	8

Shabanova et al., 2019; Tsagaan et al., 2019; 2021]. Иначе для ряда микроэлементов, которые являются потенциальными поллютантами, невозможно сделать однозначный вывод об источниках их поступления в почву.

С помощью кластерного и факторного анализов выделяются одни и те же группы элементов. Факторный анализ дополнительно раскрывает связи между подгруппами. Результаты факторного анализа, выполненного для варианта (б) структуры данных, выделяют меньшее число главных компонент при более надёжном описании рассматриваемых показателей (табл. 5). Показатель pH оказывает влияние на поведение P, Ag, Bi, Sr, B, Mn, Co, Mo, Sn, Cu и Zn, подтверждая, что влажность почв создаёт особые условия накопления и переноса токсичных и потенциально токсичных ХЭ. Остаются не до конца раскрытыми связи сурьмы. Это вызвано её неоднородным распределением на всей территории города.

Проведённый статистический анализ распределения ХЭ указывает на несколько типов геохимических барьеров на территории города и антропогенное поступление Pb, Cu, Zn, Sn, Sb, Mo, Cr и Bi.

3. Для описания экологического состояния городских почв и растений, произрастающих на них, необходимо сочетание геостатистического картирования (поиск и выделение источников загрязнения) и вычисление двух индексов: комплексный индекс загрязнения почв (Z_c) и показатель токсичности для растений (отношение содержаний Pb/Mn). Оценивание степени загрязнения почв г. Улан-Батор выявило только точечные потенциально опасные участки.

Степень загрязнения поверхностной почвы г. Улан-Батор токсичными и потенциально токсичными элементами оценили с помощью индивидуальных и комплексных индексов: PI – индекс единичного загрязнения, I_{geo} – индекс геоаккумуляции, Z_c – суммарный показатель загрязнения и IPI – индекс суммы загрязнений. В расчётах использовано региональное фоновое содержание химических элементов, установленное в работе [Vasilyeva et al., 2013]. Состояние почв на всей территории города оценено в течение всего времени наблюдений (2010, 2011, 2017 и 2019 гг.).

Показатели индексов PI и I_{geo} варьируют от "низкого" до "очень высокого" загрязнения, косвенно указывая на разнообразие минерального и химического состава почвенного покрова города. Хотя оба индивидуальных индекса выделяют одни и те же наборы элементов-загрязнителей, которые также подтверждены статистическим разведочным анализом, их оценки степени опасности отличаются. Расхождение в классах может быть связано с отсутствием учёта погрешности аналитических данных в индексе PI . Введение постоянного множителя при вычислении индекса I_{geo} и увеличение числа классов загрязнения, частично минимизирует погрешности данных. Пробы, признанные заражёнными, представляли разные функциональные зоны (промышленная, транспортная, селитебная, рекреационная) во всех районах города. Например, стронций признан опасным в почвах района Баянзурх; бор – в почвах районов Баянгол, Баянзурх и Чингэлтэй; хром – в почвах районов Баянгол, Баянзурх и Хан-Уул; вольфрам – в почвах районов Баянгол, Баянзурх, Хан-Уул и Сухэ-Батор. Это указывает на геохимическую неоднородность территории города, которая определена размещением источников загрязнения и варьированием сорбционных свойств почв. Таким образом, индекс I_{geo} оказался полезнее, чем индекс PI , из-за получения более детальных и устойчивых к аналитическим погрешностям оценок.

В основе расчётов комплексных индексов Z_c и IPI лежит индекс единичного загрязнения (PI). Однако в индексе Z_c есть поправка на число накапливаемых в почвах химических элементов, т.е. для которых показатель $PI_i > 1.0$, что обеспечивает разное число классов уровня загрязнения почв: для индекса IPI только четыре, для Z_c – пять. Более детальные оценки предпочтительнее при мониторинге состояния почв. Уровень загрязнения почвенного покрова города, согласно комплексным индексам, варьирует от "неопасного" до "чрезвычайного высокого". Однако значительная часть почв города

находится в относительно благоприятной экологической ситуации (рис. 3) [Бямбасурэн и др., 2022; Vyambasuren et al., 2019; Бямбасурэн и др., 2017].

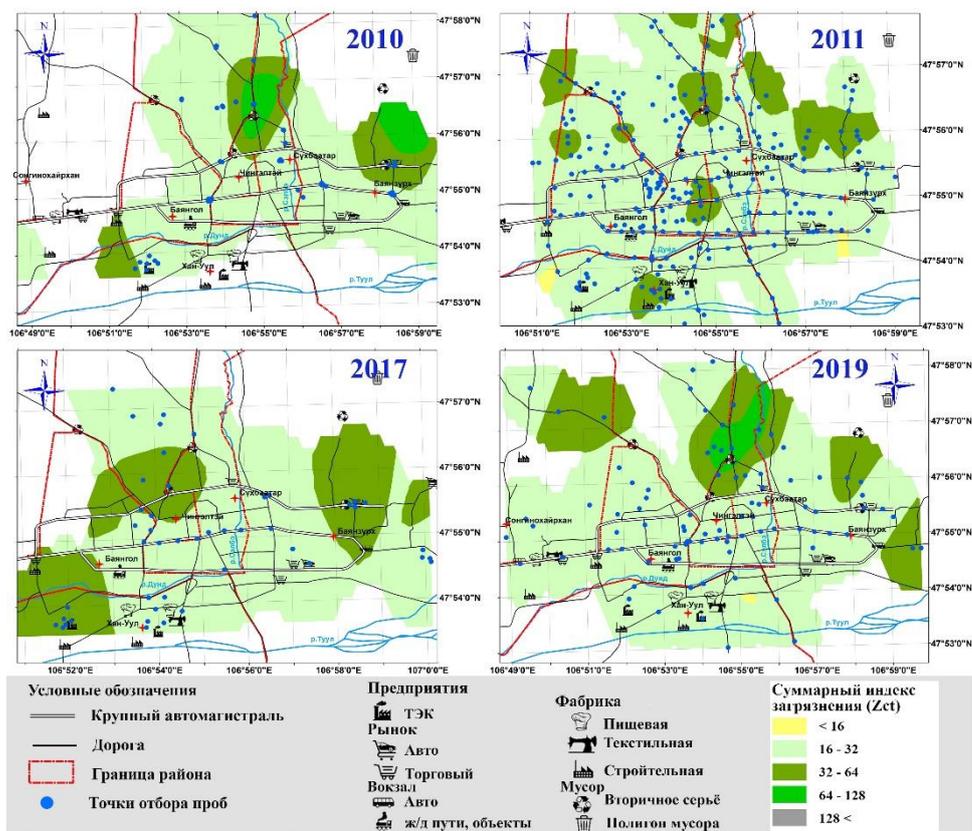


Рисунок 3. Пространственное распределение потенциально токсичных и токсичных элементов в поверхностной почве г.Улан-Батор в соответствии с индексом Z_c

Очаги заражения почв, в соответствии с индексами Z_c и IPI , характерны для районов Чингэлтэй, Сухэ-Батор, Хан-Уул и Баянгол, т.е. для территорий, где расположены теплоэлектростанции (2010, 2011 и 2017 г.), плотная юрточная застройка и вдоль транспортных магистралей (весь период наблюдений). Это свидетельствует о том, что основной причиной обогащения городских почв г. Улан-Батора металлами и металлоидами являются пыле-аэрозоли от продуктов горения угля и горюче-смазочных материалов [Vasilyeva et al., 2013; Бямбасурэн и др., 2018а; Бямбасурэн и др., 2018б; Shabanova et al., 2019]. Основным недостатком индивидуальных и комплексных индексов является невозможность установления связи загрязнителей с другими химическими элементами без проведения дорогостоящих аналитических исследований, как это устанавливается при расчётах с использованием факторного анализа (рис. 4).

Установление экологического состояния почв путём оценивания интегральных характеристик биохимических процессов в растениях, например, таких как фотосинтез, ферментогенез и уровень загрязнения токсичными элементами, соответственно через отношения валовых содержаний Fe/Mn, Cu/Zn и Pb/Mn [Аржанова, 1996; Кошелева и др., 2013; Парибок и др., 1982] зависит от видовых особенностей растений.

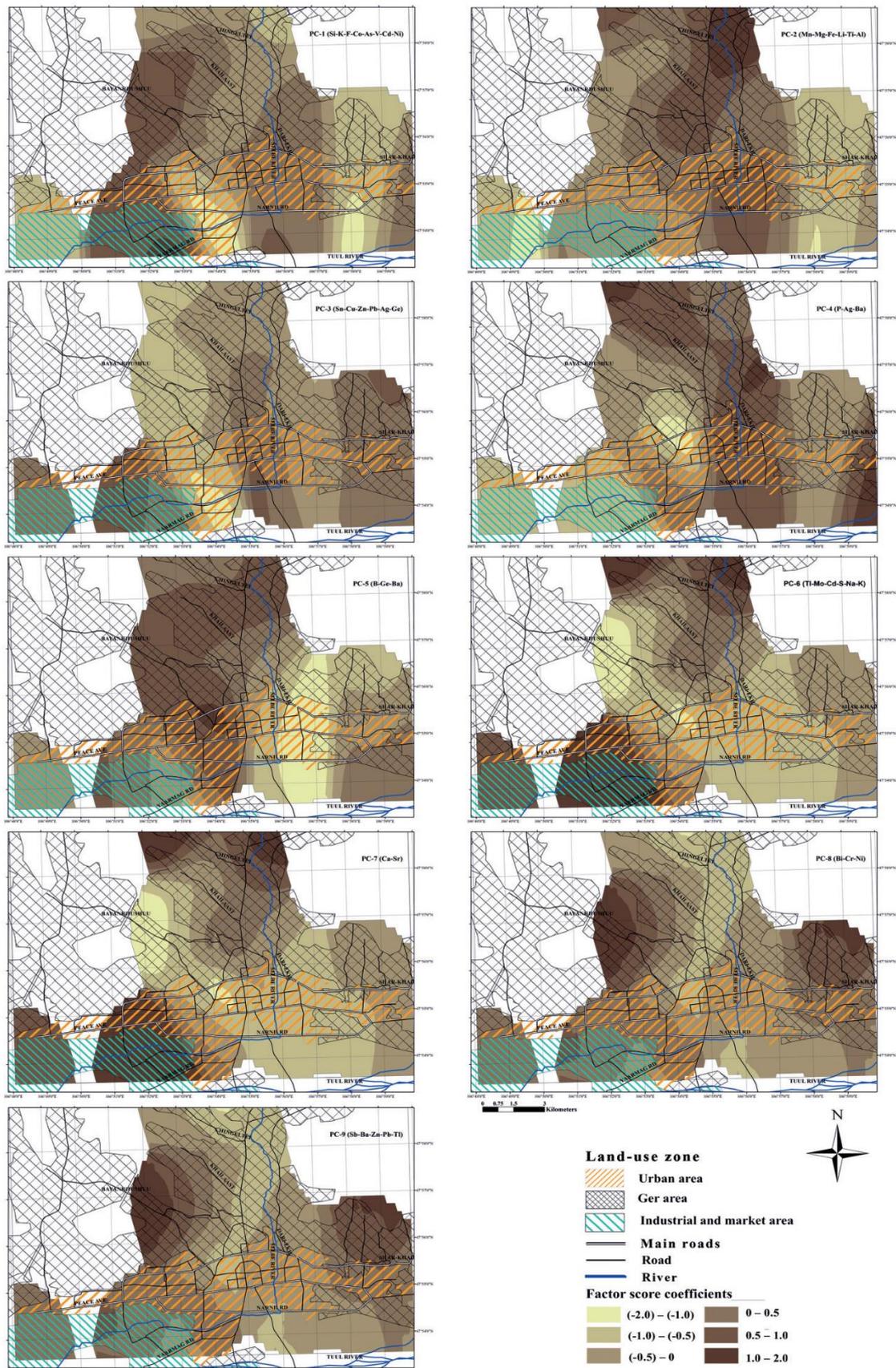


Рисунок 4. Географическое распределение макро- и микроэлементов в почвах г. Улан-Батор, согласно факторному анализу

Для выявления видов растений с наибольшим откликом на антропогенное влияние в 18 точках районов Баянзурх, Сухэ-Батор, Хан-Уул, Чингэлтэй и Налайх были отобраны

пробы почв и произрастающих на них древесных и травянистых растений: тополь (*Pópulus trémula*) и лиственница (*Lárix sibirica*), одуванчик обыкновенный (*Taráxacum officinále*, *Taráxacum vulgáris*), подорожник (*Plantaginaceae*), чабрец (*Thymus L.*).

При определении 24 биофильных и токсичных элементов в почвах и вегетативных органах растений были установлены ряды распределения элементов в последовательностях "почва – ветки – листья (хвоя)" для древесных растений и "почва – корни – стебли – листья – цветы" для травянистых растений, а также впервые рассчитаны процентные количества элементов в корнях и листьях изученных травянистых растений, характеризующих влияние корневого барьера на перенос из почвы в растения биофильных, условно-биофильных и потенциально токсичных элементов. Кроме этого, сопоставлены элементные профили чабреца, произрастающего в монгольской степи (Цонжин-Болдог, р-н Налайх) и на побережье оз. Байкал (пос. Сахюрта, Иркутская обл., Россия). Высокая влажность вблизи озера по сравнению с сухим степным климатом Монголии способствует переносу элементов из почвы в растения. Сходство элементных профилей цветов указывает на преобладание генетической устойчивости растений вида *Thymus L.* и менее значимое влияние почвенно-климатических условий произрастания [Vasil'eva et al., 2022].

При оценивании степени загрязнения городских почв применение показателя фотосинтеза (Fe/Mn) затруднено из-за его зависимости от особенностей поверхности вегетативных органов растений и отсутствия критерия сравнения между собой древесных и травяных растений, отобранных на территориях с разным уровнем антропогенного влияния. Использование показателя интенсивности ферментогенеза (Cu/Zn) нецелесообразно из-за малой контрастности этой оценки, так как синтез и деструкция белков зависят от большого числа ХЭ, а не только меди и цинка. Показатель токсичности (Pb/Mn) является наиболее контрастным (вариации до 10 раз и более) и применим к листьям (цветам) как травянистых, так и древесных растений. Оценивание степени загрязнения почв с использованием древесных и травянистых растений в качестве индикаторов выявило только точечные потенциально опасные участки. Малый объём выборок проб растений не позволил выполнить картирование территории и выбрать растения наиболее чувствительные к загрязнению почв. Показатели биохимических процессов характеризуют состояния почв только качественно из-за особенностей почвенно-растительного покрова г. Улан-Батор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенность почв города заключается в их формировании на различных по литологическому составу отложениях. На всей территории города почвы обогащены бытовыми и промышленно-строительными отходами, в независимости от типа зон землепользования и района города.

Для г. Улан-Батор характерно два типа селитебных зон (многоэтажная и юрточная застройка) и растительный покров на этих территориях изменяется от природного и искусственно восстановленного до полностью уничтоженного. Зоны рекреационного назначения (парки, скверы) занимают менее 5 % территории города и соседствуют только с многоэтажной застройкой.

Изучение элементного состава городских почв и растений, произрастающих на них, проведено с помощью предложенных рациональных схем комплексирования методов/методик. Полнота и состоятельность этих схем показана при определении валовых содержаний макро- и микроэлементов, концентрации подвижных форм в более 600 почвенных и растительных пробах г. Улан-Батор, отобранных в 2010, 2011, 2017 и 2019 гг. Полученная первичная геохимическая информация позволила: выполнить картирование распределения валовых содержаний и подвижных форм элементов; оценить степень загрязнения почв; установить источники загрязнений с помощью многомерных методов статистического анализа данных.

Взаимоотношения между макро- и микроэлементами, источников поступления микроэлементов в поверхностные почвы и растения исследованы с помощью последовательного применения процедур статистического анализа данных. Для этого изучено влияние структуры геохимических данных на результаты факторного анализа. Показано, что для надёжного выявления источников загрязнения почв, в выборку данных необходимо обязательно включать показатели рН и $C_{орг}$.

Выводы об экологическом состоянии почвенной среды г. Улан-Батор сделаны с помощью индексов загрязнения (PI , I_{geo} – индивидуальные и Zc и IPI – комплексные) и показателей биохимических процессов в растениях, а дополнительное свидетельство правильности выделения очагов заражения – геостатистическим оцениванием на основе факторного анализа. Наиболее информативным оценками признаны: для почв – комплексный индекс Zc ; для растений – показатель токсичности.

Все химические элементы в почвах имеют типичное поведение для городских почв и один или более источник поступления потенциальных поллютантов, а значительные изменения в содержаниях ХЭ в аммонийно-ацетатных вытяжках из исследуемых почв подтверждают наличие точечных загрязнений. Несколько типов геохимических барьеров выявлены на территории города.

В качестве наиболее заражённых территорий города с помощью индексов выделяются районы Чингэлтэй, Хан-Уул и Сухэ-Батор. В течение всего периода наблюдений эколого-геохимическая обстановка оставалась неизменной для почв районов Чингэлтэй, Сухэ-Батор и Баянгол, т.е. для территорий, где присутствуют юрточная застройка, высокая заселённость, плотная речная сеть, а также преобладают грунтовые дороги и происходит опесчанивание почв. Центральная часть города из-за

преобладающих направлений ветра (западное, северо-западное, юго-западное и северное) оказывается под угрозой заражения продуктами горения угля со стороны районов юрточной застройки (северная часть города) и ТЭС-3 (западная часть города).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК, Scopus, WoS

1. **Бямбасүрэн Ц.**, Шабанова Е.В., Корольков А.Т., Васильева И.Е., Очирбат Г., Хуунхэнхуу Б. Распределение микроэлементов в почвах г. Улан-Батора // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Науки о Земле. – 2018. – Т. 26. – С. 31-45. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.26.31>
2. Shabanova E.V., **Ts. Vyambasuren**, G. Ochirbat, Vasil'eva I.E., B. Khuukhenkhuu, Korolkov A.T. Relationship between major and trace elements in Ulaanbaatar soils: a study based on multivariate statistical analysis // Geography, Environment, Sustainability. – 2019. – V.12, No. 3. – P. 199-212. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-18>
3. Vasil'eva I.E., Shabanova E.V., **Vyambasuren Ts.**, Khuukhenkhuu B. Elemental profiles of *Thymus L.* plants growing wild in different soil and climate conditions // Applied Sciences (Switzerland). – 2022. – V.12, No. 8. – Article 3904. <https://doi.org/10.3390/APP12083904>
4. Shabanova E.V., Vasil'eva I.E., **Vyambasuren T.**, Ganbaatar O., Khuukhenkhuu B., Khomutova M.Y. Rational scheme of chemical analysis of urban soils for ecological monitoring // Advances in Science, Technology & Innovation book series. (ASTI) / H. Chenchouni, H.I. Chaminé, Md.F. Khan, B.J. Merkel, Z. Zhang, P. Li, A. Kallel, N. Khélifi (eds). – IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development. Springer Nature Switzerland AG, 2022. – P. 207-209. https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-72543-3_46

Статьи в других рецензируемых журналах

5. **Vyambasuren Ts.**, Otgontuul Ts., Khuukhenkhuu B., Vasilyeva I.E., Shabanova E.V., Proydakova O.A. Multivariate statistical approaches to identify heavy metal sources in Ulaanbaatar soil // International Journal of Environment, Ecology, Family and Urban Studies (IJEEFUS). – 2014. – V. 4, No.5. – P. 27-34.
6. **Ц. Бямбасүрэн**, Б. Хүүхэнхүү, Шабанова Е.В, Васильева И.Е, Г. Очирбат, Ц. Цэдэнбалжир. Индексийн аргуудыг хөрсний хүнд элементийн бохирдлын үнэлгээнд хэрэглэсэн үр дүнгээс. (*Application of some assessment approaches to study of Ulaanbaatar surface soil pollution with heavy metals*) // Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences. – 2017. – V. 57, № 01 (221). – P. 18-28. <https://doi.org/10.5564/pmas.v57i.221.749.10>
7. **Ц. Бямбасүрэн**, Б. Хүүхэнхүү, Шабанова Е.В., Васильева И.Е., Б. Энхзул. Улаанбаатар хотын өнгөн хөрсөн дэх хүнд элементүүдийн хөдөлгөөнт хэлбэрийн агуулгын судалгаа (*Some results of investigation of mobile forms of heavy metals in Ulaanbaatar soil*) // Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences. – 2017. – V.57, № 03(223). – P. 21-36. <https://doi.org/10.5564/pmas.v57i3.886>
8. **Vyambasuren Ts.**, Khuukhenkhuu B., Ochirbat G., Vasilyeva I.E., Shabanova E.V., Tsedenbaljir D., Korolkov A.T. Background concentration of microelements in Ulaanbaatar regional natural surface soil // Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences. – 2018. – V. 58, № 02(226) – P. 15-24. <https://doi.org/10.5564/pmas.v58i2.1001>
9. **Tsagaan B.**, Byambaa Kh., Ganbaatar O., Darizav Ts. Temporal variation of the pseudo total content of heavy metals in Ulaanbaatar soil // Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences. – 2019. – V. 59, № 03(231). – P. 28-31. <https://doi.org/10.5564/pmas.v59i3.1243>
10. **Tsagaan B.**, Ganbaatar O., Darizav Ts., Byambaa Kh. Content and distribution of some chemical elements in the poplar leaves (*Populus Laurifolia*) in Ulaanbaatar // Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences. – 2020. – V. 60, № 04(236). – P. 18-27. <https://doi.org/10.5564/pmas.v60i4.1502>

11. **Tsagaan B.**, Ganbaatar O., Otgonbayar A. Results of the study of pH and organic matter in the surface soil of Ulaanbaatar // *Proceedings of the Mongolian Academy of Science*. – 2021. – V. 61, № 04 (240). – P. 15-22. <https://doi.org/10.5564/pmas.v61i04.1928>

Публикации в сборниках и материалах научных конференций

12. **Бямбасурэн Ц.**, Шабанова Е.В., Пройдакова О.А., Васильева И.Е., Хуухэнхуу Б., Отгонтуул Ц., Гуничева Т. Н. Изучение степени загрязнения почвенного покрова города Улан-Батор. Современные проблемы геохимии // *Современные проблемы геохимии: Материалы Всерос. совещ.* – Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2012. – В 3-х томах. – Т. 1. – С. 128-131.
13. Vasilyeva I.E., Shabanova E.V., Doroshkov A.A., Proydakova O.A., Otgontuul Ts., Khuukhenkhuu B., **Vyambasuren Ts.** Distribution of toxic and essential elements in soils of Ulaanbaatar city. Pollution assessment of urban areas // *Environment and sustainable development in Mongolian plateau and surrounding regions: Proceedings of the IX intern. conf. /ed. F.K. Tulokhonov*. – Ulan-Ude, 2013. – V. 1. – P. 67-71.
14. **Ц. Бямбасурэн**, Шабанова Е.В., Васильева И.Е., Корольков А.Т., Г. Очирбат, Б. Энхзул, Б. Хуухэнхуу. Результаты многомерного статистического анализа комплексных геохимических элементов в почвах г.Улан-Батора // *Социально-экологические проблемы Байкальского региона и сопредельных территорий: Тез. докл. междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. 100-летию Иркут. гос. ун-та. / Иркутск (23 апреля 2018 г.)* – С. 256-258.
15. **Бямбасурэн Ц.**, Шабанова Е.В., Васильева И.Е., Корольков А.Т., Очирбат Г., Хуухэнхуу Б. Экологическое описание почв г. Улан-Батора с помощью методов многомерного статистического анализа // *Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование. Современное минералообразование: Тр. VII Всерос. симп. с междунар. участием и XIV Всерос. чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана. / Отв. ред. Г.А. Юргенсон.* – 2018. – С. 122-128.
16. **Vyambasuren Ts.**, Shabanova E.V., Vasilyeva I.E., Korolkov A.T., Ochirbat G., Enkhzul B., Tsendenbaljir D., Khuukhenkhuu B. Identification of technogenic and anthropogenic sources of trace elements in Ulaanbaatar soil // *GMIT Symposium on Environmental Science and Engineering: Book of Abstracts / Nalaikh (31 August - 2 September 2018)*. – P. 34.
17. **Ц. Бямбасурэн**, Шабанова Е.В., Васильева И.Е., Корольков А.Т., Г. Очирбат, Б. Хуухэнхуу. Биогеохимическая характеристика макро- и микроэлементов в почве г. Улан-Батора // *Социально-экологические проблемы Байкальского региона и сопредельных территорий: Тез. докл. междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. 100-летию высшего биолог. образования в Вост. Сибири / Иркутск (22 апреля 2019 г.)* – С. 155-157.
18. **Vyambasuren Ts.**, Ochirbat G., Shabanova E.V., Vasil'eva I.E., Khuukhenkhuu B., Tsendenbaljir D., Korolkov A.T. Ulaanbaatar soil heavy metal pollution and spatial distribution // *2nd International conference on environmental science and technology: proceeding / Ulaanbaatar (13-16 June 2019)* – P. 264.
19. **Vyambasuren Ts.**, Korolkov A.T., Shabanova E.V., Vasil'eva I.E., Khuukhenkhuu B., Ochirbat G., Tsendenbaljir D. Geological features of the Ulaanbaatar territory as the base soil formation // *16th East Eurasia International Workshop – Present Earth Surface Processes and Long-term Environmental Changes in East Eurasia: Book of abstracts / Ulaanbaatar (16-21 September 2019)* – P. 63.
20. Васильева И.Е., Шабанова Е.В., **Бямбасурэн Ц.**, Хуухэнхуу Б., Дорошков А.А. Элементные профили тимьяна дикорастущего в различных почвенных и климатических условиях // *Петрология и геодинамика геологических процессов: Материалы XIII Всерос. петрогр. совещ. / Иркутск (06-13 сентября 2021 г.)* – Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2021. – В 3-х томах. – Т. 1. – С. 94.

21. Шабанова Е.В., **Бямбасурэн Ц.**, Очирбат Г., Васильева И.Е. Формирование структуры данных для выявления геохимических особенностей почв методами многомерного статистического анализа (На примере почв г. Улан-Батор) // Петрология и геодинамика геологических процессов: Материалы XIII Всерос. петрогр. совещ. / Иркутск (06-13 сентября 2021 г.) – Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2021. – В 3-х томах. – Т. 3. – С. 219.
22. **Бямбасурэн Ц.**, Очирбат Г., Шабанова Е.В., Васильева И.Е. Характеризации геохимических особенностей почвенного покрова г. Улан-Батор методами многомерного статистического анализа // Современные направления развития геохимии: сб. всерос. конф. / Иркутск (21-25 ноября 2022 г.) – Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2022. – В 2-х томах. – Т. 1. – С. 82-86.