

УДК631.4:504.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ МЕТОДОМ МНОГОМЕРНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА (НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ ДАЛДЫНСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ, СЕВЕРО-ЗАПАДНАЯ ЯКУТИЯ)

Гололобова Анна Григорьевна¹,
nuta0687@mail.ru

¹ Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,
Россия, 677000, г. Якутск, пр. Ленина, 39.

Актуальность. В настоящее время промышленная деятельность, процессы которой приводят к ухудшению условий окружающей среды, приобретает все большие масштабы. В связи с чем необходимы проекты и мероприятия для снижения ущерба окружающей среде и восстановления нарушенных земель, которые основаны на предварительных исследованиях свойств почв, содержания и распределения микроэлементов и тяжелых металлов в условиях техногенеза.

Цель: определить закономерности пространственного распределения микроэлементов и источники их поступления в поверхностный слой почв на территории промышленной площадки Удачинского горно-обогатительного комбината с помощью инструментов многомерного статистического анализа.

Объекты: доминирующие типы почв северо-таежных ландшафтов Северо-Западной Якутии.

Методы: потенциометрический, колориметрический, атомно-абсорбционный, статистические методы (описательный, анализ нормального распределения, факторный анализ – методом главных компонент, пространственный).

Результаты. Коэффициенты вариации микроэлементов в верхнем слое почв исследуемой территории распределяются в следующем порядке убывания: $Zn > Ni > Mn > Cr > Co > Pb > Cd > As$. Концентрации элементов Pb , Ni , Cd , Co , Cr , Zn и As в поверхностном слое почв исследуемой территории не имеют нормального распределения, за исключением Mn . Выявлены три фактора, объясняющих дисперсию содержания микроэлементов и тяжелых металлов в почвах территории северо-таежных ландшафтов Северо-Западной Якутии. Первый фактор заметно влияет на распределение Co , Cr , Ni и Zn , второй – на Cd , третий – на As и Mn . Определены основные источники и очаги загрязнения. На содержание Co , Cr и Ni в поверхностном слое почвы оказывают воздействие карьер кимберлитовой трубки «Удачный» и хвостохранилище № 1, на Zn – селитяная территория г. Удачный, на As – полигон высокоминерализованных рассолов.

Ключевые слова:

микроэлементы, тяжелые металлы, подвижные формы, загрязнение почв, кимберлитовое поле, многомерный статистический анализ, пространственное распределение, Якутия.

Введение

В экосистемах различного масштаба все компоненты связаны между собой потоками вещества и энергии, что обеспечивает цикличность процессов, устойчивость экосистем во времени и высокое качество природных сред. Однако эти же самые процессы способствуют и распространению материальных загрязнителей со всеми вытекающими для экосистем последствиями. Влияние антропогенных факторов может приводить к нарушению естественных потоков и перераспределению химических элементов в компонентах окружающей среды [1–4]. Горнодобывающая деятельность является основным источником попадания тяжелых металлов в окружающую среду [5–7]. А антропогенные процессы, приводящие к загрязнению окружающей среды, протекают быстрее природных [8].

Однако именно почва является едва ли не самой уязвимой геосферой с точки зрения техногенного воздействия. Почвы служат основным поглотителем загрязняющих веществ в наземной экосистеме. Наиболее сильные негативные изменения в результате интенсивной хозяйственной деятельности испытывают почвы промышленных регионов [9], к которым относится Республика Саха (Якутия). Якутия – самый крупный субъект Российской Федерации, который является уникальной территорией по разнообразию, количеству и качеству полезных ископаемых. Всего по Республике

Саха (Якутия) учитывается 2116 месторождений полезных ископаемых по 59 видам минерального и углеводородного сырья [10], которые обуславливают развитие различных видов промышленности. В связи с этим Якутия отличается потенциально высоким уровнем загрязнения почвенного покрова и уничтожением плодородного слоя земли за счет аккумуляции токсичных веществ, в том числе тяжелых металлов. В настоящее время уже имеются участки промышленных предприятий с чрезвычайно опасной эколого-геохимической ситуацией [11, 12], проблемами накопленного экологического ущерба [13], трансформацией естественного ландшафта [14–16] и др.

Для снижения ущерба окружающей среде, наносимого промышленными предприятиями, необходимы проекты и мероприятия, направленные на восстановление нарушенных земель. Они должны быть основаны на предварительных исследованиях свойств почв, содержания микроэлементов и тяжелых металлов, и их связи с окружающей средой [17]. Определение уровня загрязнения и оценка пространственной изменчивости концентрации тяжелых металлов в верхнем слое почвы необходимы для лучшего понимания сложных взаимосвязей почвенных процессов [18].

С быстрым развитием компьютерных технологий и различных статистических методов анализа они становятся одним из важнейших инструментов для изучения проблем геохимии окружающей среды. Это

связано с пространственной неоднородностью почвы и распределением тяжелых металлов по таким ковариатам, как ее характеристики, влияющие на процесс загрязнения. Следовательно, методы многомерного анализа позволят определить уязвимые зоны, на которых должны быть сосредоточены основные усилия по мониторингу и рекультивации.

Учитывая вышеизложенное, задача данной работы состояла в том, чтобы: 1) выявить особенности пространственного распределения тяжелых металлов в поверхностном слое почв северо-таежных ландшафтов Северо-Западной Якутии, 2) определить элементы с наиболее высокой факторной нагрузкой, которые представляют «следы» вторичного загрязнения, 3) определить источники и очаги загрязнения, представляющие экологический риск.

Объект и методы исследования

Район исследования. Исследования проводились в центральной части Далдыно-Алакитского горнопромышленного района Северо-Западной Якутии (Северо-Восток России) на территории Далдынского кимберлитового поля (N 66°25'47"E 112°24'07") (рис. 1). Административно-территориально входит в Мирнинский район Республики Саха (Якутия). В пределах Далдынского кимберлитового поля расположено одно из крупнейших промышленных предприятий Якутии – Удачный горно-обогатительный комбинат

(далее Удачный ГОК) АК «АЛРОСА» (ПАО), существующий с 1971 г. В настоящее время Удачный ГОК ведет разработку двух коренных месторождений алмазов: кимберлитовых трубок «Удачная» и «Зарница». Кимберлитовая трубка «Удачная» расположена в 15 км от города Удачный. Добыча ведется открытым и закрытым способом. Кимберлитовая трубка «Зарница» находится в том же кимберлитовом поле и располагается в 18 км от города. Добыча ведется открытым способом. Выбросы в атмосферу Удачным ГОКом увеличились с 1,36 тыс. т в 2005 г. до 3,85 тыс. т в 2020 г. [19].

В геологическом отношении территория исследования приурочена к области сопряжения юго-западного склона Анабаро-Оленёкской антеклизы и северо-восточного борта Тунгусской синеклизы. В строении территории участвуют кристаллические породы архея, карбонатные и терригенно-карбонатные отложения венда, кембрия, ордовика и силура, терригенные образования карбона. Глубина залегания кристаллического фундамента составляет 2,4–2,5 км. Осадочный чехол интродуцирован пластовыми телами и дайками долеритов, трубками взрыва, дайками и жилами кимберлитов. Четвертичные отложения представлены различного генезиса песками, галечниками, пылеватыми супесями, часто со значительными включениями крупнообломочного материала [20].

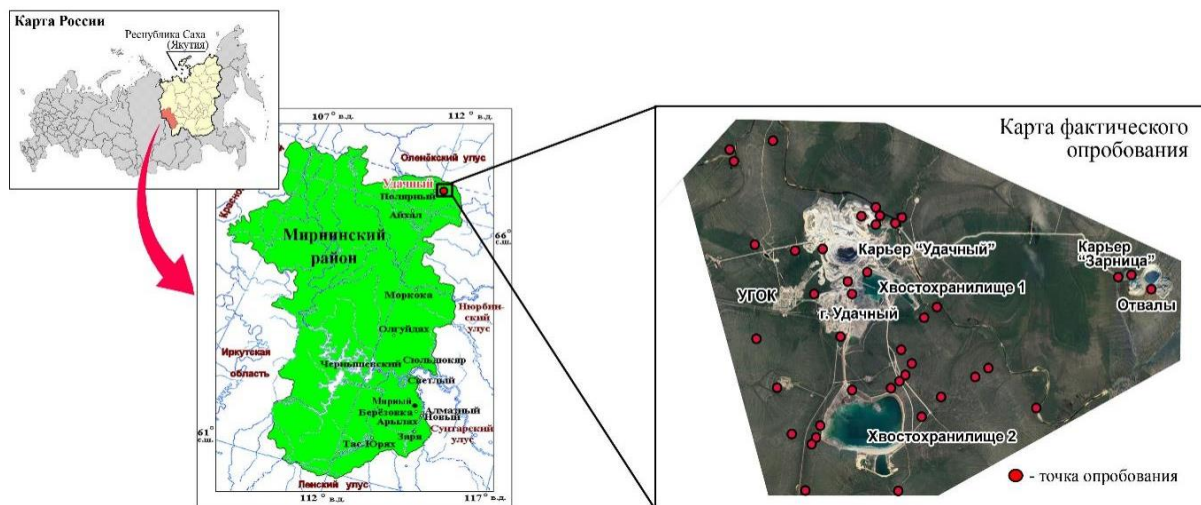


Рис. 1. Карта месторасположения района исследования с нанесением точек опробования почв на территории Удачинского горно-обогатительного комбината

Fig. 1. Map of the location of the study area with plotting soil sampling points on the territory of the Udachny Mining and Processing Division (MPD)

Климат резко-континентальный, который проявляется в больших годовых колебаниях температуры воздуха и относительно малом количестве выпадающих осадков. Среднегодовая температура составляет 12,7 °С, амплитуда максимума и минимума средних данных по месяцам составляет от –41,6 до 14,8 °С. Перепад средних температур между холодным и теплым временами года очень велик и составляет от 34 до –64 °С [21].

Среднегодовые суммы осадков равны 200–250 мм и 75–80 % их выпадает в теплое время года (с апреля

по октябрь). Снежный покров сохраняется в течение 220–250 дней в году, высота его не велика [22].

Территория Далдыно-Алакитского района находится в зоне сплошного распространения и близкого залегания многолетнемерзлых пород, но особенности и мощность их строения различны в разных климатических зонах. Мощность мерзлотной толщи определяется в 250–400 м. Многолетняя мерзлота способствует фиксированию осадков в пределах деятельного слоя почвы. В условиях низкой относительной влаж-

ности воздуха, высоких летних температур и недостаточного количества атмосферных осадков летнее оттаивание мерзлоты способствует постоянному увлажнению почвы. При увеличении мощности деятельного горизонта, если исключается дополнительное грунтовое увлажнение, происходит заметное иссушение почв с поверхности, что в свою очередь сказывается на структуре и флористическом составе напочвенного покрова и древостоя [21].

Растительный покров территории исследования находится в подзоне редкостойных северотаежных лиственничных лесов. Доминируют лиственничные леса, занимающие 80 % площади территории, представленные такими типами, как лиственничники ольховниковые (*Lárix gmelinii*, *Duschekia fruticosa* Rupr.), брусничные (*Vaccinium vitis-idaea* L.), багульниково-брусничные (*Ledum palustre* L., *Vaccinium vitis-idaea* L.), голубично-брусничные (*Vaccinium uliginosum* L., *Vaccinium vitis-idaea* L.), багульничково-зеленомошные (*Ledum palustre* L., *Aulacomnium palustre*), голубично-зеленомошные (*Vaccinium uliginosum* L., *Aulacomnium palustre*), багульничково-сфагновые (*Ledum palustre* L., *Sphagnum angustifolium*) [22].

Почвы Далдыно-Алаkitского района входят в состав Восточно-Сибирской мерзлотно-северотаежной области бореального (умеренно холодного) пояса почв России. По почвенно-географическому районированию Якутии [23] территория относится к Вилюйско-Оленекской почвенной провинции и Оленеко-Мархинскому району.

В составе общей площади почвенного покрова Далдыно-Алаkitского района криоземы (по классификации WRB Cryosols) занимают 40,7 %. Мерзлотные аллювиальные (по WRB Fluvisols) почвы являются интразональным типом и в пределах данной территории располагаются на 19,4 % площади. Подчиненными типами являются мерзлотные дерново-карбонатные неполноразвитые (по WRB Rendzic Leptosols) и мерзлотные дерново-глеевые почвы (по WRB Umbric Gleysols) [21].

Отбор проб и химический анализ. В ходе полевой работы в 2019 г. выбраны ключевые участки (42 точки наблюдения) в пределах промышленной площадки Удачинского ГОК (вблизи карьера кимберлитовых трубок, отвалов, хвостохранилищ, фабрики и других техногенных объектов), на которых отобраны почвенные образцы. Опробование почв на территории исследования проводилось из поверхностного слоя почв на глубину 0–20 см, где происходят основные изменения физико-химических свойств, связанные с антропогенной нагрузкой. Всего отобрано 42 пробы почвенного материала.

Все образцы почвы высушены при комнатной температуре и просеяны через сито с размером ячеек 1 мм для удаления крупных корней растений, гравийного материала и других посторонних включений. В подготовленных почвенных образцах определяли следующие параметры:

1) показатель pH в суспензии почвы 1:2,5 методом потенциометрии на pH-метре S220 Mettler Toledo Seven Compact Advanced;

2) содержание органического вещества (гумуса) по И.В. Тюрину методом колориметрии на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ;

3) подвижные формы Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn и As методом атомно-абсорбционной спектрометрии на МГА-915 ГК Люмэкс в экстрагенте 1 Н HNO₃. Микроэлементы и тяжелые металлы, извлекаемые 1 Н HNO₃, представляют собой максимальное содержание потенциально доступных металлов в растениях [24].

Химический анализ каждого образца проводили в двух повторях относительно контроля аналитической точности. Точность анализов проверяли по эталону почвенного стандарта СДПС-1 (*AlbicPodzols*) и ССК-1 (*HaplicCalcisols*).

Многомерный статистический и пространственный анализ. Перед статистическим анализом распределение набора данных оценивали с помощью методов «Box-plot», Колмогорова-Смирнова ($p < 0,2$) и Шапиро-Уилка ($p < 0,05$); если значение распределения не было нормальным, данные преобразовывались в соответствии с принципами анализа композиционных данных (CoDa) [25–27] с использованием центрированного логарифмического преобразования (clr) – нового подхода, который недавно доказал свою пригодность [28–30]. Для построения модели использовались только данные концентрации элементов, преобразованные в clr. Преобразование clr выполняется путем нормализации (центрирования) логарифмически преобразованных частей для каждого образца по его среднему геометрическому значению. Логарифмическая трансформация преобразует композиционные данные (относительные значения с постоянной суммой) в многомерное реальное пространство, в то время как нормализация к среднему геометрическому гарантирует, что элементы с более высокой концентрацией не будут чрезмерно подчеркиваться в дальнейшем статистическом анализе. Для преобразования необработанных данных в данные clr-преобразования использовалось программное обеспечение CoDaPack (версия 2.03.01, Университет Жироны, Испания) [31].

Для интерпретирования данных в соответствии с теорией происхождения элементов – литогенного, антропогенного или смешанного, применялся метод главных компонент, который представляет собой ортогональное линейное преобразование и отображает данные из исходного пространства признаков в новое пространство меньшей размерности [32, 33]. В данной работе применялся метод Varimax normalized для ортогонального вращения. Также применен кластерный анализ для разделения переменных на несколько взаимоисключающих кластеров, который наглядно отражает расстояние между элементами и позволяет выявить взаимосвязь между элементами. В качестве эталона измерения использовалась корреляция Пирсона [34].

Пространственный анализ позволяет выявить пространственные закономерности формирования ареалов загрязнения и их источники, представляющие угрозу экологического риска [35]. На основании опорных точек, взятых в разных местах поверхности, создается (интерполируется) непрерывная поверхность.

Результаты и их обсуждение

Свойства почв и концентрации микроэлементов в почве. Описание исходных данных основных статистических показателей свойств почв и концентрации

микроэлементов, определенных в пробах верхнего слоя почв промышленной площадки Удачинского горно-обогатительного комбината приведены в табл. 1.

Таблица 1. *Дескриптивная статистика свойств почв и содержания подвижных форм микроэлементов на территории промышленной площадки Удачинского горно-обогатительного комбината (n=42)*

Table 1. *Descriptive statistics of soil properties and mobile forms of trace elements on the territory of the industrial site of the Udachny Mining and Processing Division (n=42)*

Элементы, мг/кг Elements, mg/kg	Mean	Geom. mean	Median	Min	Max	CV	SD	SE	Skewness	Kurtosis
Pb	2,3	1,5	2,5	0,1	5,2	2,5	1,6	0,2	0,04	-1,3
Ni	13	8,5	17	0,4	27	78	8,8	1,4	-0,0004	-1,4
Mn	30	30	31	16	40	40	6,4	1,0	-0,4	-0,6
Cd	0,1	0,1	0,1	0,004	0,9	0,03	0,2	0,03	3,1	12
Co	3,9	2,3	4,8	0,03	7,5	7,3	2,7	0,4	-0,2	-1,7
Cr	4,5	2,5	4,8	0,1	8,5	11	3,3	0,5	-0,1	-1,8
Zn	21	12	16	1,3	101	499	22	3,4	2,3	6,0
As	0,2	0,1	0,2	0,02	0,7	0,02	0,2	0,03	1,3	1,7
pH	7,8	7,8	8,1	6,3	9,1	0,7	0,8	0,1	-0,3	-1,4
SOM, %	6,3	3,3	3,5	0,4	34	68	8,3	1,9	2,5	7,0

Примечание: Mean – среднее арифметическое; Geom. mean – среднее геометрическое; Median – медиана; Min – минимальное значение; Max – максимальное значение; CV (coefficient of variation) – коэффициент вариации, %; SD (standard deviation) – стандартное отклонение; SE (standard error of the mean) – стандартная ошибка среднего значения; Skewness – асимметрия; Kurtosis – эксцесс; SOM (soil organic matter) – органическое вещество почвы (гумус).

Содержание органического вещества (гумуса) в верхнем слое почв исследуемой территории достаточно высокое и характеризуется высокой пространственной изменчивостью (CV=68 %), максимальные значения превышают минимальное в 30 раз. Значения асимметрии указывают на то, что распределение гумуса ненормальное. Также высокое расхождение содержания гумуса подтверждается тем фактом, что медианное значение этого показателя намного ниже его среднего значения. Связано это скорее с условиями промышленного освоения территории, когда почвы утрачивают естественные черты из-за техногенного подавления процессов почвообразования. Поэтому существующие методы определения гумуса отражают не столько гумусированность почв, сколько общее содержание углерода в них, в составе которого существенна техногенная составляющая (углеводороды топлива, смазочные масла и др.) [36].

pH почвы колеблется от 6,3 до 7,4. По показателю pH видно, что пространственная вариабельность совсем мала (CV=0,7 %) и не соответствует нормальному распределению, имеет отрицательную асимметрию. Большинство почвенных образцов были нейтральными, их доля составляла 40 %, 35 % образцов почв имели слабощелочную реакцию и только 25 % слабокислую. Кислый pH частично обусловлен исходным материалом, топографией, текстурой почвы и растительностью [37, 38] и отчасти низким содержанием органического вещества. А щелочная среда способствует формированию в почвах геохимических барьеров, на которых могут осажаться и накапливаться многие тяжелые металлы [39]. Исходя из этого высока вероятность аккумуляции потенциально токсичных элементов, которые могут представлять высокую угрозу загрязнения почв.

Коэффициенты вариации микроэлементов в верхнем слое почвы Удачинского горно-обогатительного комби-

ната уменьшается в порядке Zn>Ni>Mn>Cr>Co>Pb>Cd>As. Данные результаты показывают, что распределение As, Cd, Pb, Co, Cr и Mn на территории исследования является более гомогенным, чем распределение Ni и Zn. Принято, что элементы, имеющие природное происхождение, обычно обладают низкими CV, а элементы, связанные с антропогенными источниками, характеризуются высокими CV и отражают неоднородное распределение концентраций [33, 40]. Исходя из этого можно сказать, что на концентрации Ni и Zn могут влиять как эндогенные, так и экзогенные факторы.

В природе содержание элементов подчиняется нормальному распределению при отсутствии других источников поступления поллютантов (например, антропогенных поступлений) [41]. Анализ коробчатых диаграмм «Box-plot» показал (рис. 2), что у Cr, Zn и As медиана находится примерно в середине шкалы процентилей; в диаграммах Mn, Cd, Co и Pb срединная линия проходит почти посередине прямоугольника, кроме Ni. В случае Cd, Zn и As есть несколько экстремальных выбросов, которые указывают на присутствие точек с высокими концентрациями, возможно, связанными также с внешними факторами.

Анализ данных по Колмогорову-Смирнову и Шапиро-Уилка показал, что концентрации элементов Pb, Ni, Cd, Co, Cr, Zn и As в поверхностном слое почв исследуемой территории отличаются от нормального распределения и указывают на то, что на них могут сильно влиять внешние факторы. Приблизительно нормальное распределение Mn указывает на связь с почвообразующим материалом.

После проверки данных на соответствие закону нормального распределения выполнено преобразование данных с помощью центрированного логарифмического преобразования (clr) (табл. 2). После применения данных, преобразованных с помощью clr, соответствующее стандартное отклонение явно уменьши-

лось, а медиана и среднее значение имели тенденцию к сходимости. Действительно, данные *clr* показали нор-

мальное распределение в результате уменьшения веса выбросов.

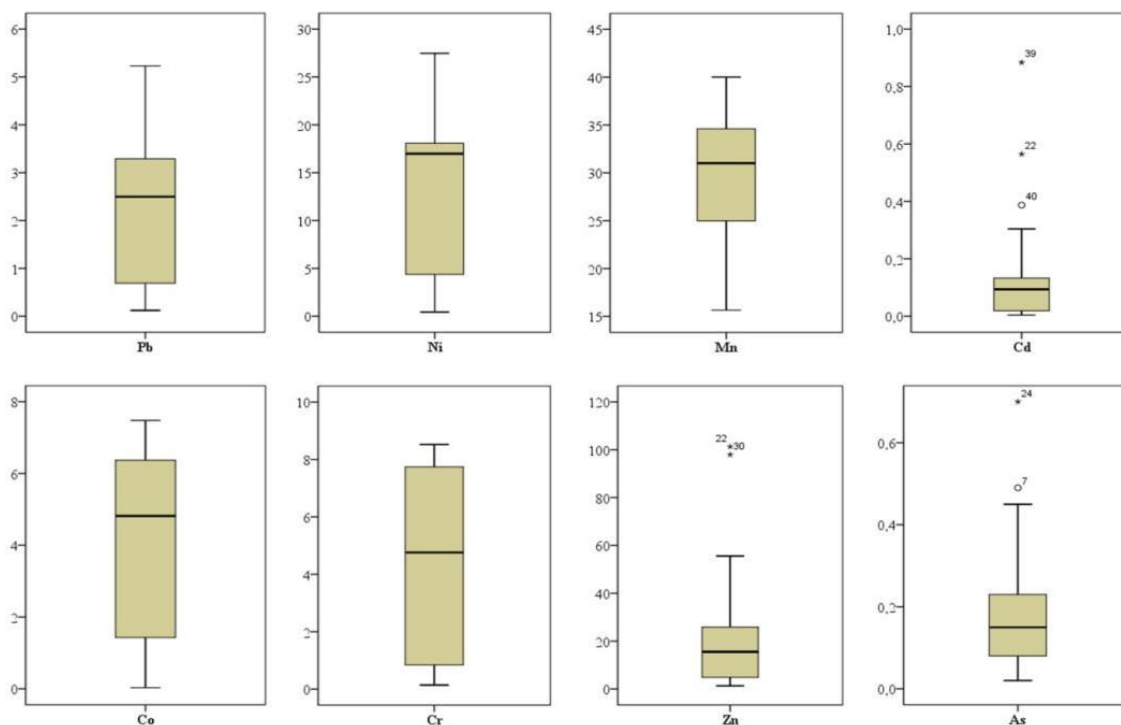


Рис. 2. Коробчатая диаграмма «Box-plot» распределения микроэлементов

Fig. 2. Box-plot distribution of trace elements

Таблица 2. Дескриптивная статистика микроэлементов, преобразованных в *clr*, на территории промышленной площадки Удачнинского горно-обогатительного комбината ($n=42$)

Table 2. Descriptive statistics of *clr*-transformed trace elements on the territory of the industrial site of the Udachny Mining and Processing Division ($n=42$)

Элементы, мг/кг Elements, mg/kg	Mean	Geometri с mean	Median	CV	SD	SE
Pb	0,03	0,02	0,03	0,5	0,7	0,1
Ni	0,16	0,13	0,16	0,4	0,6	0,1
Mn	0,48	0,44	0,43	0,7	0,8	0,1
Cd	0,002	0,001	0,001	0,9	1,0	0,1
Co	0,05	0,03	0,05	0,5	0,7	0,1
Cr	0,05	0,04	0,06	0,5	0,7	0,1
Zn	0,23	0,18	0,22	0,4	0,6	0,1
As	0,003	0,002	0,002	0,8	0,9	0,1

Примечание: Mean – среднее арифметическое; Geom. mean – среднее геометрическое; Median – медиана; CV (coefficient of variation) – коэффициент вариации, %; SD (standard deviation) – стандартное отклонение; SE (standard error of the mean) – стандартная ошибка среднего значения.

На основании сравнения гистограмм (рис. 3) исходного и композиционного массивов данных можно сделать вывод, что: а) при рассмотрении исходного массива практически для всех элементов обнаруживаются асимметричные распределения, причем эти распределения смещены в основном за счет наличия выбросов; б) набор данных, преобразованных с по-

мощью *clr*, показывает важную особенность, поскольку предполагает нормальность. Таким образом, делается вывод, что набор данных, преобразованных с помощью *clr*, и набор композиционных данных имеют два основных преимущества, а именно, они позволяют нам работать с пропорциями и улучшать нормализацию данных. Аномальные концентрации исследуемых элементов, значительно превышающие фоновые значения, являются классическими признаками тяжелой производственной деятельности.

Для выявления возможного парагенетического накопления элементов в верхних горизонтах почв использовался факторный анализ – метод главных компонент [42], минимизация количества переменных с высокой факторной нагрузкой проводилась вращением матрицы факторных нагрузок по методу Varimax normalized. Путем варимаксного вращения были получены окончательные значения собственных векторов, которые рассматриваются как «следы» источников выбросов [43] (табл. 3).

Согласно критерию Кайзера, первые три компонента с собственными значениями выше 1 имеют доминирующее влияние. Эти три фактора составляют 71,8 % от общей дисперсии выборок. Процент объясненной дисперсии для первого компонента (F1) наибольший и составляет 41,7 %, что свидетельствует о существовании одного доминирующего источника выброса или группы источников эмиссии некоторых элементов. Для остальных компонентов процент дисперсии составляет: F2 – 15,9 %, F3 – 14,2 %.

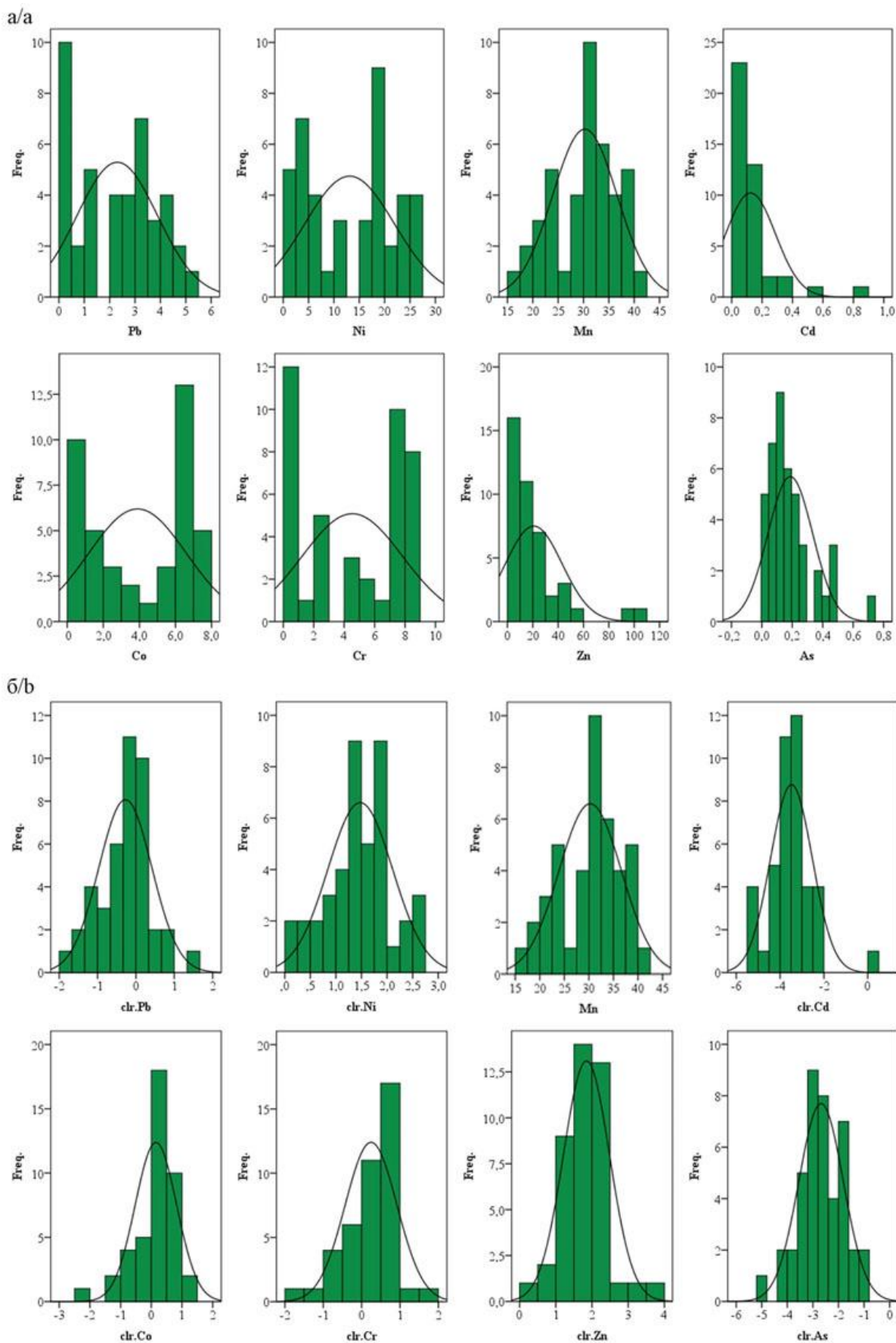


Рис. 3. Гистограммы элементов: исходные данные (а) и clr-преобразованные данные (б)
Fig. 3. Trace elements histograms: original data (a) and clr-transformed data (b)

Таблица 3. Факторная нагрузка варимаксного вращения
Table 3. Factor loading of varimax rotation

Показатели/Index	F1	F2	F3
Pb	0,44	0,33	0,45
Ni	0,94	-0,06	-0,01
Mn	0,13	-0,21	0,68
Cd	0,10	0,90	-0,01
Co	0,98	-0,12	-0,07
Cr	0,96	-0,03	0,11
Zn	0,82	0,27	0,10
As	-0,09	0,06	0,86
pH	0,18	-0,09	0,09
SOM	-0,59	0,66	-0,25
Собственные значения/Eigen value	4,17	1,59	1,42
% общей дисперсии/% of total variance	41,7	15,9	14,2

Первый компонент (F1) в основном характеризуется элементами Co, Cr, Ni и Zn (диапазон нагрузки составляет 0,82–0,98), что подтверждает сильные положительные связи между ними. Его воздействие проявляется в увеличении концентраций данных микроэлементов в поверхностном слое почвы исследуемого участка. Co, Cr и Ni являются типоморфными кимберлитам элементами, которые отражают геохимическую специфику территории Далдынского кимберлитового поля. Поэтому высокие концентрации этих элементов объясняются вторичным поступлением на поверхностный слой почвы в виде повторно взвешенной пыли почвенного материала в результате аэрогенного распространения от буровзрывных работ, ветровой эрозии отвалов и т. д., а также при воздействии антропогенной и производственной деятельности на территории промышленной площадки УГОК. R. Sain и J. Rodriguez в работах [44] и [45], соответственно, получили результаты, где Co, Cr и Ni также были сгруппированы в одном факторе в поверхностном слое почвы вокруг сталеплавильного завода в Китае и свинцово-цинкового завода в косовском Митровице и при этом имели естественные/педогенные источники поступления. Получается, что элементы Co, Cr и Ni представляют собой совокупность естественных и техногенных источников поступления элементов в почвенную среду.

Цинк, в силу своей подвижности, является одним из наиболее распространенных загрязнителей окружающей среды. У цинка высокая технофильность [46], которая с годами только возрастает [47]. Поступление Zn от техногенных источников в семь–восемь раз больше, чем от природных. Почти половина цинка поступает от различных деятельности добывающей промышленности и аккумулируется в основном в верхнем слое почв [48]. По данным ряда исследований, в зоне деятельности различных промышленных предприятий отмечается высокая концентрация Zn, которая также подтверждается факторным анализом и имеет высокую нагрузку F1 [17, 33, 49]. Часто высокие концентрации Zn связывают с воздействием транспортных средств, которые поступают от сжигания топлива, тормозных накладок, маслосборников, прокладок головок цилиндров и др. [5, 50, 51]. Помимо вышеупомянутого влияния транспортного воздействия, не исключается, что Zn может иметь и геогенное происхождение [33, 52].

Второй компонент (F2) характеризуется высокой нагрузкой Cd (0,90). Исследования показывают, что практически все предприятия выбрасывают в окружающую среду пыль, отличающуюся содержанием кадмия, которое существенно превышает его уровни в верхнем горизонте почв [33, 53]. Поэтому часто наблюдаемое обогащение кадмием поверхностных слоев связано с загрязнением [48]. В данном случае наибольшее влияние может оказывать высокое содержание органического вещества слабой степени разложения, которое выступает в роли биогенного барьера и аккумулирует высокие концентрации Cd. О чем свидетельствует положительная корреляция содержания гумуса с концентрациями кадмия.

Третий компонент (F3) имеет наименьший суммарный вклад и характеризуется высокой нагрузкой As (0,86). В поверхностном слое почв исследуемой территории содержание As в целом достаточно низкое, но имеются некоторые локальные точки с относительно высокими значениями, которые, возможно, связаны с воздействием антропогенной деятельности на промышленной площадке УГОК. Возможно, как раз эти точки и были зафиксированы как выбросы при анализе коробчатой диаграммы и показали ненормальное распределение. Невысокие концентрации As в большей степени связаны с содержанием его в горной породе [48], а значит, имеют геогенное происхождение. В F3 также можно отметить невысокую нагрузку Mn (0,68), на содержание которого влияет как исходный материал почвы, так и экзогенные воздействия.

Помимо выделенных элементов с высокими значениями факторной нагрузки, во всех компонентах прослеживается слабая нагрузка у Pb (0,33–0,45). Естественные содержания Pb в почвах наследуются от материнских пород. Однако из-за широкомасштабного загрязнения среды свинцом большинство почв обогащается этим элементом, особенно на поверхности. В литературе имеется большое число данных о содержании Pb в почве, однако иногда трудно отделить данные, характеризующие фоновые уровни Pb в почвах, от данных, связанных с загрязнением поверхностного слоя почв [48, 54, 55].

В ходе кластерного анализа построена дендрограмма с использованием корреляции Пирсона в качестве эталона измерения (рис. 4). На дендрограмме отчетливо выделяются три кластера: Ni-Cr-Co-Pb, Cd-Zn, Mn-As. Тесная ассоциация элементов предполагает, что они имеют общий источник [56]. Элементы Ni, Cr, Co, Mn и Zn входят в состав оливина, который является доминантной фазой кимберлита [57]. Co, Cr, Ni, Mn – показатели ультраосновного магматизма, элементы типоморфные кимберлитам, которые отражают геохимическую специфику Далдынского кимберлитового поля. Эти элементы хорошо распознаются по потокам вторичного рассеяния и характеризуются как природные, так и техногенные геохимические аномалии. А Zn и Pb являются индикаторами контактов кимберлитов и вмещающих пород [58]. Но в настоящей работе Zn и Cd образуют отдельный кластер, что, скорее, обусловлено тесной связью с орга-

ническим веществом [48], из-за чего происходит их сорбция в поверхностном слое почвы. Аналогичные результаты были получены и в предыдущих исследованиях [59–61].

Таким образом, прослеживается связь между группой сидерофильных (Co, Cr, Ni и Mn) и халькофильных (Zn, Cd и As) элементов, которые находят свое отражение в формировании как природных, так и техногенных геохимических аномалий в почвенном покрове.

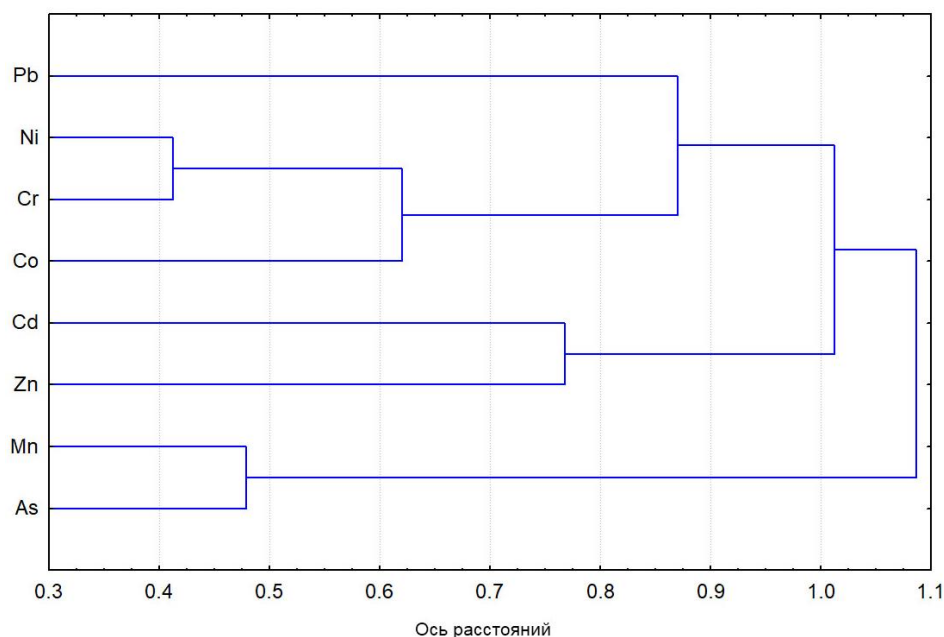


Рис. 4. Дендрограмма результатов кластерного анализа микроэлементов на территории исследования.

Fig. 4. Dendrogram results of cluster analysis for microelements on the study area

Пространственное распределение микроэлементов в поверхностном слое почвы. Карты распространения исследуемых микроэлементов в поверхностном слое почв промышленной площадки Удачинского ГОК представлены на рис. 5.

Тенденции распределения Co, Cr и Ni в верхних горизонтах почв являются схожими, что свидетельствует о их когерентности и едином источнике поступления. Наиболее высокие концентрации отмечены непосредственно в зоне влияния карьера кимберлитовой трубки «Удачный» и хвостохранилища № 1. В эту же факторную группу элементов F1 входил и Zn, но с меньшей долей. По сравнению с Co, Cr и Ni, распределение Zn в поверхностном слое почв отличается. Очаг загрязнения Zn находится непосредственно на территории города Удачный, а также хвостохранилища № 1. Исходя из этого можно сказать, что почвенная нагрузка этих металлов на поверхностный слой почвы происходит за счет воздействия антропогенных факторов.

Пространственное распределение Cd, Mn и Pb не имеет привязки к объектам территории промышленной площадки УГОК и города Удачный. Можно сделать вывод, что исходные материалы и естественные процессы повлияли на аккумуляцию Cd, Mn и Pb в поверхностных горизонтах почв, что согласуется и с их различными моделями пространственного распределения.

As имеет схожий характер распределения с элементами Cd, Mn и Pb, но в отличие от них у As наблюдается один очаг высокой концентрации в районе полигона дренажных рассолов и высокоминерализованных вод «Октябрьский».

Исходя из этого можно предположить, что источниками поступления As на поверхностный слой почвы являются как природные, так и антропогенные факторы, например в результате аварийных разгрузок нагнетательных скважин на полигоне «Октябрьский».

При сравнении содержания подвижных форм микроэлементов в промышленной площадке Удачинского ГОК с ПДК фиксируется превышение норм для Zn до 4 раз и Ni до 6 раз, а именно, в образцах грунтов из хвостохранилища № 1 и почвгрунтов, отобранных в подошве отвалов пустых пород (рис. 6). Высокие концентрации никеля и цинка могут быть связаны с геохимическими особенностями гипергенно изменённых кимберлитов. Никель может концентрироваться и в корках выветривания ультраосновных пород в зоне нонтронитообразования. Нонтронит является главным никельсодержащим минералом, создающим промышленные концентрации силикатных никелевых руд. В отличие от таковых гипергенно изменённые высоконикелевые окварцованные кимберлиты характеризуются также высокими содержаниями Zn, отличающимися изменёнными кимберлитами от кор выветривания основных пород [62]. Таким образом, наблюдается накопление Ni и Zn, которые при длительной разработке месторождения и функционировании обоганительных производств будут представлять токсикологическую опасность и могут являться источником вторичного загрязнения для всей экосистемы и населенного пункта – г. Удачный, что неблагоприятно скажется на здоровье местного населения.

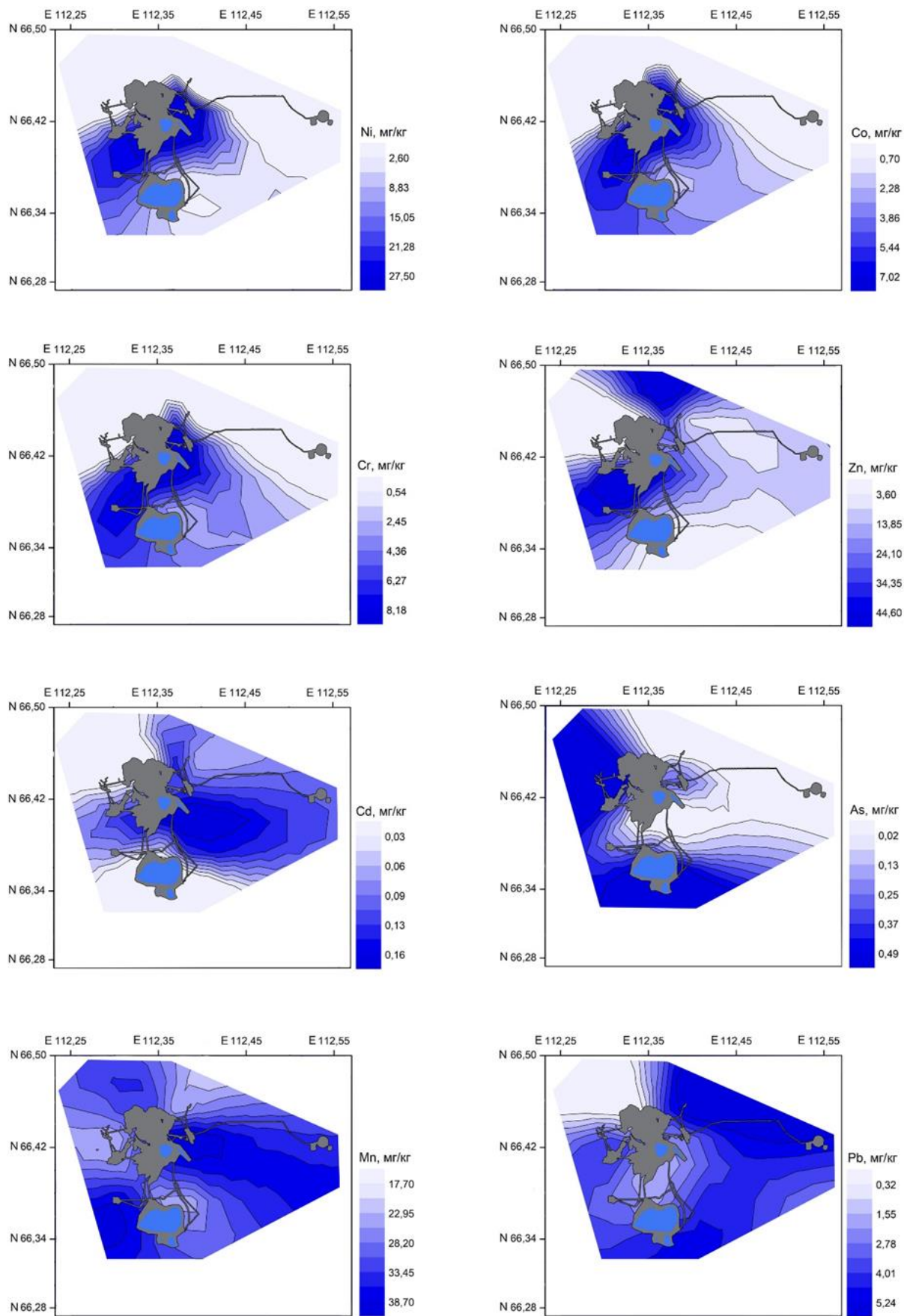


Рис. 5. Пространственное распределение микроэлементов в поверхностном слое почв территории промышленной площадки Удачинского ГОК

Fig. 5. Spatial distribution of trace elements on the surface soil layer of the territory of the industrial site of the Udachny MPD

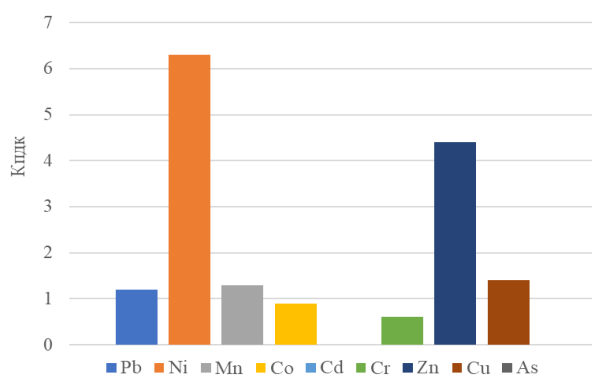


Рис. 6. График превышения значений ПДК подвижных форм микроэлементов в почвах промышленной площадки Удачинского ГОК

Fig. 6. Graph of excess of MPC values of mobile forms of trace microelements in soils of the industrial site of the Udachny MPD

Заключение

На основании проведенных исследований с помощью инструментов статистического анализа определено, что в поверхностном слое почв промышленной площадки Удачинского ГОК на территории Далдынского кимберлитового поля распространение микроэлементов не соответствует нормальному распределению из-за большого разброса значений. Это связано с комплексностью естественных и техногенных воздействий. Коэффициенты вариации микроэлементов в верхнем слое почв исследуемой территории распределяются в порядке убывания: $Zn > Ni > Mn > Cr > Co > Pb > Cd > As$.

По результатам анализа данных методом главных компонент выявлены три ассоциации элементов с наибольшей степенью нагрузки на поверхностный

слой почвы: F1 – Co, Cr, Ni и Zn; F2 – Cd; F3 – As и Mn. Первый компонент представляет собой совокупность естественных и техногенных источников поступления элементов в почвенную среду. Вторым в большей степени связан с почвенными параметрами природного происхождения. Третий имеет как природное, так и техногенное происхождение.

Установлена связь между группой сидерофильных (Co, Cr, Ni и Mn) и халькофильных (Zn, Cd и As) элементов, которые находят свое отражение в формировании как природных, так и техногенных геохимических аномалий в почвенном покрове.

Геостатистический анализ пространственного распределения микроэлементов в верхнем слое почв территории промышленной площадки Удачинского горно-обогатительного комбината позволил определить основные источники и очаги загрязнения. Источником поступления Co, Cr и Ni является участок карьера кимберлитовой трубки «Удачная» и хвостохранилище № 1 обогатительной фабрики, Zn – хвостохранилище № 1, селитебный район г. Удачный, As – полигон высокоминерализованных рассолов «Октябрьский».

Таким образом, многомерный статистический анализ данных позволяет выявить скрытые и неочевидные закономерности содержания и распределения элементов в почве, а также источники и очаги загрязнения, представляющие экологические риски для исследуемой территории.

Статья подготовлена в рамках выполнения проекта Государственного задания Минобрнауки РФ FUEM-2019-0003 «Эколого-геохимическое изучение техногенных массивов на территории Якутской алмазодобывающей провинции».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородин Н.А., Голов В.И. Содержание различных форм Cu, Zn и Mn в почвах города Благовещенск (Амурская область) // Вестник ДВО РАН. – 2013. – № 5. – С. 69–76.
2. Гусева Н.В., Воробьева Д.А., Евтюгина З.А. Особенности взаимодействия в системе вода–порода на территории водосбора озера Имандра (Кольский полуостров) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 177–188.
3. Воробьева Д.А., Гусева Н.В. Геохимическая характеристика почв территории с высокой аэротехногенной нагрузкой // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 149–159.
4. Current and future emissions of selected heavy metals to the atmosphere from anthropogenic sources in Europe / E.G. Pacyna, J.M. Pacyna, J. Fudala et al. // Atmospheric Environment. – 2007. – V. 41. – № 38. – P. 8557–8566.
5. Nezhada M.T.K., Tabatabaai S.M., Gholami A. Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz, Iran // Journal of Geochemical Exploration. – 2015. – V. 152. – P. 91–109.
6. Елсукова Е.Ю., Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю. Техногенная трансформация потоков тяжелых металлов в почвах в зоне воздействия медно-никелевого производства // Международный научно-исследовательский журнал. – 2019. – № 12-1 (90). – С. 118–124.
7. Evaluation of the potential risks of heavy metal contamination in rice paddy soils around an abandoned Hg mine area in Southwest China / B. Adlane, Z. Xu, X. Xu, L. Liang, J. Han, G. Qiu // Acta Geochimica. – 2020. – V. 39. – P. 85–95.

8. Зволинский В.П., Капралова Д.О., Левашова Е.А. Геостатистический анализ пространственного распределения стойких органических загрязнителей в почвах г. Москвы в пределах Московской кольцевой автодороги // Мониторинг. Наука и Техника. – 2019. – № 4. – С. 36–49.
9. Харина Г.В., Алешина Л.В. Аккумуляция тяжелых металлов в почвах Свердловской области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 173–183.
10. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2021 году. – Якутск, 2022. – 776 с.
11. Legostaeva Ya., Gololobova A. Long-term geochemical monitoring of the soil cover in the impact zone of diamond mining enterprises: a case study in the Nakyn kimberlite field, Russia // Environmental Monitoring and Assessment. – 2021. – Iss. 193. – V. 6. – 337.
12. Гололобова А.Г. Экогеохимический мониторинг почвенного покрова на участках алмазодобычи в Западной Якутии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 146–157.
13. Экологические проблемы Верхоянского района / Г.Н. Саввинов, П.П. Данилов, А.А. Петров, В.С. Макаров, В.С. Боесков, С.Е. Григорьев // Вестник СВФУ. – 2018. – № 6 (68). – С. 18–33.
14. Данилов П.П., Легостаева Я.Б., Саввинов Г.Н. Техногенные ландшафты и их влияние на естественный почвенный покров Западной Якутии // Вестник Якутского государственного университета. – 2005. – Т. 2. – № 3. – С. 70–75.
15. Хованская М.А., Косинова И.И. Влияние горнодобывающей и перерабатывающей деятельности на почвы Айхальского рай-

- она (Саха-Якутия) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геоология. – 2010. – № 1. – С. 282–285.
16. Шадринова О.В. К вопросу засоления почв на территории алмазодобычи (западная Якутия) // Почва как связующее звено функционирования природных и антропогенно-преобразованных экосистем. – Иркутск: Иркутский государственный университет, 2021. – С. 564–567.
17. Multivariate statistical and GIS-based approach to evaluate heavy metals behavior in mine sites for future reclamation / J.A. Acosta, A. Faz, S. Martínez-Martínez, R. Zornoza, D.M. Carmona, S. Kabas // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2011. – V. 109. – Iss. 1-3. – P. 8–17.
18. Markus J., McBratney A.B. A review of the contamination of soil with lead: II. Spatial distribution and risk assessment of soil lead // *Environmental International*. – 2001. – V. 27 – P. 399–411.
19. СП Удачинский ГОК АК «АЛРОСА» (ПАО) // Мониторинг устойчивого развития. URL: <https://monitoring-esg.ru/esg-analitika/analitika-po-kompaniyam/sp-ak-alrosa-pao-udachninskij-gorno-obogatitelnyj-kombinat> (дата обращения 01.10.2022).
20. Легостаева Я.Б., Попов В.Ф., Ксенофонтова М.И. Гидрогеологические условия и геоэкологическая ситуация на территории подземных техногенных хранилищ при утилизации дренажных рассолов Удачинского горно-обогатительного комбината // *Отечественная геология*. – 2018. – № 3. – С. 93–102.
21. Легостаева Я.Б. Пространственная и внутрипрофильная дифференциация мерзлотных почв северо-западной Якутии: дис. ... канд. биол. наук. – Улан-Удэ, 2005. – 143 с.
22. Миронова С.И. Растительные сукцессии на природно-техногенных ландшафтах Западной Якутии и их оптимизация. – М.: ИД «Академия Естественная», 2016. – 140 с.
23. Атлас Якутской АССР / ред. кол.: Т.Д. Сивцев, И.А. Некрасов, Н.И. Шраин и др. – М.: Гл. упр. геодезии и картографии при Совете министров СССР, 1981. – 40 с.
24. Šmejkalová M., Mikanová O., Borůvka L. Effects of heavy metal concentrations on biological activity of soil micro-organisms // *Plant, Soil and Environment*. – 2003. – V. 49. – P. 321–326.
25. Aitchison J. The statistical analysis of compositional data. – London, U.K.: Chapman and Hall, 1986. – 416 p.
26. Aitchison J. The statistical analysis of compositional data. – Caldwell, NJ, USA: Blackburn Press, 2003. – 460 p.
27. Pawlowsky-Glahn V., Buccianti, A. Compositional data analysis: theory and applications. – Chichester, UK; West Sussex, UK: Wiley, 2011. – 819 p.
28. Moss biomonitoring and air pollution modelling on a regional scale: delayed reflection of industrial pollution in moss in a heavily polluted region / O. Motyka, I. Pavlíková, J. Bitta, M. Frontasyeva, P. Jančík // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – V. 27. – P. 32569–32578.
29. Heavy metal (PTE) ecotoxicology, data review: traditional vs. a compositional approach / S.T. Mullineaux, J.M. McKinley, N.J. Marks, D.M. Scantlebury, R. Doherty // *Science of The Total Environment*. – 2021. – V. 769. – P. 145246.
30. The concept of compositional data analysis in practice – Total major element concentrations in agricultural and grazing land soils of Europe / C. Reimann, P. Filzmoser, K. Fabian, K. Hron, M. Birke, A. Demetriades, E. Dinelli, A. Ladenberger // *Science of The Total Environment*. – 2012. – V. 426. – P. 196–210.
31. Lawley C. Compositional symmetry between Earth's crustal building blocks // *Geochemical Perspectives Letters*. – 2016. – V. 2 (2). – P. 117–126.
32. Loska K., Wiechula D., Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry // *Environment international*. – 2004. – V. 30. – P. 159–165.
33. Multivariate analysis of trace element concentrations in atmospheric deposition in the Yangtze River Delta, East China / S. Huang, J. Tu, H. Liu, M. Hua, Q. Liao, J. Feng, Z. Weng, G. Huang // *Atmospheric Environment*. – 2009. – V. 43. – P. 5781–5790.
34. Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: typical urban renewal area in Beijing, China / G. Yuan, T. Sun, P. Han, J. Li, X. Lang // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2014. – V. 136. – P. 40–47.
35. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistics / S.L. Celine, L. Xiangdong, S. Wenzhong, C. Sharon, T. Iain // *The Science of the Total Environment*. – 2006. – V. 356. – P. 45–61.
36. Прохорова Н.В. Эколого-геохимическая роль автотранспорта в условиях городской среды // Вестник СамГУ. Естественно-научная серия. – 2005. – № 5 (39). – С. 188–199.
37. Alvarez E., Monterroso C., Fernández M.M.L. Aluminium fractionation in Galician (NW Spain) forest soils as related to vegetation and parent material // *Forest Ecology and Management*. – 2002. – V. 166. – P. 193–206.
38. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Northeast China / C. Sun, J. Liu, Y. Wang, L. Sun, H. Yu // *Chemosphere*. – 2013. – V. 92. – P. 517–523.
39. Воробьева К.Ю., Прохорова Н.В. Особенности загрязнения медью почв объектов гражданского строительства в Самарской области // *Экологический сборник 7: Труды молодых ученых*. – Тольятти: ИЭВБ РАН, «Анна», 2019. – С. 115–116.
40. Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China / X. Li, L. Liu, Y. Wang, G. Luo, X. Chen, X. Yang, M.H.P. Hall, R. Guo, H. Wang, J. Cui, X. He // *Geoderma*. – 2013. – V. 192. – P. 50–58.
41. Spatial interrelations and multiscale sources of soil heavy metal variability in a typical urban–rural transition area in Yangtze River Delta region of China / Y. Zhao, Z. Wang, W. Sun, B. Huang, X. Shi, J. Ji // *Geoderma*. – 2010. – V. 156. – P. 216–227.
42. Карпиченко А.А. Использование статистических методов для выявления особенностей накопления тяжелых металлов в поверхностных горизонтах почв // Современные направления развития физической географии: научные и образовательные аспекты в целях устойчивого развития. – Минск: Белорусский государственный университет, 2019. – С. 127–130.
43. Dordevic D., Mihajlidi-Zelic A., Relic D. Differentiation of the contribution of local resuspension from that of regional and remote sources on trace elements content in the atmospheric aerosol in the Mediterranean area // *Atmospheric Environment*. – 2005. – V. 39. – P. 6271–6281.
44. Heavy metal contamination of topsoil around a lead and zinc smelter in Kosovska Mitrovica/Mitrovicë, Kosovo/Kosovë / R. Šajn, M. Aliu, T. Stafilov, J. Alijagić // *Journal Geochemical Exploration*. – 2013. – V. 134. – P. 1–16.
45. Multiscale analysis of heavy metal contents in Spanish agricultural topsoils / J.A. Rodríguez, N. Nanos, J.M. Grau, L. Gil, M. Lopez-Arias // *Chemosphere*. – 2008. – V. 70. – P. 1085–1096.
46. Водяницкий Ю.Н. Формы цинка в загрязненных почвах (обзор литературы) // *Химия почв*. – 2010. – № 3. – С. 293–302.
47. Гринвуд Н., Эрншо А. Химия элементов. – М.: Бином, 2008. – 670 с.
48. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. – Roca Raton: CRS Press, 2011. – 548 p.
49. Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: typical urban renewal area in Beijing, China / G-L. Yuan, T-H. Sun, P. Han, J. Li, X-X Lang // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2014. – V. 136. – P. 40–47.
50. Jiries A.G., Hussein H.H., Halash Z. The quality of water and sediments of street runoff in Amman, Jordan // *Hydrological Processes*. – 2001. – V. 15. – P. 815–824.
51. Comparative studies on the concentrations of some elements in the urban air particulate matter in Lodz City of Poland and in Milan, Italy / H. Bem, M. Gallorini, E. Rizzio, M. Krzeminska // *Environment International*. – 2003. – V. 29. – P. 423–428.
52. Spatial distribution of heavy metal concentrations in peri-urban soils in eastern China / S. Li, L. Yang, L. Chen, F. Zhao, L. Sun // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2019. – V. 26. – P. 1615–1627.
53. Янин Е.П. Пылевые выбросы предприятий как источник загрязнения городской среды кадмием // *Экология урбанизированных территорий*. – 2009. – № 1. – С. 30–35.
54. Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment / G. Tóth, T. Hermann, G. Szatmári, L. Pásztor // *Science of The Total Environment*. – 2016. – V. 565. – P. 1054–1062.
55. Heavy metal speciation and pollution of agricultural soils along Jishui River in non-ferrous metal mine area in Jiangxi Province, China / G. Liu, L. Tao, X. Liu, J. Hou, A. Wang, R. Li // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2013. – V. 132. – P. 156–163.

56. Pan H., Lu X., Lei K. A comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: Contamination, source apportionment and spatial distribution // *Science of The Total Environment*. – 2017. – V. 609. – P. 1361–1369.
57. Костровицкий С.И. Минералогия и геохимия кимберлитов Западной Якутии: дисс. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Иркутск, 2009. – 412 с.
58. Харитонов Т.В. Алмазность Урала. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2016. – 1280 с.
59. Zamani A., Yaftian M.R., Parizanganeh A. Statistical evaluation of topsoil heavy metal pollution around a lead and zinc production plant in Zanjan province, Iran // *Caspian Journal of Environmental Sciences*. – 2015. – V. 13 (4). – P. 349–361.
60. A statistical approach to study the spatial heavy metal distribution in soils in the Kushk Mine, Iran / Z. Sohrabizadeh, H. Sodaieizadeh, M. Hakimzadeh, R. Taghizadeh-Mehrjardi, M.J. Ghanei Bafghi // *Geoscience Data Journal*. – 2022. – V. 00. – P. 1–13. Available from: <https://doi.org/10.1002/gdj3.175>
61. Assessment of soil and maize contamination by TE near a coal gangue-fired thermal power plant / D. Li, D. Wu, F. Xu, J. Lai, S. Li // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2020. – V. 192. – 541.
62. Зинчук Н.Н. Особенности минералов слюд в кимберлитах // *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. – 2018. – № 2. – С. 29–39.

Поступила: 07.10.2022 г.

Прошла рецензирование: 20.11.2022 г.

Информация об авторах

Гололобова А.Г., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории металлогении Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН.

UDC 631.4:504.5

INVESTIGATION OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF MICROELEMENTS IN SOILS BY THE METHOD OF MULTIVARIATE STATISTICAL ANALYSIS (ON THE EXAMPLE OF THE TERRITORY OF THE DALDYN KIBERLITE FIELD, NORTHWESTERN YAKUTIA)

Anna G. Gololobova¹,
nuta0687@mail.ru

¹ Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
39, Lenin avenue, Yakutsk, 677980, Russia.

The relevance. Currently, industrial activity, which processes lead to the deterioration of environmental conditions, is becoming increasingly large. Therefore, projects and measures are needed to reduce environmental damage and restore disturbed lands, which are based on preliminary studies of soil properties, the content and distribution of trace elements and heavy metals in the conditions of technogenesis.

The main aim: to determine the regularities of the spatial distribution of microelements and the sources of their entry into the surface layer of soils on the territory of the industrial site of the Udachny Mining and Processing Division using the tools of multivariate statistical analysis.

Objects: dominant soil types of the north-taiga landscapes of northwestern Yakutia.

Methods: potentiometric, colorimetric, atomic absorption, statistical methods (descriptive, normal distribution analysis, principal component method, spatial analysis).

Results. The coefficients of variation of trace elements in the upper soil layer of the study area are distributed in the following descending order: Zn>Ni>Mn>Cr>Co>Pb>Cd>As. The concentrations of the elements Pb, Ni, Cd, Co, Cr, Zn, and As in the surface soil layer of the study area do not have a normal distribution, with the exception of Mn. Three factors have been identified that explain the dispersion of the content of trace elements and heavy metals in the soils of the territory of the north-taiga landscapes of North-Western Yakutia. The first factor noticeably affects the distribution of Co, Cr, Ni, and Zn; the second – Cd; and the third – As and Mn. The main sources of pollution were identified. The content of Co, Cr and Ni in the surface layer of the soil is affected by the Udachny kimberlite pipe quarry and tailing dump no. 1, Zn – by the residential area of Udachny, As – by the polygon of highly mineralized brines.

Key words:

trace elements, heavy metals, mobile forms, soil pollution, kimberlite field, multivariate statistical analysis, spatial distribution, Yakutia.

The paper was prepared within the project of the State Task of the Ministry of Education of the RF FUEM-2019-0003 «Ecological and geochemical study of man-made arrays in the territory of Yakutia diamond-bearing province».

REFERENCES

- Borodina N.A., Golov V.I. Soderzhanie razlichnykh form Cu, Zn i Mn v pochvakh goroda Blagoveshchensk (Amurskaya oblast) [The content of various forms of Cu, Zn and Mn in the soils of the city of Blagoveshchensk (Amur Region)]. *Vestnik DVO RAN*, 2013, no. 5, pp. 69–76.
- Guseva N.V., Vorobyova D.A., Evtyugina Z.A. Peculiarities of interaction in the water–rock system in the catchment area of Lake Imandra (Kola Peninsula). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 177–188. In Rus.
- Vorobyova D.A., Guseva N.V. Geochemical characteristics of soils in a territory with a high aerotechnogenic load). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 149–159. In Rus.
- Pacyna E.G., Pacyna J.M., Fudala J., Strzelecka-Jastrzab E., Hlawiczka S., Panasiuk D., Nitter S., Pregger T., Pfeiffer H., Friedrich R. Current and future emissions of selected heavy metals to the atmosphere from anthropogenic sources in Europe. *Atmospheric Environment*, 2007, vol. 41, no. 38, pp. 8557–8566.
- Nezhada M.T.K., Tabatabaii S.M., Gholami A. Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, vol. 152, pp. 91–109.
- Elsukova E.Yu., Opekunova M.G., Guardians A.Yu. Technogenic transformation of heavy metal fluxes in soils in the zone of influence of copper-nickel production. *International Research Journal*, 2019, vol. 12-1 (90), pp. 118–124. In Rus.
- Adlane B., Xu Z., Xu X., Liang L., Han J., Qiu G. Evaluation of the potential risks of heavy metal contamination in rice paddy soils around an abandoned Hg mine area in Southwest China. *Acta Geochimica*, 2020, vol. 39, pp. 85–95.
- Zvolinsky V.P., Kapralova D.O., Levashova E.A. Geostatistical analysis of the spatial distribution of persistent organic pollutants in the soils of Moscow within the Moscow ring road. *Monitoring. Science and Technology*, 2019, vol. 4, pp. 36–49. In Rus.
- Kharina G.V., Aleshina L.V. Accumulation of heavy metals in the soils of the Sverdlovsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 173–183.
- Gosudarstvenny doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Respubliki Sakha (Yakutiya) v 2021 godu [State report on the state and protection of the environment of the Republic of Sakha (Yakutia) in 2021]. Yakutsk, 2022. 776 p.
- Legostaeva Ya., Gololobova A. Long-term geochemical monitoring of the soil cover in the impact zone of diamond mining enterprises: a case study in the Nakyn kimberlite field, Russia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, vol. 193, no. 6, 337.
- Gololobova A.G. Ecogeochemical monitoring of soil cover at diamond mining sites in Western Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 146–157.
- Savvinov G.N., Danilov P.P., Petrov A.A., Makarov V.S., Boeskorov V.S., Grigoriev S.E. Ecological problems of the Verkhoyansk region. *Vestnik NEFU*, 2018, vol. 6 (68), pp. 18–33. In Rus.
- Danilov P.P., Legostaeva Ya.B., Savvinov G.N. Technogenic landscapes and their influence on the natural soil cover of Western Yakutia. *Vestnik NEFU*, 2005, vol. 2, no. 3, pp. 70–75. In Rus.
- Khovanskaya M.A., Kosinova I.I. Influence of mining and processing activities on the soils of the Aikhal region (Sakha-Yakutia). *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology*, 2010, vol. 1, pp. 282–285. In Rus.
- Shadrinova O.V. K voprosu zasoleniya pochv na territorii almazodobychi (Zapadnaya Yakutiya) [On the issue of soil salinization in the territory of diamond mining (western Yakutia)]. *Pochva kak svyazuyushchee zveno funktsionirovaniya prirodnykh i antropogenno-preobrazovannykh ekosistem* [Soil as a connecting link in the functioning of natural and anthropogenically transformed ecosystems]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2021. pp. 564–567.

17. Acosta J.A., Faz A., Martínez-Martínez S., Zornoza R., Carmona D.M., Kabas S. Multivariate statistical and GIS-based approach to evaluate heavy metals behavior in mine sites for future reclamation. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, vol. 109, no. 1–3, pp. 8–17.
18. Markus J., McBratney A.B. A review of the contamination of soil with lead: II. Spatial distribution and risk assessment of soil lead. *Environmental International*, 2001, vol. 27, pp. 399–411.
19. *JV Udachninsky GOK AK «ALROSA» (PJSC). Monitoring of sustainable development*. Available at: <https://monitoring-esg.ru/esg-analitika/analitika-po-kompaniyam/sp-ak-alrosa-pao-udachninskij-gorno-obogatitelnyj-kombinat> (1 October 2022).
20. Legostaeva Ya.B., Popov V.F., Ksenofontova M.I. Hydrogeological conditions and geocological situation in the territory of underground technogenic storage facilities during the disposal of drainage brines of the Udachny Mining and Processing Plant. *National Geology*, 2018, vol. 3, pp. 93–102. In Rus.
21. Legostaeva Ya.B. *Prostranstvennaya i vnutriprofilnaya differentsiatsiya merzlotnykh pochv severo-zapadnoy Yakutii*. Diss. Kand. nauk [Spatial and intraprofile differentiation of permafrost soils in northwestern Yakutia]. Cand. Diss.]. Ulan-Ude, 2005. 143 p.
22. Mironova S.I. *Rastitelnye suksessii na prirodno-tekhnogennykh landshaftakh Zapadnoy Yakutii i ikh optimizatsiya* [Plant successions in the natural-technogenic landscapes of Western Yakutia and their optimization]. Moscow, Academy of Natural History Publ. House, 2016. 140 p.
23. Sivtsev T.D., Nekrasov I.A., Shrain N.I. *Atlas Yakutskoy ASSR* [Atlas of the Yakut ASSR]. Moscow, Glavnoe upravlenie Geodezii i kartografii pri Sovete ministrov SSSR Publ., 1981. 40 p.
24. Šmejkalová M., Mikanová O., Borůvka L. Effects of heavy metal concentrations on biological activity of soil micro-organisms. *Plant, Soil and Environment*, 2003, vol. 49, pp. 321–326.
25. Aitchison J. *The statistical analysis of compositional data*. London, U.K., Chapman and Hall, 1986. 416 p.
26. Aitchison J. *The statistical analysis of compositional data*. Caldwell, NJ, USA, Blackburn Press, 2003. 460 p.
27. Pawlowsky-Glahn V., Buccianti, A. *Compositional data analysis: theory and applications*. Chichester, UK; West Sussex, UK, Wiley, 2011. 819 p.
28. Motyka O., Pavlíková I., Bitta J., Frontasyeva M., Jančík P. Moss biomonitoring and air pollution modelling on a regional scale: delayed reflection of industrial pollution in moss in a heavily polluted region. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 32569–32578.
29. Mullineaux S.T., McKinley J.M., Marks N.J., Scantlebury D.M., Doherty R. Heavy metal (PTE) ecotoxicology, data review: traditional vs. a compositional approach. *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 769, pp. 145246.
30. Reimann C., Filzmoser P., Fabian K., Hron K., Birke M., Demetriades A., Dinelli E., Ladenberger A. The concept of compositional data analysis in practice – Total major element concentrations in agricultural and grazing land soils of Europe. *Science of The Total Environment*, 2012, vol. 426, pp. 196–210.
31. Lawley C. Compositional symmetry between Earth's crustal building blocks. *Geochemical Perspectives Letters*, 2016, vol. 2 (2), pp. 117–126.
32. Loska K., Wiechula D., Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment international*, 2004, vol. 30, pp. 159–165.
33. Huang S., Tu J., Liu H., Hua M., Liao Q., Feng J., Weng Z., Huang G. Multivariate analysis of trace element concentrations in atmospheric deposition in the Yangtze River Delta, East China. *Atmospheric Environment*, 2009, vol. 43, pp. 5781–5790.
34. Yuan G., Sun T., Han P., Li J., Lang X. Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: Typical urban renewal area in Beijing, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 136, pp. 40–47.
35. Celine S.L., Xiangdong L., Wenzhong S., Sharon C., Iain T. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistics. *The Science of the Total Environment*, 2006, vol. 356, pp. 45–61.
36. Prokhorova N.V. Ekologo-geokhimicheskaya rol avtotransporta v usloviyakh gorodskoy sredy [Ecological and geochemical role of motor transport in urban environment]. *Vestnik SamGU. Estestvennonauchnaya seriya*, 2005, vol. 5 (39), pp. 188–199.
37. Álvarez E., Monterroso C., Fernández M.M.L. Aluminium fractionation in Galician (NW Spain) forest soils as related to vegetation and parent material. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 166, pp. 193–206.
38. Sun C., Liu J., Wang Y., Sun L., Yu H. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Northeast China. *Chemosphere*, 2013, vol. 92, pp. 517–523.
39. Vorobeva K.Yu., Prokhorova N.V. Osobennosti zagryazneniya medyu pochv obektov grazhdanskogo stroitelstva v Samarskoy oblasti [Features of copper pollution of soils of civil engineering facilities in the Samara region]. *Ekologicheskij sbornik 7: Trudy molodykh uchenykh* [Ecological collection 7: Proceedings of young scientists]. Tolyatti, IEVB RAS, Anna Publ., 2019. pp. 115–116.
40. Li X., Liu L., Wang Y., Luo G., Chen X., Yang X., Hall M.H.P., Guo R., Wang H., Cui J., He X. Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China. *Geoderma*, 2013, vol. 192, pp. 50–58.
41. Zhao Y., Wang Z., Sun W., Huang B., Shi X., Ji J. Spatial interrelations and multiscale sources of soil heavy metal variability in a typical urban–rural transition area in Yangtze River Delta region of China. *Geoderma*, 2010, vol. 156, pp. 216–227.
42. Karpichenko A.A. Ispolzovanie statisticheskikh metodov dlya vyavleniya osobennostey nakopleniya tyazhelykh metallov v poverhnostnykh gorizontah pochv [The use of statistical methods to identify the features of the accumulation of heavy metals in the surface horizons of soils]. *Sovremennye napravleniya razvitiya fizicheskoy geografii: nauchnye i obrazovatelnye aspekty v tselyakh ustoychivogo razvitiya* [Modern trends in the development of physical geography: scientific and educational aspects for sustainable development]. Minsk, Belarusian State University Publ., 2019. pp. 127–130.
43. Dordevic D., Mihajlidi-Zelic A., Relic D. Differentiation of the contribution of local resuspension from that of regional and remote sources on trace elements content in the atmospheric aerosol in the Mediterranean area. *Atmospheric Environment*, 2005, vol. 39, pp. 6271–6281.
44. Šajin R., Aliu M., Stafilov T., Alijagić J. Heavy metal contamination of topsoil around a lead and zinc smelter in Kosovska Mitrovica/Mitrovicë, Kosovo/Kosovë. *Journal Geochemical Exploration*, 2013, vol. 134, pp. 1–16.
45. Rodriguez J.A., Nanos N., Grau J.M., Gil L., Lopez-Arias M. Multiscale analysis of heavy metal contents in Spanish agricultural topsoils. *Chemosphere*, 2008, vol. 70, pp. 1085–1096.
46. Vodyanitsky Yu.N. Forms of zinc in polluted soils (literature review). *Soil Chemistry*, 2010, vol. 3, pp. 293–302. In Rus.
47. Grinvud N., Ermscho A. *Khimiya elementov* [Chemistry of elements]. Moscow, Binom Publ., 2008. 670 p.
48. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. 4th ed. Roca Raton, CRS Press, 2011. 548 p.
49. Yuan G-L., Sun T-H., Han P., Li J., Lang X-X. Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: Typical urban renewal area in Beijing, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 136, pp. 40–47.
50. Jiries A.G., Hussein H.H., Halash Z. The quality of water and sediments of street runoff in Amman, Jordan. *Hydrological Processes*, 2001, vol. 15, pp. 815–824.
51. Bem H., Gallorini M., Rizzio E., Krzeminska M. Comparative studies on the concentrations of some elements in the urban air particulate matter in Lodz City of Poland and in Milan, Italy. *Environment International*, 2003, vol. 29, pp. 423–428.
52. Li S., Yang L., Chen L., Zhao F., Sun L. Spatial distribution of heavy metal concentrations in peri-urban soils in eastern China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, pp. 1615–1627.
53. Yanin E.P. Pylevye vybrosy predpriyatij kak istochnik zagryazneniya gorodskoy sredy kadmiiem [Dust emissions from enterprises as a source of cadmium pollution of the urban environment]. *Ekologiya urbanizirovannykh territorij*, 2009, vol. 1, pp. 30–35.
54. Tóth G., Hermann T., Szatmári G., Pásztor L. Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment. *Science of The Total Environment*, 2016, vol. 565, pp. 1054–1062.

55. Liu G., Tao L., Liu X., Hou J., Wang A., Li R. Heavy metal speciation and pollution of agricultural soils along Jishui River in non-ferrous metal mine area in Jiangxi Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, vol. 132, pp. 156–163.
56. Pan H., Lu X., Lei K. A comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: Contamination, source apportionment and spatial distribution. *Science of The Total Environment*, 2017, vol. 609, pp. 1361–1369.
57. Kostrovitsky S.I. Mineralogiya i geokhimiya kimberlitov Zapadnoy Yakutii. Diss. Dokt. nauk [Mineralogy and geochemistry of kimberlites of Western Yakutia. Dr. Diss.]. Irkutsk, 2009. 412 p.
58. Kharitonov T.V. *Almazonosnost Urala* [Diamond potential of the Urals]. Perm, Perm State national research university Publ., 2016. 1280 p.
59. Zamani A., Yaftian M.R., Parizanganeh A. Statistical evaluation of topsoil heavy metal pollution around a lead and zinc production plant in Zanjan province, Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 2015, vol. 13 (4), pp. 349–361.
60. Sohrabizadeh Z., Sodaeizadeh H., Hakimzadeh M., Taghizadeh-Mehrjardi R., Ghanei Bafghi M.J. A statistical approach to study the spatial heavy metal distribution in soils in the Kushk Mine, Iran. *Geoscience Data Journal*, 2022, vol. 00, pp. 1–13.
61. Li D., Wu D., Xu F., Lai J., Li S. Assessment of soil and maize contamination by TE near a coal gangue-fired thermal power plant. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, vol. 192, 541.
62. Zinchuk N.N. Osobennosti mineralov slyud v kimberlitakh [Features of micas minerals in kimberlites]. *Vestnik VGU. Seriya: Geologiya*, 2018, vol. 2, pp. 29–39.

Received: 7 October 2022.

Reviewed: 20 November 2022.

Information about the authors

Anna G. Gololobova, Cand. Sc., senior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.