



Интегральная оценка геоэкологического риска загрязнения почвенного покрова в зоне воздействия Айхальского горно-обогатительного комбината (Якутия)

А. Г. Гололобова, Я. Б. Легостаева, О. В. Шадринова

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

nuta0687@mail.ru, ylego@mail.ru, ovshadrinova@mail.ru

Горнодобывающая промышленность является одним из основных источников негативного воздействия. При этом почва представляет собой главный геохимический поглотитель различных загрязняющих веществ в ландшафте. В настоящем исследовании с помощью эколого-геохимических и токсикологических индексов загрязнения, таких как индекс Немерова (*INI*), индекс нагрузки загрязнения (*PLI*), индекс суммарного загрязнения (Z_c), индекс потенциального экологического риска (*RI*), выявлены уровни химического загрязнения почв территории промышленной площадки Айхальского горно-обогатительного комбината потенциально токсичными элементами (Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn, Cu, As). В результате расчетов интегральных индексов выявлены элементы, играющие основную роль в загрязнении исследуемых почв. Элементами-загрязнителями по *INI* являются As, Ni и Cu; по *PLI* – As, Ni, Cu, Zn, Cr, Co, Mn; по Z_c – As, Ni, Cu, Zn, Cr; по *RI* – Ni. Главный фактор экологического риска для почв в районе промышленной площадки Айхальского ГОКа связан с повышенным содержанием никеля. С помощью карт пространственного распределения выявлены локальные площадки с высокой геоэкологической напряженностью, приуроченные к территориям обогатительных фабрик.

Ключевые слова: потенциально токсичные элементы, загрязнение почв, индексы загрязнения, геоэкологический риск, Далдыно-Алаkitский алмазоносный район, Алаkit-Мархинское кимберлитовое поле

Integrated assessment of geoecological risk of soil contamination in the impact zone of the Aikhal Mining and Processing Plant (Yakutia, Russia)

A. G. Gololobova, Ya. B. Legostaeva, O. V. Shadrinova

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk

In recent years, soil pollution with potentially toxic elements has become an important issue causing widespread concern because it is a significant factor threatening the environment. The mining industry is one of the main sources of negative impact. Moreover, the soil is the main geochemical absorber of various pollutants. In the present study, using ecological-geochemical and toxicological pollution indices, such as the Nemerov index (*INI*), pollution load index (*PLI*), total pollution index (Z_c), potential ecological risk index (*RI*), the levels of chemical pollution of soils of the industrial site of the Aikhal Mining and Processing Division with potentially toxic elements (Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn, Cu, As) are identified. As a result of calculations of these indices, the elements that make the main contribution to the pollution of the studied soils are identified. The pollutant elements for *INI* are As, Ni and Cu; for *PLI* – As, Ni, Cu, Zn, Cr, Co, Mn; for Z_c – As, Ni, Cu, Zn, Cr; for *RI* – Ni. Nickel is the main environmental risk factor for soils at the Aikhal Mining and Processing Division's industrial site. Using spatial distribution maps, localized areas with high geoecological stress are identified near the processing plants.

Keywords: potentially toxic elements, soil pollution, pollution indices, geoecological risk, Daldyn-Alakit diamond-bearing region, Alakit-Markhinsky kimberlite field

Введение

Горнодобывающая промышленность является одной из важнейших отраслей российской экономики. В числе регионов, занимающих ведущие позиции в добыче полезных ископаемых, выделяется Республика Саха (Якутия), где по состоянию на 2021 г. насчитывалось 2116 месторождений полезных ископаемых (Госдоклад, 2022), а в 2024 г. учитывается 3000 место-

рождений ОПИ по 59 видам минерального и углеводородного сырья (Госдоклад, 2025). В связи с этим в Якутии наблюдается тенденция увеличения площади нарушенных ландшафтов с высоким уровнем загрязнения почвенного покрова и уничтожением плодородного слоя земли за счет аккумуляции токсичных веществ, в том числе и потенциально токсичных элементов.

Для цитирования: Гололобова А. Г., Легостаева Я. Б., Шадринова О. В. Интегральная оценка геоэкологического риска загрязнения почвенного покрова в зоне воздействия Айхальского горно-обогатительного комбината (Якутия) // Вестник геонаук. 2026. 2(374). С. 47–59. DOI: 10.19110/geov.2026.2.4

For citation: A. G. Gololobova, Ya. B. Legostaeva, O. V. Shadrinova Integrated assessment of the geoecological risk of soil contamination in the impact zone of the Aikhal Mining and Processing Plant (Yakutia, Russia). Vestnik of Geosciences, 2025, 2(374), pp. 47–59. DOI: 10.19110/geov.2026.2.4

Потенциально токсичные элементы (ПТЭ) — это металлы, металлоиды и неметаллы, которые относятся к группам наиболее опасных загрязнителей окружающей среды из-за их опасности и токсичности, оказывающих необратимые последствия на состояние компонентов природной среды даже в низких концентрациях. Они встречаются в природе и имеют плотность более 5 г/см^3 и атомные номера более 20 (Siegel, 2002). В последние годы вырос интерес к потенциально токсичным элементам из-за быстрого развития горнодобывающей промышленности, которая является основным источником поступления ПТЭ в окружающую среду в больших концентрациях, представляя значительную угрозу экосистеме в целом (Khadidja et al., 2021).

Добыча алмазов по сравнению с добычей цветных металлов считается «чистым» видом недропользования, так как в процессе не используются агрессивные химические реагенты вроде цианидов или кислот. Тем не менее при открытом способе добычи алмазов происходит сильное нарушение земной поверхности, огромные площади заняты карьерами кимберлитовых трубок, отвалами пустых пород, отходами первичного обогащения руд — хвостохранилищами и другими источниками техногенных выбросов и аэрорассева, при которых различные вещества, в том числе потенциально токсичные элементы, оседая на поверхность почвы, трансформируют ее элементный состав.

Поэтому с точки зрения геохимии рудоконтролирующие кимберлиты породы, складываемые в отвалы, представляют собой смесь мантийного вещества, корового загрязнения и продуктов вторичных изменений (Афанасьев и др., 2001), химическая специфичность которых начинает определять поведение всего техногенного массива. Кимберлитовая пульпа, накапливающаяся после обогащения в хвостохранилищах, имеет свойства ультраосновных пород, сформированных в условиях глубокой мантии (Костровицкий, 2009), и характеризуется аномально высокими (по сравнению с вмещающими осадочными породами) концентрациями элементов, входящих в состав породообразующих минералов (оливина, пироксенов, гранатов). Кроме этого, проявляются повышенные концентрации редких элементов (Sr, Ba, Ti) и металлоидов, например As (Легостаева и др., 2021).

Породы, извлеченные на поверхность и складываемые в отвалы, измельченный до состояния песка и пыли кимберлит в хвостохранилищах крайне неустойчивы при контакте с водой и кислородом воздуха. Запускаемые в результате процессы механохимической активации вызывают трансформацию первичных минералов: например, оливин замещается серпентином и сапонитом. Разрушение исходных кристаллических решеток первичных минералов способствует высвобождению элементов-примесей (Ni, Cr, Co) и их переходу в миграционноспособные (подвижные) формы. (Макаров, 2010). Интенсификация таких процессов провоцирует загрязнение сопредельных сред широким перечнем элементов, включая ПТЭ, среди которых почва выступает основным депонирующим звеном.

Распределение и аккумуляция потенциально токсичных элементов усугубляется особенностями природно-климатических условий самого региона. Якутия находится в зоне сплошного распространения и близкого залегания многолетнемерзлых пород. Мощность

мерзлотной толщи определяется в 250—400 м (Легостаева и др., 2021). Многолетняя мерзлота оказывает большое влияние на состояние надмерзлотной части почвенного профиля, формируя надмерзлотный геохимический барьер, где сорбируются различные формы загрязняющих веществ. Поэтому почвы северных экосистем являются самой уязвимой геосферой с точки зрения техногенного воздействия. Высокая сорбционная способность почвенного органического вещества и глинистого материала определяет низкую устойчивость всего почвенного комплекса к химическому загрязнению. Из-за сурового климата потенциал самовосстановления крайне низкий и механизмы естественной нейтрализации токсикантов здесь практически не работают, вследствие чего химическое загрязнение вызывает необратимую деградацию почвенного покрова (Гололобова, 2025).

Имеется довольно много исследований, посвященных изучению влияния ПТЭ на состояние почв в зонах воздействия различных промышленных предприятий (Сорокина и др., 2005; Белошейкина и др., 2021; Chen et al., 2024; Umeobi et al., 2025). При этом наблюдается дефицит исследований, посвященных закономерностям поведения ПТЭ в почвах Севера в условиях интенсивного техногенеза. В целом масштабное освоение природных ресурсов северных территорий неизбежно ведет к росту техногенной нагрузки, что делает анализ геоэкологических рисков для местных почв критически важным.

Настоящее исследование ставит целью изучение текущей геоэкологической ситуации на территории промышленной площадки Айхальского ГОКа посредством интегральной оценки загрязнения почвенного покрова, что необходимо для анализа масштабов экологического ущерба и эффективного снижения георисков.

Объекты и методы исследования

Территория исследования расположена на северо-западе Республики Саха (Якутия), в центральной части Якутской алмазоносной провинции, в пределах Далдыно-Алаakitского алмазоносного района, а именно Алаakit-Мархинского кимберлитового поля, где находится промышленная площадка Айхальского горно-обогатительного комбината (АГОК), недалеко от поселка городского типа Айхал ($65^{\circ}56' \text{ с. ш.}$ и $111^{\circ}29' \text{ в. д.}$) (рис. 1). В настоящее время на территории промышленной площадки АГОК открыто и находится на разной стадии освоения 5 промышленно-алмазоносных кимберлитовых трубок: «Юбилейная», «Заря», «Айхал», «Сытыканская» и «Комсомольская». Последние две трубки являются отработанными, а месторождение Айхал с 1997 года переведено на подземный способ добычи (Шадринова, Легостаева, 2025).

АГОК находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Мощность мерзлых пород варьирует в пределах 800—1100 м, а в верховьях р. Мархи достигает 1500 м (Никифоров, Миронова, 2017). Климат резко континентальный с продолжительной зимой и коротким летом, среднегодовая температура равна -12.2°C , среднегодовые значения суммы выпадаемых осадков — 300,1 мм, сумма испаряемости — 346.1 мм, коэффициент увлажнения — 0.88 (Шадринова, Легостаева, 2025).

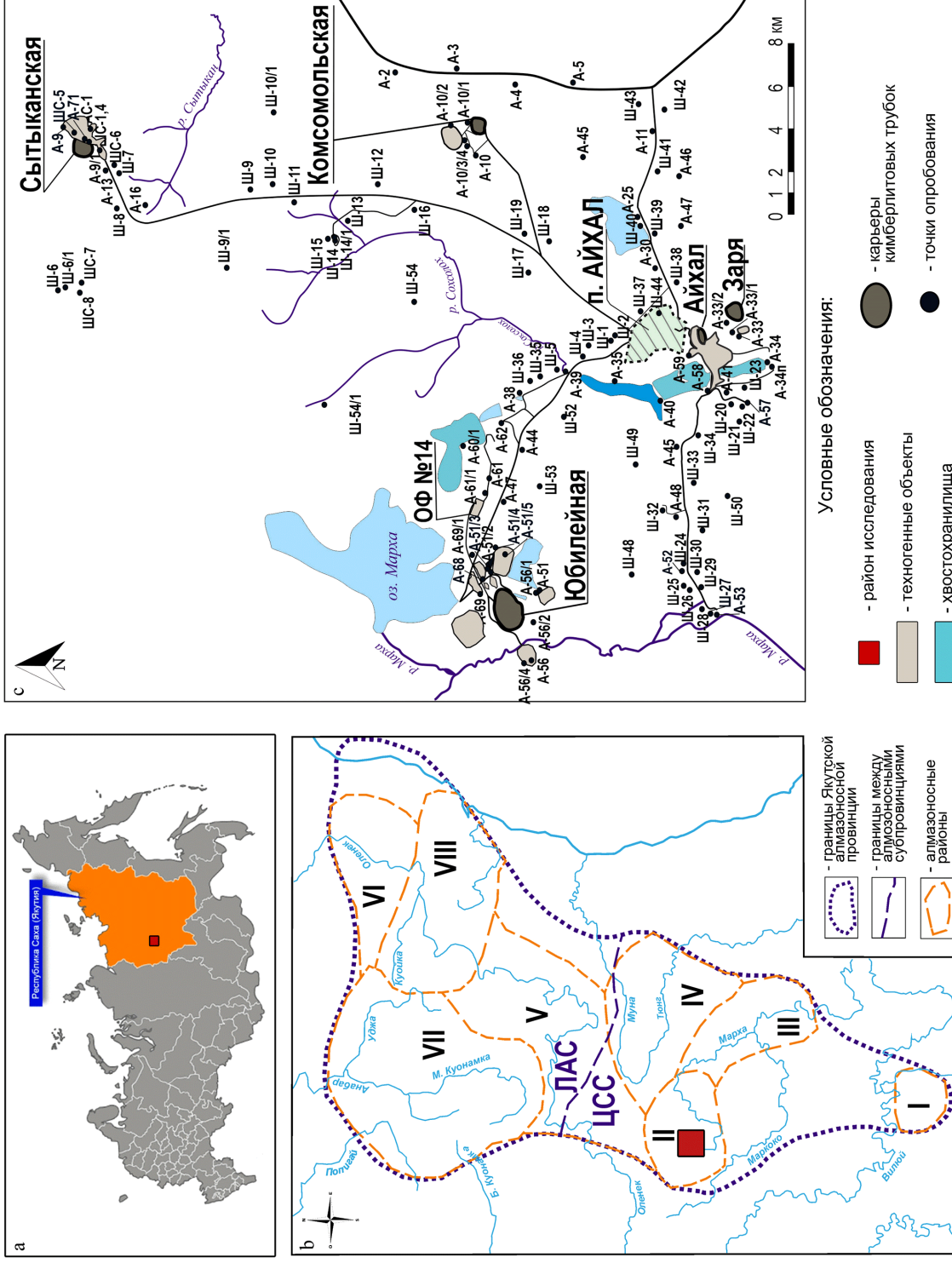


Рис. 1. Карта-схема территории исследования на карте России (а); схема размещения алмазонасных районов Якутской алмазонасной провинции (Россыпи..., 2005) (b); ЦСС — Центрально-Сибирская субпровинция, ЛАС — Лено-Анабарская субпровинция, алмазонасные районы: I — Малоботуобинский, II — Далдыно-Алакитский, III — Среднемархинский, IV — Мунно-Тюнгский, V — Нижнеоленецкий, VII — Анабарский, VIII — Приленский; карта фактического опробования почв и грунтов на территории АТОК (с)

Fig. 1. Map of the study area on the map of Russia (a); the location of diamond-bearing regions of the Yakut diamond-bearing province (Rosсыпи..., 2005) (b): ЦСС — Central Siberian subprovince; diamond-bearing regions: I — Malobotuobinsky, II — Daldyno-Alakitsky, III — Srednemarkhinsky, IV — Muno-Tyungsky, V — Sredneoleneksky, VII — Anabarsky, VIII — Prilensky; map of actual soil sampling on the territory of the Aikhal Mining and Processing Division (c)

В региональном тектоническом плане территория находится в пределах северо-восточной окраины Тунгусской синеклизы. Глубина залегания пород фундамента составляет от 2500 м на северо-востоке до 3100 м в его юго-западной части (Поспеева, Толстов, 2024). В геолого-стратиграфическом разрезе изучаемой толщи участка принимают участие палеозойские осадочные образования: карбонатно-терригенные отложения онхойюряхской свиты (кембрийская система); олдондинской, сохсоллоохской, сытыканской и кылахской свит (ордовикская система); байтахской и башенной (силурийская система); айхальской свиты (каменноугольная система). Осадочные породы перекрыты трапповым полем (мощностью 76–93 м) позднепалеозойского-раннемезозойского периода (P_2-T_1), образованным внедрением магмы основного состава — долеритами, слагающими крупные пластовые тела интрузий, и дайками, а также туфами (Янников и др., 2021).

В современном ландшафтном срезе почвы территории формируются на следующих отложениях: вершины и верхние части склонов водоразделов, сложенные траппами, сформированы преимущественно криоземами типичными (O-CR-C), криоземами глееватыми (O-CR_g-C_g) и литоземами серогумусовыми иллювиально-ожелезненными (AU-Cf-M). В средней и нижней частях склонов на породах нижнего силура и среднего ордовика располагаются карболитоземы Н-(С)-M_{Ca}. Техногенные отложения сформированы грунтами отвалов вскрыши и пустых пород рудоконтролирующих зон, а также отложениями хвостохранилищ и отстойников оборотного водоснабжения обогатительных фабрик (Шадринова, Легостаева, 2025).

Объектами исследований являются почвы и грунты промышленной площадки АГОКа. Опробование проводилось согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017 методом ключевых участков в зоне влияния инфраструктуры промышленной площадки АГОКа. Исследования выполнялись по двум направлениям. Оценка геоэкологического состояния: для анализа почвенного покрова в природных биотопах и на техногенно-нарушенных участках отбор проб производился с глубин 0–10 и 10–20 см. Для обеспечения репрезентативности образцов на каждой площадке использовался «метод конверта». Диагностика и классификация: для изучения почв и почвоподобных образований закладывались полнопрофильные почвенные разрезы. Опробование выполнялось по всему профилю с отбором проб из каждого генетического горизонта или диагностируемого слоя. Местоположение точек опробования фиксировалось с помощью GPS-навигатора (Garmin, модель GPSMAP 64). Общий объем выборки составляет 243 почвенные пробы. Диагностика типов почв проведена в соответствии с Мировой реферативной базой почвенных ресурсов (Мировая..., 2024).

Химические анализы выполнялись по стандартным методикам с использованием стандартных образцов для почв — САДПП-07/2020 и САДПП-08/6тм ФГБНУ «ВНИИА агрохимии» с аттестованными значениями валового содержания микроэлементов. Почвы проанализированы на содержание валовых форм потенциально токсичных элементов (Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn, Cu, As) атомно-эмиссионным спектральным по-луколичественным анализом (АЭС), выполненном

на дифракционном спектрографе ДФС-8 с решеткой 600 штр/мм и однолинзовой системой освещения щели спектрографа согласно методике МП-7С в сертифицированной лаборатории ЦГЛ АО «Якутскгеология» (сертификат соответствия № СДС «УКАРГЕО» RU 0027.16 и № СДС «УКАРГЕО» RU 0027.21). Химический анализ каждого образца проводили в двух повторностях относительно контроля аналитической точности.

Как известно, индексы загрязнения применяются для перевода или интерпретации сложных химических данных о концентрации различных веществ в единый понятный показатель, который позволяет оценить качество окружающей среды и, конечно, различные геоэкологические и экологические риски. Индексы позволяют сопоставлять качество компонентов в разных городах, регионах или на различных участках мониторинга, используя единую шкалу и таким образом унифицируя данные.

В настоящем исследовании оценка загрязнения почвенного покрова проведена на основании расчетов геохимических коэффициентов — коэффициента концентрации (K_c), индекса загрязнения (PI), потенциального экологического фактора риска ПТЭ (E_r^I) и интегральных индексов — индекса Немерова (INI), индекса нагрузки загрязнения (PLI), суммарного показателя загрязнения почвенного покрова (Z_c), индекса потенциального экологического риска (RI).

Индекс Немерова (INI) применяется для оценки общих экологических рисков всех рассматриваемых ПТЭ, основанной на индексе геоаккумуляции (I_{geo}), который рассчитывается по следующим формулам:

$$INI = \sqrt{\frac{(I_{geo})^2_{max} + (I_{geo})^2_{avg}}{2}}, \quad (1)$$

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1,5 \times B_n} \right), \quad (2)$$

где C_n — измеренная концентрация микроэлементов в почве (ppm), B_n — геохимическое фоновое значение соответствующего микроэлемента (ppm) или его эталонное значение n . $(I_{geo})_{max}$ и $(I_{geo})_{avg}$ — максимальное и среднее значения I_{geo} для ПТЭ в точке мониторинга соответственно.

Коэффициент 1.5 используется для устранения возможных вариаций фоновых значений для данного микроэлемента в окружающей среде, а также небольших антропогенных воздействий (Adlane et al., 2020).

Индекс нагрузки загрязнения (PLI) показывает общую степень загрязнения, который позволяет легко доказать ухудшение состояния почвы в результате накопления ПТЭ и рассчитывается по следующим формулам:

$$PLI = (PI_1 \times PI_2 \times PI_3 \times \dots \times PI_n)^{1/n}, \quad (3)$$

$$PI = \frac{C_n}{B_n}, \quad (4)$$

где PI представляет собой коэффициент загрязнения ПТЭ i , C_n — измеренное значение ПТЭ в почве (ppm), B_n — геохимическое фоновое значение ПТЭ в местной почве (ppm), а n — количество ПТЭ (Abliz et al., 2022).

Индекс потенциального экологического риска (RI) применяется для оценки токсикологического воздействия ПТЭ. Формулы расчёта индекса RI следующие:



$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times P_i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_n}{B_n}, \quad (5)$$

$$E_r^i = T_r^i \times P_i, \quad (6)$$

где E_r^i — потенциальный экологический фактор риска ПТЭ i ; P_i — измеренное содержание элемента i (ppm), T_r^i — фактор токсической реакции отдельных ПТЭ i , имеющих следующие значения для исследованных ПТЭ: Pb = 5, Ni = 5, Mn = 1, Cd = 30, Co = 5, Cr = 2, Cu = 5, Zn = 1 и As = 10 (Wang et al., 2023).

Показатель суммарного загрязнения (Z_c) характеризует степень химического загрязнения почв и грунтов обследуемых территорий ПТЭ и является индикатором неблагоприятного воздействия на здоровье населения. Рассчитывается по следующим формулам:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_c - (n - 1), \quad (7)$$

$$K_c = \frac{C_n}{B_n}, \quad (8)$$

где K_c представляет собой коэффициент загрязнения ПТЭ со значением $K_c > 1.5$, n — число аномальных элементов. Элементы с очень низким фоновым содержанием не использовались.

Значения регионального фона рассчитаны на основе статистически достоверной выборки ($n = 1241$), куда вошли образцы доминирующих и интразональных типов почв природных ненарушенных ландшафтов Северо-Западной Якутии. Таким образом, под термином «параметры регионального фона» мы понимаем средние геометрические значения содержания валовых форм микроэлементов в почвенном покрове по данным наших исследований и с привлечением результатов известных геохимических изысканий в регионе, сопоставимых по химико-аналитическим методам (Ягнышев и др., 2005).

Индекс потенциального риска (RI) отражает токсикологическую опасность одного или нескольких элементов и рассчитывается на основе индивидуального коэффициента токсичности элемента (E_r^i).

Геохимические данные обработаны с помощью пакета программ Statistica и OriginPro 2024. Элементы контурной карты были построены методом интерполяции кригинга с помощью Surfer 25.

Результаты и обсуждение

Для оценки степени антропогенного воздействия на почвенный покров использован анализ коэффициентов вариации ПТЭ (табл. 1). Высокие значения коэффициента вариации (CV) интерпретируются как признак техногенного загрязнения, в то время как низкие указывают на естественное происхождение элементов. Опираясь на пороговые значения, предложенные в работе Abliz et al. (2022), мы распределили элементы по степени их пространственной дисперсии. Наибольшая изменчивость, указывающая на локальные источники загрязнения, характерна для цинка (Zn). Полный ранжированный ряд ПТЭ по мере снижения их изменчивости выстраивается в следующей последовательности: Zn > Ni > Cr > As > Cu > Pb > Mn > Co > Cd.

Разброс значений коэффициента вариации позволяет выявить дифференциацию уровней поступления ПТЭ в почву, что указывает на неоднородное распределение техногенной нагрузки на почву внутри промплощадки. Анализ средних концентраций позволяет выстроить иерархию накопления ПТЭ. Ряд убывания выглядит следующим образом: Cr > Zn > Ni > Mn > Cu > Co > As > Pb > Cd. Несмотря на лидерство хрома в общем валовом содержании, по степени антропогенного влияния на первое место выходит никель. Для оценки экологического состояния площадки использовались два ключевых направления анализа ситуации: вариации коэффициентов концентрации и распространность загрязнения.

В почвах промышленной площадки Айхальского ГОКа зафиксирована специфическая структура загрязнения. Наибольшее отклонение от фоновых уровней отмечено для Ni (в 3.3 раза), Cu (2.1) и Zn (1.9). Хром и кобальт демонстрируют менее выраженное превышение K_c (1.5 и 1.2 соответственно). Наиболее часто (более чем в 60 % проб) превышение фона наблюдается у меди, цинка и никеля. Свинец (27 %) и хром (35 %) имеют более локальный характер распределения.

По значениям коэффициента концентрации микроэлементов условно можно разделить на три группы (Янин, 2004):

- микроэлементы, концентрация которых превышает фоновый уровень более чем в 1,5 раза ($K_c > 1.5$);
- микроэлементы с концентрацией, близкой к фоновым (K_c от 0,70 до 1,5);
- микроэлементы с концентрацией ниже фоновых ($K_c \leq 0.70$).

Значительное превышение ($K_c > 1.5$) чаще всего встречается у меди (54 %) и никеля (47 %). Также существенная доля проб с превышением отмечена для мышьяка (44 %) и цинка (41 %). Реже высокие концентрации фиксировались у хрома (27 %), кобальта (22 %), марганца и свинца (по 15 %).

Концентрации на уровне фона характерны для кобальта (44 %), марганца (43 %) и свинца (41 %). Для остальных элементов этот показатель варьирует от 25 % (Cu) до 39 % (Ni).

Самые низкие показатели концентрации (ниже фоновых значений) зафиксированы у мышьяка (56 % проб) и свинца (44 %). Реже всего значения ниже регионального фона встречались у никеля (14 %).

На основе расчетов I_{geo} и INI оценены экологические риски всех проанализированных ПТЭ. Анализ результатов расчетов (рис. 2, а) выявил значительную вариативность I_{geo} . Так, показатели индекса геоаккумуляции распределились следующим образом: для Pb значения варьировали в пределах от -3.54 до 1.52, для Ni — от -2.96 до 4.19, для Mn — от -2.42 до 1.64. Для остальных элементов интервалы составили: Co — от -2.82 до 1.98, Cr — от -4.63 до 4.11, Zn — от -2.52 до 1.39, Cu — от -1.53 до 3.53 и As — от -0.58 до 3.32. Доля As, которым наиболее загрязнены исследуемые почвы, занимает 38 % и относится к категории сильного загрязнения (табл. 2). Ранжирование исследуемых элементов по величине среднего индекса геоаккумуляции выявило следующую убывающую последовательность: As > Ni > Cu > Zn > Mn > Co > Cr > Pb > Cd.

Согласно расчету индекса INI , для большинства проб значения превысили единицу (среднее — 1.5, ме-

Таблица 1. Вариационно-статистическая характеристика содержания ПГЭ в почвах на территории промышленной площадки Айхальского горно-обогатительного комбината (n = 245), ppm

Table 1. Variational statistical characteristics of the content of hazardous elements in soils on the territory of the industrial site of the Aikhal Mining and Processing Division (n = 245), ppm

Элемент Elements	Множитель Multiplier	Породы* / Rocks*				Почвы / Soils							
		Доломиты, прослой мергелей нижнего ордовика O _{1ol} – O _{2-3kl} Lower Ordovician dolomites, marls layers	Мергели и известняки нижнего силура S ₁ Lower Silurian marls and limestones	Кимберлиты oD ₃ -C ₁		Фон*** Background	Среднее Mean	Среднее геом. Geometric mean	Медиана Median	Мин. Min	Макс. Max	КВ CV	CO SD
Pb	10 ⁻³	0.14–0.15	6.63	1.3	-	1.16	1.09	0.84	1.00	0.10	10.0	81.7	0.89
Ni	10 ⁻³	2.05–0.85	1.45	57.5	-	3.64	12.0	6.04	5.00	0.30	100	172.5	20.7
Mn	10 ⁻²	22.33–0.77	15.3	-	-	10.68	11.5	9.25	10.0	1.50	100	79.4	9.13
Cd	10 ⁻⁴	**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Co	10 ⁻³	5.97–2.82	0.94	4.95	4.59	2.36	2.81	2.09	2.00	0.10	15.0	74.7	2.10
Cr	10 ⁻³	6.64–2.80	6.63	86.5	113.6	11.58	17.8	10.9	10.0	0.50	300	143.8	25.6
Zn	10 ⁻³	0–0.23	0.47	-	-	7.65	14.6	9.31	10.0	0.10	1000	375.3	54.8
Cu	10 ⁻³	2.3–2.96	2.38	1.9	-	2.88	5.91	4.40	5.00	1.00	50.0	93.7	5.54
As	10 ⁻³	-	-	-	-	-	1.39	0.44	0.10	0.10	5.0	106.5	1.48

Примечание/Note: КВ/CV – коэффициент вариации/coefficient of variation; CO/SD – стандартное отклонение/standard deviation.

* – данные приведены по: Салихов и др., 2013; ** – не определялись; *** – значения регионального фона для почв природных ландшафтов Северо-Западной Якутии (Ягнышев и др., 2005)

* – data are given according to (Salikhov et al., 2013); ** – not determined, *** – regional background values for soils of natural landscapes of North-Western Yakutia (Yagnyshev et al., 2005)

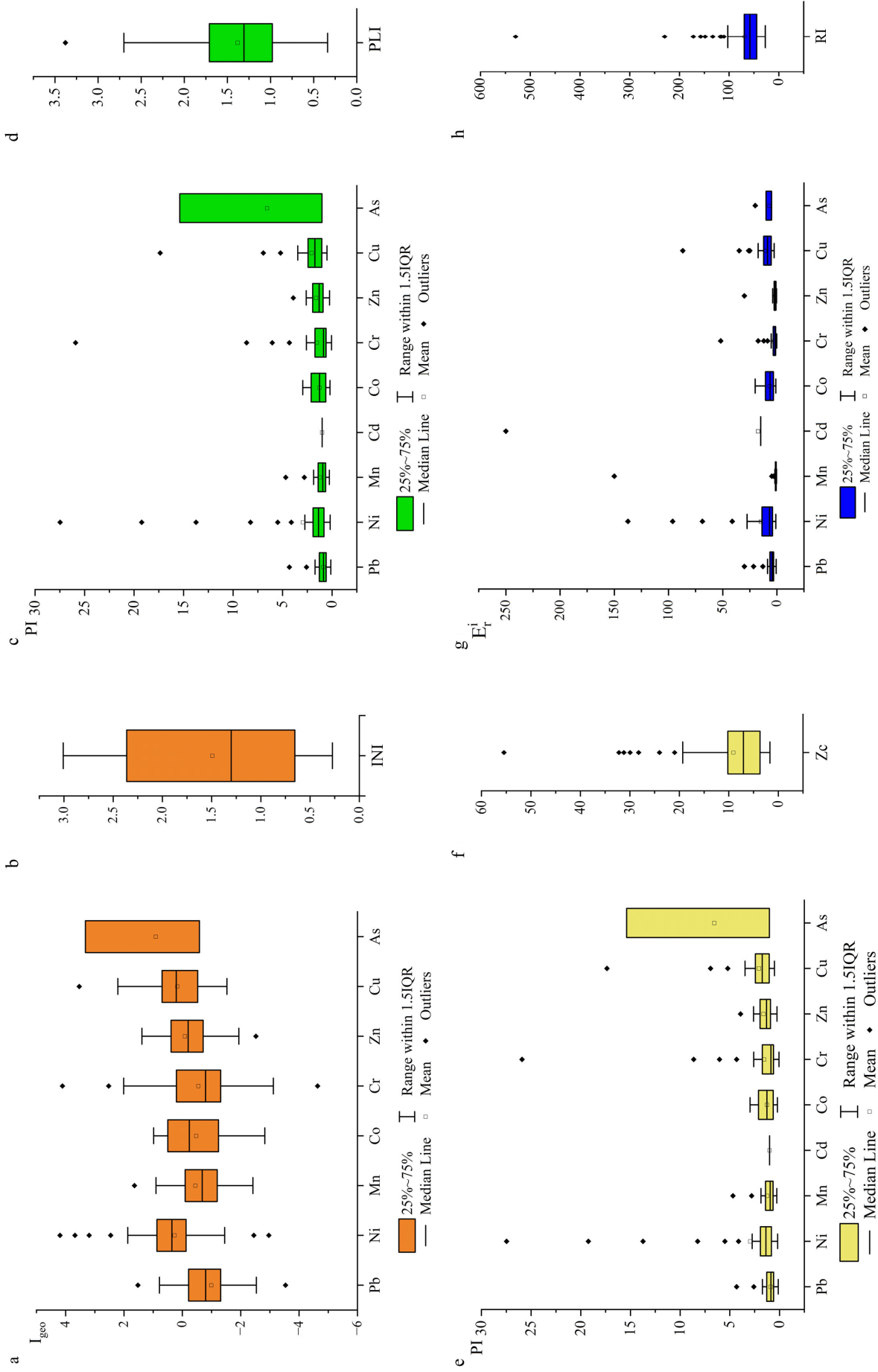


Рис. 2. Диаграммы коэффициентов и индексов загрязнения почв: а — индекс геоаккумуляции (I_{geo}), б — индекс Немерова (INI), с — индекс загрязнения (PI), д — индекс нагрузки загрязнения (PLI), е — коэффициент концентрации (K_c), ф — индекс суммарного загрязнения (Z_c), г — потенциальный экологический фактор (E_i^j), h — индекс потенциального экологического риска (RI)

Fig. 2. Diagrams of pollution indices: а — geoaccumulation index (I_{geo}), б — Nemerov index (INI), с — index pollution (PI), д — pollution load index (PLI), е — coefficient concentration (K_c), ф — total pollution index (Z_c), г — potential environmental factor (E_i^j), h — potential environmental risk index (RI)

диана — 1.3; рис. 2, b) при общем диапазоне от 0.27 до 3.0. Распределение проб по категориям загрязнения — от «чистых» (13 %) до «сильно загрязненных» (1 %) — свидетельствует об общем росте концентраций ПТЭ в почвах промплощадки. Примечательно, что 44 % образцов относятся к категории от умеренно до сильно загрязненных. Пиковая нагрузка зафиксирована вблизи обогатительной фабрики № 14 (точка А-61), где индекс достиг своего максимума.

Индекс нагрузки загрязнения (*PLI*), рассчитанный из значений *PI* (рис. 2, c), обеспечивает простое сравнительное средство уровня ПТЭ на исследуемой территории, которое представляет собой количество превышений содержания определенного элемента в почве от естественной фоновой концентрации. Диапазоны значений коэффициента загрязнения (*PI*) для исследуемых элементов распределились следующим образом: свинец (0.13—4.31), никель (0.19—27.5), марганец (0.28—4.68), кобальт (0.21—2.97), хром (0.06—25.9), цинк (0.26—3.92), медь (0.52—17.36) и мышьяк (1.03—15.4). Ранжирование элементов по их среднему значению *PI* выявило, что наибольшее значение в загрязнении территории имеет мышьяк, а наименьшее — кадмий. Анализ средних показателей *PI* позволил сформировать убывающий ряд приоритетности ПТЭ: As > Ni > Cu > Zn > Cr > Co > Mn > Pb > Cd.

Наибольшая доля загрязнения приходится на As и составляет в сумме 100 %. Согласно результатам исследования, индекс загрязнения почвы (*PLI*) варьировал в пределах от 0.34 до 3.38, составив в среднем 1.38 (рис. 2, d). В большинстве отобранных проб значения превышают единицу, что подтверждает антропогенную нагрузку на почвенный покров. По степени загрязненности образцы распределились следующим образом: 28 % — незагрязненные, 60 % — от умеренно до сильно загрязненных, 11 % — умеренно загрязненные и только 1 % — от умеренно до сильно загрязненных. Критическая ситуация отмечена в районе обогатительной фабрики № 8 (точка III-2), где индекс достиг своего максимума: *PLI* = 1.3.

Суммарный показатель загрязнения (*Z_c*) основывается на расчете суммы коэффициентов концентрации (*K_c*) со значением >1.5 (рис. 2, e). Значения *Z_c* варьировали от 1,7 до 55.5 при медиане 9.1, что соответствует низкому уровню загрязнения (рис. 2, f).

Распределение значений коэффициента указывает на преимущественно благоприятную экологическую обстановку: 87 % данных соответствуют низкому уровню загрязнения. Средняя и высокая степени загрязнения зафиксированы в 10 и 2 % случаев соответственно. Аномальный пик значения *Z_c* = 57.5, характеризующий состояние в зоне аварийного разрыва пульповода хвостового хозяйства вблизи обогатительной фабрики № 14, отмечен в точке А-61. Лидирующие позиции среди загрязнителей занимают медь (64 %), никель (50 %) и цинк (48 %), демонстрируя наибольшую частоту превышения фоновых значений в исследуемых образцах.

Большие колебания рассчитанных коэффициентов отражают влияние различных геохимических обстановок, которые складываются из телескопирования в почвах природной геохимической аномальности траппов и долеритов Алакит-Мархинского кимберлитового поля, техногенного воздействия объектов ин-

фраструктуры горно-обогатительных комбинатов и их совокупного эффекта.

Разброс значений выявлен и при расчёте индивидуального коэффициента токсичности элементов (рис. 2, g), что закономерно и для индекса потенциального токсикологического риска. Диапазон значений *E_tⁱ* исследуемых почв составляет: 0.1—51.8 — для Cr, 0.3—150.0 — для Mn, 1.1—20.0 — для Co, 0.96—137.4 — для Ni, 2.6—86.8 — для Cu, 0.3—30.0 — для Zn, 5.0—20.0 — для As и 0.7—30.0 — для Pb.

Согласно распределению средних значений коэффициента *E_tⁱ*, исследуемые элементы образуют убывающий ряд: Ni > Cu > As > Co > Pb > Cr > Mn > Zn > Cd. Как следует из данных таблицы 2, доминирующим загрязнителем является никель. Лидирующая позиция Ni объясняется эффектом «двойной нагрузки», при которой естественный геохимический фон усиливается техногенными выбросами.

Показатели потенциального экологического риска (*RI*) распределены в широком диапазоне: от 27.3 до 529.5 единиц (рис. 2, h). Несмотря на экстремальный максимум в точке А-61 (*RI* = 196.9), среднее значение составило 68.5, что классифицируется как низкий токсикологический риск. Подавляющее большинство проб (95 %) соответствуют низкому уровню риска, 4 % — умеренному, и лишь 1 % образцов указывает на значительную степень токсикологического риска на исследуемой территории.

Анализ рассчитанных индексов выявил на большей территории промышленной площадки Айхальского горно-обогатительного комбината в целом благополучную геоэкологическую ситуацию. При этом зафиксированы признаки высокого локального загрязнения. Вклад каждого ПТЭ у индексов загрязнения отличается (табл. 3). Различия в значениях рассчитанных индексов обусловлены спецификой их методологических подходов. Индекс *PLI* охватывает наиболее широкий спектр ПТЭ, обеспечивая комплексную качественную оценку загрязнения. Показатель *Z_c* включает меньший перечень элементов, так как учитывает только те коэффициенты, значения которых превышают фоновые. Применение индекса *INI* еще больше сузило спектр ПТЭ; данный метод минимизирует учет влияния геологических процессов на фоновые показатели и предполагает линейную зависимость уровня загрязнения от концентрации элемента. Индекс *RI* наиболее жестко фильтрует данные, так как интегрирует не только экологические, но и токсикологические эффекты.

Стабильное присутствие Ni во всех расчетных моделях подтверждает его статус основного загрязнителя, определяющего эколого-геохимическое и токсикологическое состояние почв исследуемой территории.

Применение совокупности индексов (*INI*, *PLI*, *Z_c*, *RI*) дает возможность разделить природный и техногенный вклад в элементный состав почв. Индексы *PLI* и *Z_c* идентифицируют группу элементов (As, Ni, Cu, Zn, Cr, Co, Mn), определяющих естественную геохимическую специфику почв региона, связанную с формированием природной геохимической аномальности, и определяют характер вторичного техногенного загрязнения при освоении и эксплуатации коренных месторождений алмазов. В свою очередь, индексы *INI* и *RI* акцентируют внимание на антропогенной состав-

Таблица 2. Распределение категорий загрязнения ПТЭ по коэффициентам загрязнения
Table 2. Distribution of pollution categories of the PTEs by pollution indices

Уровни загрязнения / Pollution levels	Градации значений Gradations of values	Коэффициент встречаемости, H_i (%) / Prevalence rate, H_i (%)									
		Pb	Ni	Mn	Cd	Co	Cr	Zn	Cu	As	
незагрязненный / unpolluted	$I_{geo} \leq 0$	90.2	48.0	78.4	100.0	70.6	72.5	52.0	35.3	61.8	
от незагрязненного до умеренно загрязненного unpolluted – moderately polluted	$0 < I_{geo} \leq 1$	8.8	37.3	19.6	0.0	29.4	20.6	45.1	46.1	0.0	
умеренно загрязненный / moderately polluted	$1 < I_{geo} \leq 2$	1.0	6.9	2.0	0.0	0.0	2.9	2.9	13.7	0.0	
от умеренно до сильно загрязненного moderately – heavily polluted	$2 < I_{geo} \leq 3$	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	3.9	0.0	
сильно загрязненный / heavily polluted	$3 < I_{geo} \leq 4$	0.0	5.9	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	3.9	38.2	
от сильно до чрезвычайно загрязненного heavily – extremely polluted	$4 < I_{geo} \leq 5$	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
чрезвычайно загрязненный / extremely polluted	$I_{geo} > 5$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
низкий / low polluted	$PI \leq 1$	73.3	25.7	53.5	0.0	49.5	58.4	31.7	15.8	0.0	
средний / moderate polluted	$1 < PI \leq 3$	26.7	60.4	45.5	99.0	50.5	34.7	66.3	67.3	61.4	
высокий / high polluted	$PI > 3$	1.0	13.9	1.0	0.0	0.0	6.9	2.0	16.8	38.6	
отсутствует накопление / there is no accumulation	$K_c \leq 1.5$	90	50	80	100	73	73	52	36	100	
аккумуляция / accumulation	$K_c > 1.5$	10	50	20	0	27	27	48	64	0	
низкий экологический риск / low ecological risk	$E_r^i < 40$	100.0	99.0	99.0	99.0	100.0	99.0	100.0	99.0	100.0	
умеренный экологический риск / moderate ecological risk	$40 < E_r^i < 80$	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
значительный экологический риск / considerable ecological risk	$80 < E_r^i < 160$	0.0	4.9	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	
высокий экологический риск / high ecological risk	$160 < E_r^i < 320$	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
очень высокий экологический риск / very serious ecological risk	$E_r^i > 320$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Таблица 3. Элементы, определяющие эколого-геохимические риски по результатам расчетов индексов загрязнения почв промышленной площадки Айхальского горно-обогатительного комбината

Table 3. Integrated assessment of soil pollution indices at the industrial site of the Aikhal Mining and Processing Plant

Оценка общих экологических рисков Assessment of general environmental risks	Индекс нагрузки загрязнения Pollution load index	Суммарный коэффициент загрязнения Total pollution coefficient	Индекс потенциального риска Potential risk index
INI	PLI	Z_c	RI
As, Ni, Cu	As, Ni, Cu, Zn, Cr, Co, Mn	As, Ni, Cu, Zn, Cr	Ni

ляющей, выделяя Ni, As и Cu как основные маркеры техногенной нагрузки.

Визуализация индексов загрязнения на картах-схемах послужила инструментом для определения наиболее проблемных геоэкологических зон. Полученные пространственные конфигурации для индексов INI ,

PLI , Z_c и RI оказались идентичными (рис. 3), подтверждающая единообразие в распределении как фоновых зон с природным допустимым уровнем концентрации ПТЭ в почвах, так и очагов сильного загрязнения.

Анализ расположения участков с умеренным и высоким экологическим риском, концентрации потен-

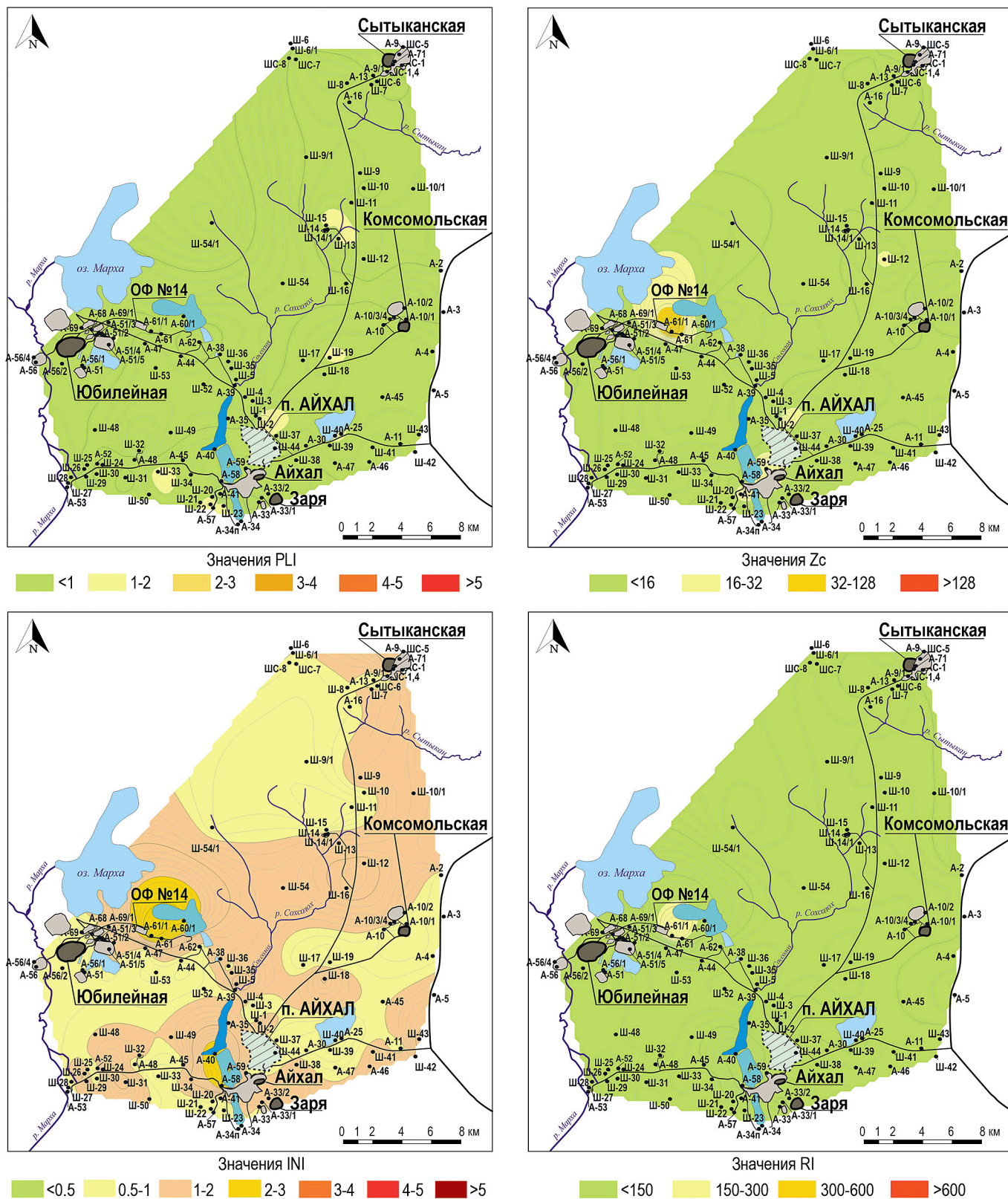


Рис. 3. Карта-схема пространственного распределения индексов загрязнения в почвах промышленной площадки Айхальского горно-обогатительного комбината

Fig. 3. Map-scheme of the spatial distribution of pollution indices in soils of the industrial site of the Aikhal Mining and Processing Plant



циально токсичных элементов и специфики микроэлементного состава почв подтверждает, что именно промышленные объекты, входящие в инфраструктуру обогатительных фабрик, выступают ключевым фактором техногенного воздействия. Следовательно, в границах выделенных участков повышенного геоэкологического риска можно ожидать усиление нагрузки в целом на компоненты окружающей среды.

Выводы

Проведенное исследование позволило охарактеризовать текущее геоэкологическое состояние почв в районе промышленной площадки Айхальского ГОКа. Выявлена существенная пространственная неоднородность микроэлементного состава почвенного покрова. Наиболее выраженная вариативность концентраций отмечена для Mn, Cr, Zn, а также для Ni.

Анализ экологических индексов (*INI*, *PLI*, Z_c и *RI*) показал, что состояние почвенного покрова промплощадки оценивается как преимущественно допустимое, несмотря на наличие зон выраженного локального загрязнения.

Расчеты выявили ключевой вклад As, Ni и Cu по индексу *INI*, As, Ni, Cu, Zn, Cr, Co, Mn по *PLI* и As, Ni, Cu, Zn, Cr по Z_c . При этом индекс экологического риска определяется преимущественно содержанием Ni. В целом никель — это единственный элемент, значимый во всех моделях расчета. Это подтверждает, что он является главным фактором экологического риска для почв промышленной площадки Айхальского ГОКа.

Использование системы геохимических индексов позволило разграничить источники аккумуляции ПТЭ в почвах промышленной площадки Айхальского ГОКа. Так, индексы *PLI* и Z_c указывают на природное происхождение повышенных концентраций в почве As, Ni, Cu, Zn, Cr, Co и Mn, формирующих геохимический облик территории еще до начала освоения алмазных месторождений Алакит-Мархинского кимберлитового поля. При этом индексы *INI* и *RI* выявляют непосредственный техногенный след, выраженный в повышенном накоплении Ni, As и Cu, что свидетельствует об их антропогенном привносе.

С помощью карт пространственного распределения удалось наглядно выделить районы с наихудшей геоэкологической обстановкой. Анализируемые индексы демонстрируют схожую динамику, позволяя выделить на исследуемой территории как благополучные участки, так и локальные площадки высокой геоэкологической напряженности, приуроченные к территориям обогатительных фабрик.

Таким образом, проведенные исследования выявили методологические различия при анализе индексов загрязнения *INI*, *PLI*, Z_c и *RI*. На примере восьми потенциально токсичных элементов видно, что выбор индекса напрямую влияет на широту спектра выявленных загрязнителей. На основании этого проявляется четкая иерархия чувствительности индексов: переход от общего загрязнения (*PLI*) к учету превышений значений регионального фона (Z_c) и далее к анализу токсичности (*RI*) закономерно сужает список значимых ПТЭ. Применение *INI* позволяет более точно отсеять естественные геохимические аномалии от техногенного воздействия.

Примененная схема оценки эколого-геохимического состояния промышленных площадок не только показывает зоны повышенного геоэкологического риска, позволяет провести ранжирование по степени геоэкологической напряженности, но и дает возможность обоснования характера нагрузки и интерпретации полученных микроэлементных спектров.

Статья подготовлена в рамках проекта по гранту РФФ №24-27-20128 «Исследование, идентификация и оценка потенциального геоэкологического риска загрязнения природной среды при поисках и освоении месторождений полезных ископаемых в резко континентальных биоклиматических условиях».

Литература / References

- Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Похиленко Н. П. Морфология и поисковое значение индикаторных минералов кимберлитов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 276 с.
- Afanasyev V. P., Zinchuk N. N., Pokhilenko N. P. Morphology and exploration value of indicator minerals of kimberlites. Novosibirsk: Publishing house of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2001. 276 p. Russian.
- Белошейкина А. В., Таловская А. В., Язиков Е. Г. Эколого-геохимическая оценка состояния почвенного покрова территории Сорского горно-обогатительного комбината (Республика Хакасия) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 1. С. 44—53.
- Belosheykina A. V., Talovskaya A. V., Yazikov E. G. Ecological and geochemical assessment of Sorsk mining and processing plant soil cover (republic of Khakassia). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2020;331(1):44—53. Russian.
- Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2021 году. Якутск, 2022. 776 с.
- State report on the state and protection of the environment of the Republic of Sakha (Yakutia) in 2021. Yakutsk; 2022. 776 p. Russian.
- Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2024 году. Якутск, 2025. 53 с.
- State report on the state and protection of the environment of the Republic of Sakha (Yakutia) in 2024. Yakutsk; 2025. 53 p. Russian.
- Гололобова А. Г. Оценка потенциального геоэкологического риска загрязнения почвенного покрова при освоении коренных месторождений алмазов (на примере Далдыно-Алакитского горнопромышленного района) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336. № 3. С. 7—17. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4785
- Gololobova A. G. Assessment of the potential geoecological risk of soil contamination during the development of primary diamond deposits (using the Daldyno-Alakitsky mining region as an example). Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2025;336(3):7—17. Russian.
- Костровицкий С. И. Петрохимические и геохимические типы кимберлитов якутской провинции, их алмазоносность // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях:

- Материалы конференции, посвященной 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА» / Акционерная компания «АЛРОСА» (ЗАО), Якутское научно-исследовательское геологоразведочное предприятие (ЯНИГП) ЦНИГРИ. 2008. С. 22–27.
- Kostrovitsky S. I. Petrochemical and geochemical types of kimberlites of the Yakut province, their diamond potential. Problems of forecasting and prospecting for diamond deposits in closed areas: Proceedings of the conference dedicated to the 40th anniversary of the Yakut Scientific Research Geological Exploration Enterprise ALROSA. ALROSA Company, Yakut Scientific Research Geological Exploration Enterprise; 2008. p. 22–27. Russian.
- Легостаева Я. Б., Гололобова А. Г. Особенности распределения микроэлементов в почвах фоновых и импактных зон на участках алмазодобычи на северо-западе Сибирской платформы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 9. С. 142–153. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3364
- Legosteva Ya. B., Gololobova A. G. Features of the distribution of trace elements in soils of background and impact zones at diamond mining sites in the northwest of the Siberian platform. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2021;332(9):142–153. Russian.
- Никифоров А. А., Миронова С. И. Техногенная трансформация растительности на территории Айхальского горно-обогатительного комбината (Западная Якутия). Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 1. С. 14–20. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.1.14
- Nikiforov A. A., Mironova S. I. Technogenic transformation of vegetation on the territory of the Aikhal Mining and Processing Division (Western Yakutia). Arctic Environmental Research. 2017;17(1):14–20. Russian.
- Макаров В. Н. Эколого-геохимическая оценка техногенного воздействия на окружающую среду Якутии // География и природные ресурсы. 2010. № 1. С. 45–48.
- Makarov V. N. Ecological and geochemical assessment of technogenic impact on the environment of Yakutia. Geography and natural resources. 2010;1:45–48. Russian.
- Мировая реферативная база почвенных ресурсов: Международная система почвенной классификации для диагностики почв и составления легенд почвенных карт. М.: МАКС Пресс, 2024. 248 с.
- World Reference Database of Soil Resources. International Soil Classification System for Soil Diagnostics and Soil Map Legends. Moscow: MAKS Press; 2024. 248 p. Russian.
- Поспеева Е. В., Толстов А. В. Новые перспективы Алакит-Мархинского кимберлитового поля на проявление кимберлитового магматизма // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2024. № 29(1). С. 20–37. DOI: 10.31242/2618-9712-2024-29-1-20-37
- Pospeeva E. V., Tolstov A. V. New prospects of the Alakit-Markhinsky kimberlite field for the manifestation of kimberlite magmatism. Natural resources of the Arctic and Subarctic. 2024;29(1):20–37. Russian.
- Россыпи алмазов мира. М.: Геоинформмарк, 2005. 747 с.
- Placers of diamonds of the world. Moscow: Geoinformmark; 2005. 747 p. Russian.
- Салихов Р. Ф., Салихова В. В., Иванюшин Н. В., Охлопков В. И. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Верхневилуйская. Лист Q-49-XXI, XXII (Айхал). Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013.
- Salikhov R. F., Salikhova V. V., Ivanyushin N. V., Okhlopkov V. I. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Verkhnevilyuyskaya Series. Sheet Q-49-XXI, XXII (Aikhal). Explanatory Note. Moscow: MF VSEGEI, 2013. Russian.
- Сорокина О. А., Киселев В. И. Загрязнение почв в зоне освоения Джалиндинского россыпного и рудного месторождений золота в Приамурье // Экология и промышленность России. 2005. № 7. С. 24–28.
- Sorokina O. A., Kiselev V. I. Soil contamination in the development zone of the Dzhalinginsky placer and ore gold deposits in the Amur region. Ecology and industry in Russia; 2005. Vol. 7; p. 24–28. Russian.
- Шадринова О. В., Легостаева Я. Б. Техногенный педогалогенез на территории Алакит-Мархинского кимберлитового поля (Якутия, Россия) // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2025. № 3(227). С. 122–134. DOI: 10.18522/1026-2237-2025-3-122-134
- Shadrinova O. V., Legosteva Ya. B. Technogenic pedohalogenesis on the territory of the Alakit-Markhinsky kimberlite field (Yakutia, Russia). News of higher educational institutions. North Caucasus region. Series: Natural sciences. 2025;3(227):122-134. Russian.
- Ягнышев Б. С., Ягнышева Т. А., Зинчук М. Н., Легостаева Я. Б. Экология Западной Якутии (геохимия геосистем: состояние и проблемы). Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2005. 432 с.
- Yagnyshev B. S., Yagnysheva T. A., Zinchuk M. N., Legosteva Ya. B. Ecology of Western Yakutia (geochemistry of geosystems: state and problems). Yakutsk: Publishing house YANTS SB RAS; 2005. 432 p. Russian.
- Янин Е. П. Техногенные илы в реках Московской области (геохим. особенности и экол. оценка). М.: ИМГРЭ, 2004. 96 с.
- Yanin E. P. Man-made Silts in Rivers of the Moscow Region: (Geochemical Features and Ecological Assessment). Moscow: IMGRE; 2004. 96 p. Russian.
- Янников А. М., Янникова С. А., Овчинникова М. Ю., Корепанов А. Ю. Использование многолетнемерзлых пород для закачки дренажных вод коренных месторождений алмазов на примере участка «Ноябрьский» (рудник «Айхал») // Вестник Пермского университета. 2021. Т. 20. № 3. С. 284–299. DOI: 10.17072/psu.geol.20.3.284
- Yannikov A. M., Yannikova S. A., Ovchinnikova M. Yu., Korepanov A. Yu. Using permafrost rocks for pumping drainage water from primary diamond deposits: the example of the Noyabrsky site (Aikhal mine). Perm University Bulletin. 2021;20(3):284–299. Russian.
- Abliz A., Shi Q., Abulizi A. Contamination status and health risk assessment of soil heavy metals in the northern slope of eastern Tianshan mountains industrial belt in Xinjiang, Northwest China. Forests; Vol. 13. 2022. p. 1914. DOI: 10.3390/f13111914.
- Adlane B., Xu Z., Xu X., Lian 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. Vol. 39. 2020. p. 85–95. DOI: 10.1007/s11631-019-00364-8.
- Chen Y., Zhao J., Chen X., Zheng L. Analysis of the source apportionment and pathways of heavy metals in soil in a



- coal mining area based on machine learning and an APCS-MLR Model. *Minerals*. Vol. 14. 2024. p. 54. DOI: 10.3390/min14010054
- Khadija B., Abdelhak B., Mohamed T.* Trace metals distribution and fractionation in soils around the abandoned “Ichomoul” Pb-Zn Mill-Mine, north-east of Algeria. *Pollution*. 2021;7(3):511–526. DOI: 10.22059/poll.2021.317521.1003
- Siegel F. R.* Environmental geochemistry of potentially toxic metals. Vol. 32. Berlin: Springer; 2002. 218 p.
- Umeobi E. C., Ducey T. F., Johnson M. G., Ippolito J. A.* Soil health alterations via compost additions to natural and remediated heavy metal-contaminated mineland soils. *Environ Sci Pollut Res*. Vol. 32. 2025. p. 14968–14979. DOI: 10.1007/s11356-025-36602-1
- Wang Q., Cai J., Gao F., Li Z., Zhang M.* Pollution level, ecological risk assessment and vertical distribution pattern analysis of heavy metals in the tailings Dam of an Abandon Lead-Zinc Mine. *Sustainability*. Vol. 15. 2023. P. 11987. DOI: 10.3390/su151511987

Поступила в редакцию / Received 13.01.2026