



Биогеохимическая характеристика и оценка геоэкологических рисков на территории Далдынского кимберлитового поля

А.Г.Гололобова✉, Я.Б.Легостаева

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

Как цитировать эту статью: Гололобова А.Г., Легостаева Я.Б. Биогеохимическая характеристика и оценка геоэкологических рисков на территории Далдынского кимберлитового поля // Записки Горного института. 2026. Т. 278. С. 54-66. [EDN YDKTZP](#)

Аннотация

Проведено исследование на территории Далдынского кимберлитового поля, в пределах промышленной площадки Удачинского горно-обогатительного комбината (Якутия, Россия). Объектами исследования являлись мерзлотные почвы и два вида кустарников – *Betula middendorffii* T. (береза Миддендорфа) и *Duschekia fruticosa* R. (ольховник кустарниковый). Образцы почвы и растений анализировались методом атомно-абсорбционной спектроскопии на наличие потенциально токсичных элементов (Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn, Cu и As). Для каждого элемента рассчитаны коэффициент биоаккумуляции и потенциальный экологический фактор риска. В изученных растениях исследуемые элементы по содержанию располагались в убывающем порядке: $Mn > Zn > Cr > Ni > Cu > Pb > As > Co > Cd$, по степени биоаккумуляции *Betula middendorffii* T. характеризуется рядом $Cr > Zn > Ni > Mn > Pb > Cu > Cd > Co$, а *Duschekia fruticosa* R. – $Cr > Zn > Ni > Pb > Cu > Mn > Cd > Co$. В результате исследований выявлено, что *Betula middendorffii* T. и *Duschekia fruticosa* R. устойчивы к высоким концентрациям элементов, когерентных кимберлитам – Cr, Ni, Co и долеритам – Cu, Mn и Zn. Следствием проявления кимберлитового магматизма в почвах и растениях являются избыточные для растений концентрации Ni, Cr и Mn, которые определены в качестве потенциальных факторов экологического риска. Большая часть территории Далдынского кимберлитового поля характеризуется низким и умеренным экологическим риском. Импактные зоны карьеров кимберлитовых трубок и отвалов пустых пород отличаются значительным и высоким потенциальным экологическим риском.

Ключевые слова

загрязнение почв; микроэлементы; Якутская алмазоносная провинция; кимберлитовое поле; биоаккумуляция

Финансирование

Статья подготовлена в рамках выполнения проекта Государственного задания Минобрнауки РФ FUG-2024-0007 «Мантыйный магматизм, эволюция литосферы и рудоносность восточной части Сибирской платформы, геоэкология недропользования».

Поступила: 01.11.2024

Принята: 09.12.2025

Онлайн: 11.03.2026

Опубликована: 12.05.2026

Введение

Вполне доказано, что горно-добывающая промышленность из всей антропогенной деятельности вносит значительный вклад в загрязнение окружающей среды [1, 2]. Особенно если добыча полезных ископаемых проводится открытым способом, в результате чего рассеиваются рудогенные элементы, формируя полиэлементные техногенные аномалии и увеличивая концентрации микроэлементов, в том числе потенциально токсичных, во всех компонентах биосферы [3]. Загрязняющие вещества в процессе обогащения полезных ископаемых в виде твердых пылевых частиц поступают преимущественно из объектов захоронения промышленных отходов, включая отстойники, хвостохранилища, отвалы пустой породы, шламоотвалы и др. [4]. В итоге рассеивание пыли способствует попаданию поллютантов в окружающую среду, загрязняя в первую очередь почвы [5, 6], что приводит к поглощению и аккумуляции их растениями [7, 8], оказывает токсическое влияние, вызывая деградацию растительных сообществ на загрязненных почвах.



Растения, растущие на загрязненных почвах, имеют больше шансов накопить потенциально токсичные элементы, чем растения, растущие на незагрязненной почве [9, 10].

Накопление микроэлементов из почвы в растения представляет особый интерес для оценки экотоксичности почв [8], потому как растения могут удалять, разлагать или обезвреживать загрязняющие вещества [11], тем самым очищая загрязненную почву. Следовательно, изучение биодоступности микроэлементов имеет важное значение для понимания постоянной антропогенной нагрузки на этих территориях.

В настоящее время практически нет исследований биоаккумуляции микроэлементов в растениях, произрастающих на северных территориях алмазодобычи. Биогеохимические исследования на северо-востоке Сибирской платформы единичны [12], подобных исследований нет и в других регионах, где происходит добыча алмазов. Цель работы – определение концентраций потенциально токсичных элементов (ПТЕ) в высших растениях наиболее распространенных видов в кустарниковом ярусе на основе репрезентативного объема данных. В качестве территории исследований выбрана промышленная площадка Удачинского горно-обогатительного комбината (ГОК), который основан в 1982 г. и находится на территории Далдынского кимберлитового поля Якутской алмазодобывающей провинции. Исследование дает представление об устойчивости растений северной тайги к разным концентрациям микроэлементов в почвах фоновых и импактных зон.

Объект и методы исследования

Далдынское кимберлитовое поле расположено на северо-востоке Далдыно-Алаakitского алмазодобывающего района (ДААР) Якутской алмазодобывающей провинции Сибирской платформы (рис.1) и включает около 60 трубчатых тел и 7 даек [13]. Территориально ДААР находится в бассейнах верхнего течения рек Марха и Алаakit, в структурном плане – на юго-западном склоне Анабарской антеклизы, на который наложилось северо-восточное крыло Тунгусской верхнепалеозойской синеклизы. На территории в северо-восточной части преобладают карбонатные породы (известняки, доломиты, аргиллиты и мергели) нижнего ордовика и верхнего кембрия ($O_{1il}-C_3$). На юго-западе

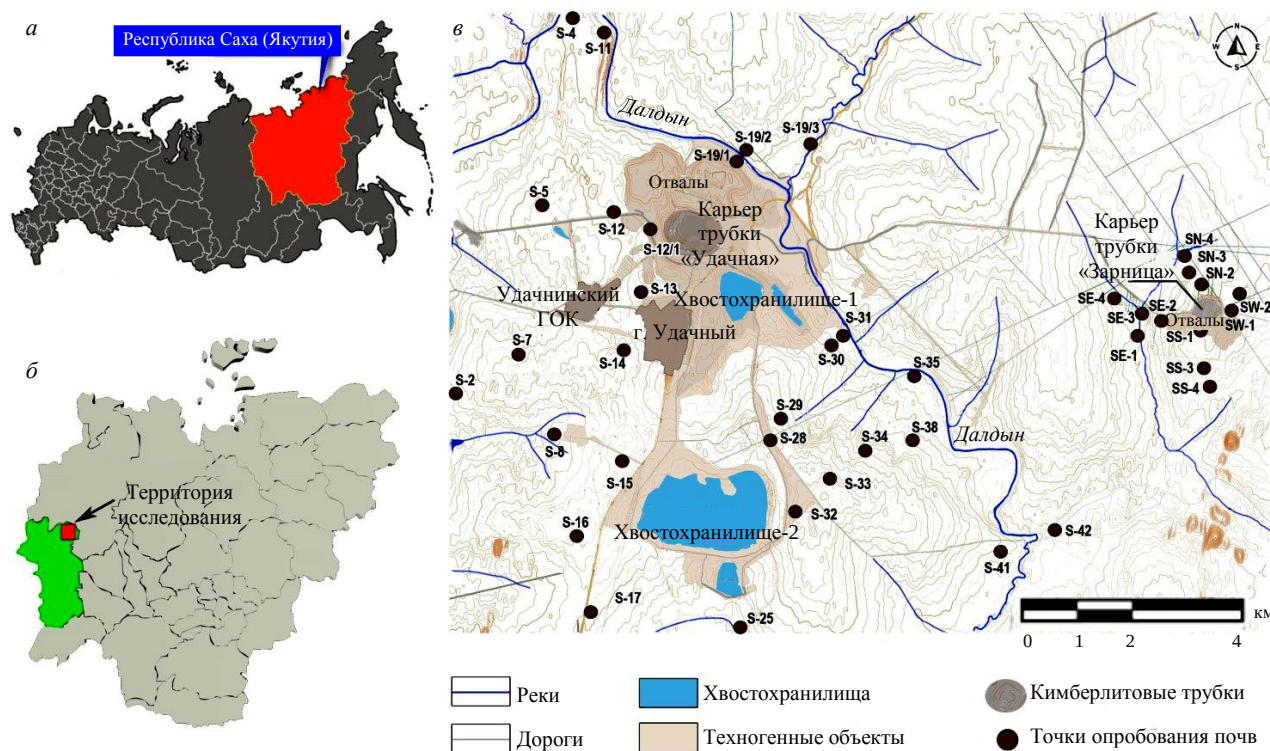


Рис.1. Карта месторасположения района исследования с нанесением точек опробования почв: а – Якутия на карте России; б – район исследования на территории Якутии; в – схема опробования почв на территории промышленной площадки Удачинского ГОК



же (в бассейне верховьев рек Алакит и Марха) закартированы пестроцветные глинисто-карбонатные отложения среднего ордовика криволуцкого яруса ($O_2\ ap+am$) и известняки лландоверийского яруса нижнего силура ($S_1\ ug+tn$). Для этой территории характерно широкое распространение верхнепалеозойских терригенных образований (глинистые сланцы, алевролиты и песчаники) среднего и верхнего карбона, а также осадочных пород нижней и верхней перми. Многочисленные секущие и пластовые интрузии долеритов мощностью до 150 м и более на многих участках интродуцируют палеозойские осадочные толщи [14].

Лидеры в Далдынском кимберлитовом поле – успешно эксплуатируемые на протяжении нескольких десятилетий трубка «Удачная», а также первая открытая на Сибирской платформе трубка «Зарница» [13], являющиеся основными участками исследований.

Особенность территории заключается в ее расположении в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Близкое залегание ММП играет существенную роль в аккумуляции микроэлементов, формируя в почвенном профиле надмерзлотный геохимический барьер [15]. Общая мощность мерзлотной толщи составляет от 250-400 до 1500 м при значениях отрицательных температур от -2 до -16 °C [16]. Рельеф траппового плато холмисто-пологоувалистый с абсолютными отметками 400-500 м и относительными превышениями над ближайшими водотоками 100-250 м [17]. Климат резко-континентальный, со среднегодовой температурой 12 °C, амплитуда минимума и максимума средних данных по месяцам составляет от $-41,6$ до 14,8 °C [18]. Перепад средних температур между холодным и теплым временами года очень велик, от 34 до -64 °C. Среднегодовые суммы осадков равны 200-250 мм, 75-80 % выпадает в теплое время года (с апреля по октябрь). Снежный покров сохраняется в течение 220-250 дней в году, высота его не велика [19]. Растительный покров территории находится в подзоне редкостойных северотаежных лиственничных лесов. Доминируют лиственничные леса, занимающие 80 % площади [20]. Почвы входят в состав Восточно-Сибирской мерзлотно-северотаежной области бореального (умеренно холодного) пояса России [12].

Объекты исследования – криоземы *Oxyaquic Turbic Cryosol* (Eutric, Loamic) и листья двух видов растений – *Betula middendorffii* T. (береза Миддендорфа) и *Duschekia fruticosa* R. (ольховник кустарниковый), представляющие наиболее распространенные для северной тайги виды кустарников.

На начальных стадиях поиска коренных месторождений алмазов на территории Западной Якутии с помощью геоботанических исследований выявлено, что лиственничные редколесья с ольховником распространены фрагментарно пятнами и приурочены к выходам кимберлитовых трубок, частично к их делювиальным шлейфам. Этими же исследованиями показано, что тип древостоя изменяется гораздо меньше, чем синузальная структура напочвенного покрова – мохово-лишайникового и кустарничкового ярусов. Из этого следует, что в условиях разреженного редколесья индикаторная роль кустарничкового яруса гораздо выше. Поэтому биоиндикацию состояния в системе почва – растительность эффективнее проводить по биогеохимическому отклику на примере листьев кустарниковых растений, выступающих в качестве индикаторов не только пликативных структур, но и изменения общего эколого-геохимического состояния субстрата [12].

Принимая во внимание источник выбросов микроэлементов в районе исследования, образцы растений отобраны в окрестностях промышленной зоны Удачинского горно-обогатительного комбината (вблизи карьеров кимберлитовых трубок «Удачная» и «Зарница», отвалов пустых пород, хвостохранилищ, обогатительной фабрики и других техногенных объектов) с учетом преобладающих в летне-осенний период ветров восточного и юго-восточного направления.

Общеизвестно, что листья растений являются одним из информативных показателей состояния окружающей среды [21]. Листовая пластина представляет собой мощный воздушный насос растений, способствует поглощению и накоплению поллютантов, поступающих с промышленными выбросами [22]. Отбор проб листьев доминирующих видов кустарников приблизительно одного средневозрастного генеративного онтогенеза проводился методом средней пробы на высоте 1,0-1,1 м от поверхности почвы с внешней стороны кроны по окружности. Листья взяты для анализа без черешков. Пробы при отборе тщательно обрабатывались для удаления пыли, упаковывались в пронумерованные пакеты из плотной бумаги. При транспортировке пробы хранились в хорошо проветриваемых контейнерах.



В тех же точках наблюдения отобраны образцы почв с глубины 0-20 см, с описанием основных морфологических характеристик. Отбор проб проводился согласно ГОСТ 17.4.3.01-2017 и ГОСТ 17.4.4.02-2017. Все точки наблюдения зафиксированы с помощью устройства глобальной системы позиционирования (GPS). Образцы растений и почв собраны тщательно и доставлены в лабораторию. Полученные образцы высушены, измельчены в порошок с помощью электрической мельницы до порошкообразного состояния и отправлены на анализ.

Образцы растений и почв подготовлены к химическому анализу согласно общепринятым методикам (ISO 11464-2015). Микроэлементы в растениях и почвах определены с помощью атомно-абсорбционного анализатора МГА-1000 ГК Люмэкс (Санкт-Петербург, Россия) после кислотного разложения и экстракции 1N HNO₃ (соотношение почвы и экстрагента 1:10) в соответствии с методикой М 03-07-2014. Экстрагент 1N HNO₃ определяет наиболее подвижные кислоторастворимые формы элементов, более прочно связанные с почвой, в отличие от H₂O и 1N HCl [23-25]. Максимальное содержание потенциально доступных металлов в растениях (потенциально доступная фракция) представляют элементы, извлекаемые 1N HNO₃ [26].

При анализе использовались стандартные эталоны почв СДПС-1 и ССК-1, пород типов габбро, карбонат и гранит; стандартные образцы листа березы марки ЛБ1 (ГСО 8923-2007), разработанные в Институте геохимии им. А.П.Виноградова СО РАН (Иркутск). Каждый анализ проводился в двух повторностях при предельной относительной погрешности $d = 15-30 \%$ с доверительной вероятностью $p = 0,95$.

Образцы почв проанализированы на pH, содержание органического вещества и грансостав. Показатель pH в суспензии почва/вода 1:5 измерялся с использованием стеклянного электрода в соответствии с ISO 10390:2005, ГОСТ 26483-85. Содержание общего органического вещества определялся сульфохромным окислением согласно ISO 14235:1998, ГОСТ 26213-2021. Гранулометрический состав почвы определялся методом седиментационного анализа с помощью пипетки [23].

Для оценки токсикологического воздействия микроэлементов на экосистему рассчитаны два показателя – индекс потенциального экологического риска RI [27] и фактор биоаккумуляции BAF [28] для двух видов растений.

Индекс потенциального экологического риска отражает опасность одного или нескольких элементов. Подход широко применяется для изучения загрязнения почвы микроэлементами в различных районах добычи полезных ископаемых и для иллюстрации потенциальных экологических рисков, связанных с общим загрязнением [29]. Уравнения расчета:

$$E_r^i = T_r^i P_i;$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i P_i = \sum_{i=1}^n T_r^i \frac{C_n}{B_n},$$

где E_r^i – потенциальный экологический фактор риска элемента i ; P_i – измеренное содержание элемента i , мг/кг; T_r^i – коэффициент реакции на токсичность элемента i , значения T_r^i для Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn и As установлены равными 5, 5, 1, 30, 5, 2, 1 и 10 соответственно [27, 30, 31].

RI имеет четыре категории риска: низкий ($RI < 150$); умеренный ($150 \leq RI < 300$); значительный ($300 \leq RI < 600$) и очень высокий ($RI > 600$) [32].

Фактор биоаккумуляции BAF отображает способность вида растений накапливать в тканях микроэлементы из окружающей среды, рассчитывается по формуле [33]:

$$BAF = \frac{C_p}{C_s},$$

где C_p и C_s – концентрации элементов в образцах растений и почвы, мг/кг.

При $BAF > 1$ фитоаккумуляция происходит, а при $BAF \leq 1$ – отсутствует, т.е. содержание элемента в растении меньше, чем в почве [34]. BAF не является константой, даже у одного и того же биологического вида на протяжении жизни эта величина может изменяться в 100-1000 раз [35]. Кроме того, по аналогии с коэффициентом биологического накопления и захвата, предложенным



Б.Б.Полыновым (1948) и в дальнейшем разработанным А.И.Перельманом (1989), введено дополнительное ранжирование: $BAF = 0-1$ – группа слабого захвата элемента, накопление отсутствует; $BAF = 1-10$ – слабое накопление и средний захват; $BAF = 10-100$ – энергичное накопление; $BAF \geq 100$ – серьезное (высокое) накопление.

Статистический анализ результатов проводился с помощью программы Statistica 13.0 и включал определение среднего и среднегеометрического значений, минимума, максимума, коэффициента вариации, стандартного отклонения. Для соответствия принципам дисперсионного анализа (аддитивность, однородность дисперсии и нормальность распределения) перед анализом данные были подвергнуты центрированному логарифмическому преобразованию (clr-преобразование), которое учитывает искажения, присущие композиционным данным [36], с применением программы CoDaPack 2.0.

Построение диаграмм и карт-схем пространственного распределения микроэлементов выполнялось с помощью программного приложения OriginPro 2024, разработанного корпорацией OriginLab.

Результаты и обсуждение

Физико-химические свойства почв. В почвенном покрове Далдынского кимберлитового поля криоземы (по классификации WRB – Cryosols) занимают 40,7 %. Мерзлотные аллювиальные (Fluvisols) являются интразональным типом и в пределах территории располагаются на 19,4 % площади [12]. Подчиненными типами являются мерзлотные дерново-карбонатные неполноразвитые (Rendzic Leptosols) и мерзлотные дерново-глеевые (Umbric Gleysols) почвы. Для зональных суглинистых почв водоразделов средняя температура за три летних месяца (июнь-август) на глубине 20 см варьируется от 0,1 до 3,6-3,9 °C [37]. Нижние горизонты почв С или CRM, как правило, находятся в мерзлом состоянии даже в летние месяцы. Содержание гигроскопической влаги колеблется от 0,98 до 3,15 % в зависимости от глубины залегания горизонтов и содержания грубоперегнойной органики. Значения pH в исследованных почвах варьируются от кислых до щелочных – 4,3-8,7 (табл.1). При этом большинство почвенных образцов характеризуется щелочной pH, их доля составляет 70 %. Порядка 15 % образцов почв обладают нейтральной pH. Содержание органического вещества достаточно высокое, что характерно для почв северных областей и связано со слабым разложением органического вещества.

Таблица 1

Физико-химические свойства исследуемых почв

Параметры	Mean	Geometric mean	Minimum	Maximum	CV	Std.Dev.
pH	7,62	7,56	4,32	9,3	0,72	0,85
Гумус, %	9,88	7,01	1,10	47,0	72,52	8,52
С _{орг} , %	5,73	4,07	0,64	27,26	24,4	4,94
Гранулометрический состав, мм						
1-0,25	1,04	0,44	0,05	2,81	1,47	1,21
0,25-0,05	7,65	6,66	3,00	12,19	18,06	4,25
0,05-0,01	23,45	22,57	15,61	30,86	47,76	6,91
0,01-0,005	10,34	10,31	9,55	11,55	0,68	0,83
0,005-0,001	15,83	15,28	11,67	23,66	24,01	4,90
< 0,001	25,21	24,12	12,7	29,74	49,9	7,06
< 0,01	51,38	51,24	46,55	57,71	18,09	4,25
> 0,01	32,14	31,43	22,14	42,59	55,8	7,47

Примечание. Mean – среднее значение; Geometric mean – среднее геометрическое значение; Minimum – минимальное значение; Maximum – максимальное значение; CV – коэффициент вариации; Std.Dev. – стандартное отклонение.

Почвы, как правило, характеризуются тяжелым грансоставом с преобладанием тонкодисперсных фракций. Фракции глины отличаются наибольшей сорбционной способностью и могут аккумулировать основную массу микроэлементов [38].



Концентрации микроэлементов в почвах и растениях. Концентрации РТЕ, определенные в почвах и листьях растений, представлены в табл.2. Средние концентрации микроэлементов (мг/кг) в почвах уменьшаются в порядке: $Mn > Ni > Zn > Cu > Co > Pb > Cr > As > Cd$. Среди них содержания Ni , Cr , Co , As , Mn превышали фоновые значения в 4,93; 2,09; 1,72; 1,69 и 1,65 раза соответственно. Коэффициент вариации отражает среднюю вариацию концентраций тяжелых металлов, при этом $CV > 35\%$ отражает высокий уровень колебаний, $15\% < CV < 35\%$ – умеренный уровень вариации, а $CV \leq 15\%$ – низкий уровень изменчивости [39, 40]. В этом исследовании CV пяти элементов (Mn , Ni , Zn , Co и Cu) составляли больше 35 %, что указывает на высокие колебания значений. Cr характеризуется средней вариацией, а Pb , Cd и As – низкой.

Распределения средних концентраций микроэлементов в двух видах растений практически одинаковы и располагаются по убыванию в следующем порядке: $Mn > Zn > Cr > Ni > Cu > Pb > As > Co > Cd$, за исключением Zn , который в листьях *Duschekia fruticosa* R. был ниже предела обнаружения.

В листьях *Betula middendorffii* T. концентрации элементов Ni , Mn , Cd , Cr и Zn превышали значения в листьях *Duschekia fruticosa* R. в 1,19; 4,59; 1,43; 2,67 и 1,02 раза соответственно. Коэффициенты вариации были высокими по Mn в обоих видах листьев и по Zn для листьев *Betula middendorffii* T.

Оценка потенциального экологического риска. На основании полученных данных рассчитан индекс потенциального экологического риска E_r [27, 41], который варьировался для каждого элемента в очень широких пределах (рис.2, а): $Zn - 0,05-36,5$; $Cr - 0,22-42,9$; $As - 0,25-8,4$; $Cd - 0,78-33,6$; $Pb - 1,65-33,0$; $Co - 2,7-173,3$; $Ni - 5,0-819,0$; $Mn - 34,8-1856,0$. Средние значения E_r для исследуемых элементов располагаются в порядке $Mn > Ni > Co > Zn > Pb > Cd > Cr > As$.

Таблица 2

**Описательная статистика содержания микроэлементов в почвах и листьях растений
территории исследования, мг/кг**

Образцы	Параметры	Pb	Ni	Mn	Cd	Co	Cr	Zn	Cu	As
Почвы	Mean	2,21	15,39	311,63	0,14	4,53	1,94	12,10	8,21	0,22
	Geometric mean	1,80	3,43	199,9	0,106	2,73	0,967	9,36	6,14	0,12
	Minimum	0,33	1,00	34,76	0,03	0,53	0,11	0,05	0,82	0,03
	Maximum	6,60	163,8	1856	1,12	34,65	21,45	36,46	28,44	0,84
	Std.Dev.	1,41	40,97	415,5	0,18	6,92	4,08	6,99	6,40	0,21
	CV	< 15	> 35	> 35	< 15	> 35	15-35	> 35	> 35	< 15
	Background value*	1,79	3,12	189	0,11	2,64	0,93	9,47	5,81	0,13
<i>Betula middendorffii</i> T.	Mean	3,03	8,08	144,8	0,04	0,39	12,30	42,94	4,73	н/о
	Geometric mean	2,85	7,70	55,64	0,03	0,27	12,19	37,48	4,59	н/о
	Minimum	1,51	4,00	14,67	0,03	0,13	9,92	25,00	2,92	н/о
	Maximum	7,33	15,9	2237	0,26	2,71	15,62	97,54	8,83	н/о
	Std.Dev.	1,15	2,61	408,5	0,04	0,46	1,67	24,18	1,27	–
	CV	< 15	< 15	> 35	< 15	< 15	< 15	> 35	< 15	–
	Background value**	2,88	7,39	44,82	0,03	0,22	12,13	33,46	4,72	н/о
<i>Duschekia fruticosa</i> R.	Mean	3,09	6,81	31,5	0,03	0,15	12,08	н/о	5,16	н/о
	Geometric mean	2,98	6,63	25,71	0,03	0,14	11,98	н/о	5,08	н/о
	Minimum	2,14	3,45	9,65	0,03	0,13	9,60	н/о	4,13	н/о
	Maximum	4,58	9,02	98,9	0,05	0,44	14,49	н/о	7,04	н/о
	Std.Dev.	0,86	1,47	24,2	0,01	0,08	1,59	н/о	0,97	–
	CV	< 15	< 15	> 35	< 15	< 15	< 15	–	< 15	–
	Background value**	2,88	7,39	44,82	0,03	0,22	12,13	33,46	4,72	н/о

Примечание. * – значения фоновых концентраций для почв по [42]; ** – для растительности [12]; н/о – ниже предела обнаружения; CV – коэффициент вариации, % (< 15 – низкий, 15-35 – умеренный, > 35 – высокий уровень вариации).

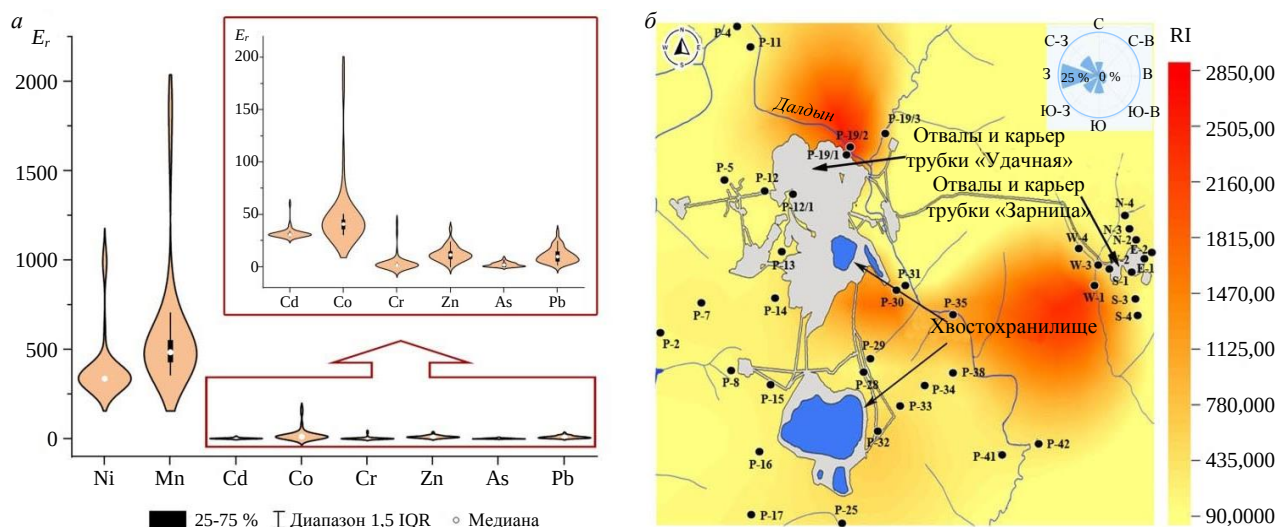


Рис.2. Бокс-диаграмма потенциального фактора экологического риска E_r (a); оценка загрязнения почвы по потенциальному экологическому риску (b)

Результаты комплексной оценки RI элементов колеблются от 92,0 до 2840,9 при среднем значении 485,8. К высокому экологическому риску относились 19,51 %, а доли значительного, умеренного и низкого экологического риска составили 21,95; 53,66 и 4,88 % соответственно. Это указывает на то, что большая часть территории исследования находится на уровне умеренного экологического риска или выше, а Mn и Ni являются его основными факторами (рис.2, б).

Наиболее высокие экологические риски по значению RI зафиксированы в зоне воздействия отвалов пустых пород на отдалении от 50 до 100 м в сторону водотоков – P-19/2 в зоне воздействия отвалов карьера трубки «Удачная» со сносом в сторону р. Далдын и S-2, отвалы карьера трубки «Зарница» с уклоном в сторону ручья Дяха. Определяемый «шлейф» является результатом как механического движения по склону в сторону водотоков, так и ветрового сноса в западном и северо-западном направлении, согласно розе ветров, от отвалов и бортов карьеров трубок «Удачная» и «Зарница».

Фактор биоаккумуляции. Северотаежные леса в бассейне р. Далдын состоят практически из единственной древесной породы *Larix gmelinii*. При этом подлесок в лиственничных рединах или чисто кустарниковые заросли образованы *Betula middendorffii* T., *Duschekia fruticosa* R. и различными видами ив. Сомкнутость древостоя 0,3 и выше, поэтому роль кустарникового яруса в северотаежных ландшафтах очень велика. В качестве объектов индикации BAF выбраны наиболее распространенные на территории кустарники *Betula middendorffii* T. и *Duschekia fruticosa* R. Для понимания процесса биоконцентрации в системе почва – растение BAF рассчитан для каждого участка обследования (табл.3). Средние значения BAF располагались в следующем порядке для березы: $Cr > Zn > Ni > Mn > Pb > Cu > Cd > Co$; для ольховника – $Cr > Zn > Ni > Pb > Cu > Mn > Cd > Co$. Разница заключается лишь в меньшем содержании Mn в листьях ольховника. Независимо от вида растения, Cr обладает наиболее высоким потенциалом фитопоглощения, затем следуют Zn и Ni. Доля поглощенных элементов с $BAF > 1$ в исследуемых видах растений составила: Zn (97 %) > Cr (94 %) > Ni (86 %) > Pb (75 %) > Cu (39 %) > Mn (8 %) в листьях *Betula middendorffii* T.; Zn (100 %) > Cr (100 %) > Ni (93 %) > Pb (64 %) > Cu (43 %) в листьях *Duschekia fruticosa* R.

Отмечено отсутствие аккумуляции Cd и Co в листьях березы; Cd, Co и Mn в листьях ольховника. Наиболее высокое фитопоглощение в листьях березы отмечено в точках P-11 для Pb, Mn, Cr и Cu; P-32 для Ni; P-15 для Zn. В листьях ольховника максимальное фитопоглощение обнаружено в исследуемых точках P-17 для Pb, P-29 для Ni, P-12 для Cr, P-16 для Zn, S-4 для Cu. Установлено, что наибольшее количество микроэлементов аккумулируется растениями в точке наблюдения P-11, расположенной на отработанном карьере по добыче строительных материалов для отсыпки дороги, где на поверхности формируются Technosol на базитовых породах.



Таблица 3

BAF в листьях растений исследуемой территории

Вид растительности	Параметры	Pb	Ni	Mn	Cd	Co	Cr	Zn	Cu	As
<i>Betula middendorffii</i> T. (n = 36)	Mean	2,07	3,26	2,32	0,36	0,16	18,85	10,15	1,02	–
	Geometric mean	1,62	2,25	0,27	0,29	0,09	12,30	3,77	0,76	–
	Minimum	0,39	0,07	0,02	0,06	0,01	0,52	0,99	0,18	–
	Maximum	9,64	8,40	64,36	1,07	0,78	135,6	210,0	4,27	–
	Std.Dev.	1,76	1,91	10,75	0,25	0,19	22,89	34,60	0,84	–
<i>Duschekia fruticosa</i> R. (n = 14)	Mean	1,86	3,24	0,26	0,25	0,08	15,97	3,43	1,21	–
	Geometric mean	1,58	2,68	0,18	0,23	0,07	15,01	2,71	0,95	–
	Minimum	0,65	0,55	0,02	0,06	0,03	8,05	1,05	0,24	–
	Maximum	3,23	8,59	0,97	0,41	0,24	26,66	10,55	2,90	–
	Std.Dev.	0,98	2,05	0,24	0,08	0,06	5,92	2,83	0,81	–

Проявления кимберлитового магматизма территории исследований отображаются в геохимическом поле на региональном древнем и современном ландшафтном фонах в виде специфических первичных и вторичных биогеохимических ореолов широкого спектра элементов, представляя своего рода природную геохимическую аномалию.

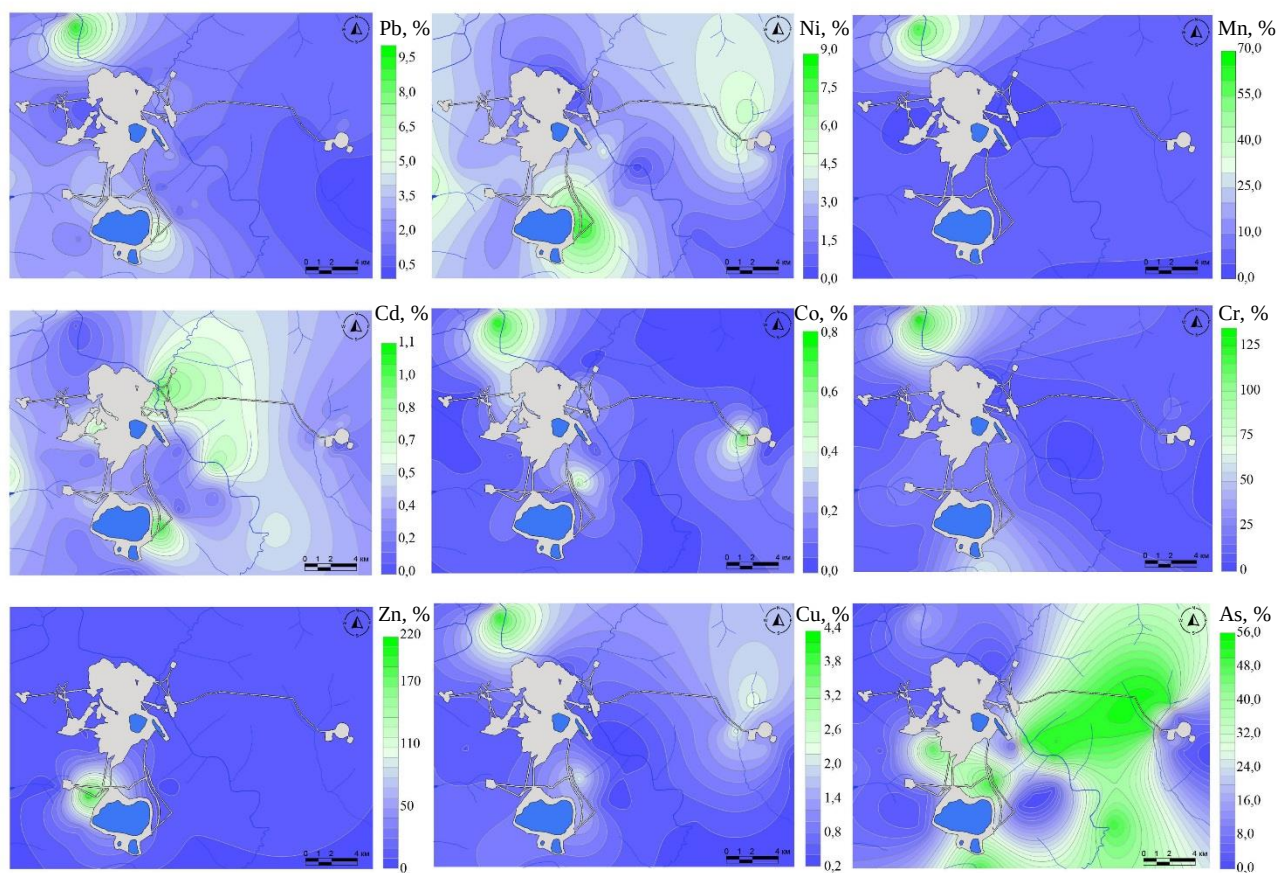
Основные элементы-индикаторы – Cr, Ni, Co, Zr, Li, Cu, Ba, Nb, Ti, Sr, Ga, Sc, V и Mn [42-44]. Для алмазонасных разновидностей кимберлитов типоморфными являются Cr и Ni. Соответственно аккумуляция этих элементов в почвах и растительности на территории кимберлитовых полей вполне закономерна, а также объясняет геохимическую унаследованность Cr, Ni, Mn и Cu как *Betula middendorffii* T., так и *Duschekia fruticosa* R.

Анализ пространственного распределения BAF для двух видов кустарников показал разные результаты. В северотаежных ландшафтах *Betula middendorffii* T. распространена повсеместно на терригенно-карбонатных образованиях; горизонтах пятнистых, полосчатых и кальцитизированных доломитов; долеритах; туфах; туфобрекчиях и туфогенных образованиях. Ранними исследованиями [12] доказано, что *Betula middendorffii* T. способна аккумулировать большее количество микроэлементов и обладает большим потенциалом к фитоэкстракции. Наиболее высокими значениями BAF отличаются участки в зоне воздействия объектов добычи – карьеры и отвалы пустых пород кимберлитовых трубок «Удачная» и «Зарница», а также обогащения – хвостохранилища, подземные полигоны закачки высокоминерализованных рассолов (рис.3). *Betula middendorffii* T. характеризуется высокой резистентностью к содержаниям микроэлементов в почвах, сохраняя при этом гомеостаз онтогенеза.

В целом пространственный анализ BAF подтвердил выводы об отсутствии биаккумуляции Cd, Co и Mn в листьях березы как в областях формирования рудовмещающих пород, так и на периферии кимберлитовых трубок «Удачная» и «Зарница». Кроме того, значения BAF по этим элементам не увеличиваются при техногенной трансформации, несмотря на увеличение концентрации Cd, Co и Mn в техносолях. Фитоаккумуляцию Cr, As и Zn можно объяснить увеличением концентрации этих элементов в пределах границ техногенной аномалии в почвах промышленной площадки ГОК.

Известно, что микроэлементы влияют на многие аспекты метаболизма клетки. Катионные формы микроэлементов могут связываться с карбоксильными, гидроксильными, фосфатными и аминокислотными группами, вызывая при этом изменения тех элементов, в состав которых входят эти группировки, будь то нуклеотиды, белки, коферменты, фосфолипиды. В результате подавления ферментных систем нарушаются процессы дыхания и синтеза белка, функции цитоплазматической мембраны [45, 46]. Достигшие листьев металлы аккумулируются в вакуолях эпидермиса [47, 48] и его производных – трихомах и железках [49], которые служат для выведения металлов из организма растений.

Выработанный механизм может быть полезен для объяснения принципов лучшей адаптации растений к биотическим и абиотическим вызовам. Весьма контрастные реакции растений, проявляющиеся на транскрипционном и трансляционном уровнях, зависят от концентрации элементов

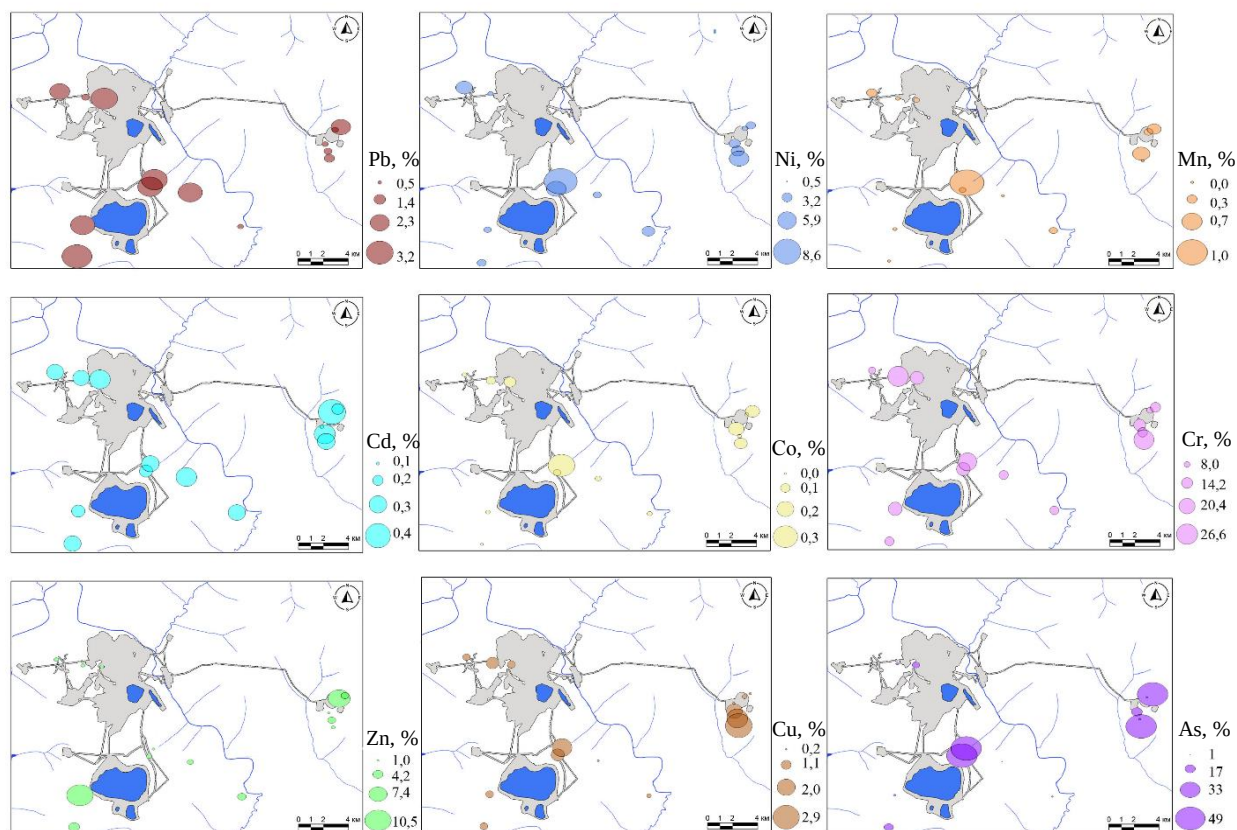
Рис.3. Фактор биоаккумуляции в листьях *Betula middendorffii* T.

в почве и хорошо согласуются с концепцией гормезиса, адаптивного механизма, который обеспечивает устойчивость растений к вызовам окружающей среды, в том числе высоким концентрациям элементов в почвах, вызванным телескопированием проявления кимберлитовой аномальности. К проявлениям адаптационных механизмов можно отнести толерантное отношение березы к высоким концентрациям хрома, мышьяка и цинка.

Лиственный лес с *Duschekia fruticosa* R. формируются пятнами в верхней части склонов, приурочены к выходам кимберлитов и частично к их делювиальным шлейфам. Кимберлитовые тела прорывают доломитовый горизонт, и в местах их выхода создаются более благоприятные условия увлажнения и дренажа, чем на вмещающих карбонатных отложениях. Лиственный лес с *Duschekia fruticosa* R., приуроченные к кимберлитовым телам, резко выделяются на фоне лиственных лишайниковых редколесий, связанных с карбонатными породами [50]. В почвах это отражается и на элементном составе с преобладанием когерентных кимберлитам ассоциаций. Карьер трубки «Удачная» разрабатывается с 1982 г., а трубки «Зарница» с 1998 г., и основные лесные массивы с *Duschekia fruticosa* R. уже погребены под техногенными ландшафтами. Сохранившиеся фрагментарно участки окаймляют периферию кимберлитового поля (рис.4). Значения ВАФ сильно варьируются с максимумами, приуроченными к импактным зонам техногенного воздействия.

В отличие от *Betula middendorffii* T., в листьях *Duschekia fruticosa* R. не отмечается фитопоглощение Mn, Cd и Co, несмотря на высокие концентрации в почвах. Высокими значениями ВАФ характеризуются участки около карьеров и хвостохранилищ с высоким фитопоглощением элементов, когерентных кимберлитам Cr и Ni.

Активное накопление элементов, в частности Ni, Cr и Cu, связывают с высоким содержанием таких низкомолекулярных кислот, как яблочная и малоновая, в растениях, произрастающих на почвах, сформированных на кислых или ультраосновных породах [51]. Кимберлиты и долериты

Рис.4. Фактор биоаккумуляции в листьях *Duschekia fruticosa* R.

Далдынского кимберлитового поля – это как раз магматические ультраосновные породы экстрезивной фации. Почвы на этих участках характеризуются кислой или слабокислой pH. Поэтому максимальная аккумуляция Ni, Cr и Cu в листьях *Duschekia fruticosa* R. вполне закономерна.

Неустойчивые виды растений обладают ограниченной способностью выводить ионы металлов в тонопласт и потому накапливают микроэлементы в виде малоподвижных соединений непосредственно в цитоплазме [52]. У лиственных кустарников значительная часть элементов аккумулируется в хлоропласте, обеспечивая тем самым устойчивость онтогенеза в условиях высоких концентраций микроэлементов в почвах и породах, что и наблюдается на примере *Duschekia fruticosa* R. *Betula middendorffii* T. толерантна к вариациям почв и пород, поэтому распространена повсеместно

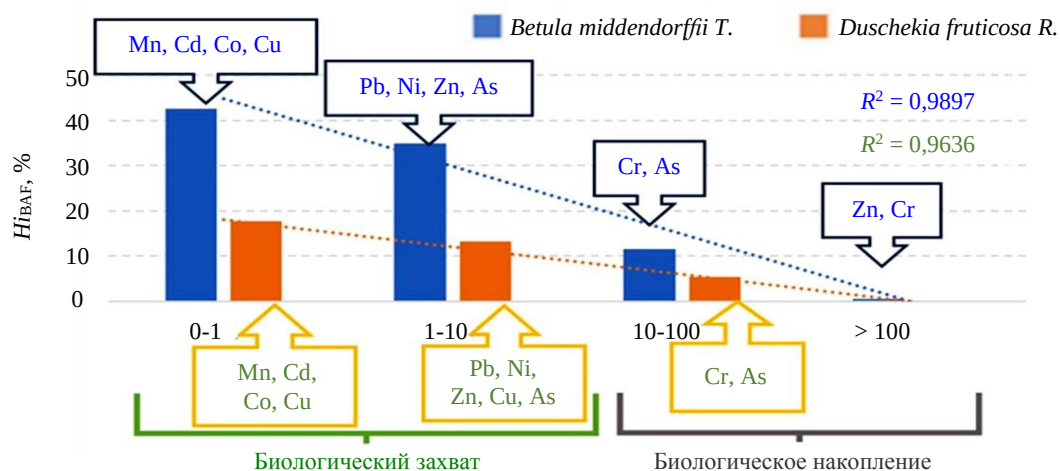


Рис.5. Уровень биологического захвата и накопления микроэлементов в системе почва – растение на территории промышленной площадки Удачинского ГОК



в северотаежных ландшафтах, но проявляет наиболее выраженный отклик на воздействие избыточных концентраций микроэлементов при техногенном воздействии. Анализ значений BAF в каждой точке наблюдения в целом подтверждает выявленные закономерности (рис.5).

Таким образом, в листьях *Betula middendorffii* T. и *Duschekia fruticosa* R. отсутствием накопления и слабым биологическим захватом характеризуются Mn, Cd, Co и частично Cu. На уровне слабого накопления исследуемые виды различаются в вариациях аккумуляции Ni и Cu. Энергичное накопление встречается в 5,4 и 11,6 % случаев по хромум и мышьяку в листьях *Duschekia fruticosa* R. и *Betula middendorffii* T. соответственно. Кроме того, в двух точках, расположенных у хвостохранилища, зафиксировано сильное накопление Zn и Cr в листьях *Betula middendorffii* T.

Резюмируя проведенные исследования, необходимо отметить, что сложившаяся на территории геохимическая обстановка в системе почва – растение является следствием природных и техногенных условий, отличающих признаки пород Далдынского кимберлитового поля и последствия этапов разработки алмазоносных месторождений.

Заключение

Создание современной биогеохимической картины любой территории, где разрабатываются месторождения полезных ископаемых, определяется особенностями горных пород и связанной с ними ландшафтно-геохимической обстановкой, но во многом ситуация меняется от характера, уровня и этапов промышленного освоения. На территории Далдынского кимберлитового поля в Западной Якутии промышленно освоены и разрабатываются два крупных коренных месторождения алмазов – кимберлитовые трубки «Удачная» и «Зарница». Создано современное горнодобывающее предприятие с разветвленной инфраструктурой, охватывающей все этапы разработки месторождений. В трансформации ландшафтов сформированы огромные площади техногенно-преобразованных территорий со своей геохимической спецификой. Оценка потенциального экологического риска выявила, что порядка 58 % территории исследований относятся к низкому (4,8 %) и умеренному (53,6 %) риску загрязнения почв. В категорию умеренного загрязнения почв вошли ареалы формирования в почвах природной геохимической аномалии, вызванной внедрением траппов и кимберлитов. Участки со значительным (21,9 %) и высоким (19,5 %) потенциальным экологическим риском приурочены к импактным зонам воздействия карьеров и отвалов пустых пород. Высокие концентрации Mn и Ni, а также разнообразие их содержаний в почвах являются основными факторами экологического риска.

Индикаторная функция кустарникового яруса наглядно проявляется при анализе геологического строения и рельефа территории. Построенные схемы пространственной биоиндикации отображают устойчивость онтогенеза *Betula middendorffii* T. и *Duschekia fruticosa* R. к высоким вариациям содержания в почвах микроэлементов, являющихся следствием природной и техногенной аномальности, как результат совокупного воздействия геологической среды и техногенного фактора.

Анализ коэффициента биоаккумуляции в системе почва – растение на территории горно-обогатительного комбината выявил, что кустарники *Betula middendorffii* T. и *Duschekia fruticosa* R. проявляют резистентность к высоким концентрациям когерентных кимберлитов и долеритов элементов Cr, Ni, Co, Cu, Mn, Zn, обеспечивающим детоксикацию ионов металлов и устойчивость к стрессу. Проведенные исследования позволяют рекомендовать использовать листья *Betula middendorffii* T. для геоэкологического мониторинга изменения ситуации на территориях промышленного освоения в условиях северотаежных ландшафтов. В качестве объектов биоиндикации при геолого-геохимических поисковых работах можно опираться на содержание микроэлементов в листьях *Duschekia fruticosa* R.

Сведения о физиологических и биохимических ответных реакциях организмов, в том числе и высших сосудистых растений, весьма противоречивы и недостаточны, а исследований физиологии растений, их развития в областях формирования биогеохимических провинций, связанных с проявлением магматизма пород и тектонических нарушений, крайне мало, и сосредоточены они прежде всего на агротерриториях. Тем не менее, подобные исследования важны для понимания процессов детоксикации ионов металлов из организма растений, биоаккумуляции потенциально токсичных элементов, а также для практической реализации технологии фиторемедиации в реальных условиях.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Martínez-Carlos J., Martínez-Martínez S., Faz A. et al.* Are the soils and vegetation of a forest close to tailings ponds affected by metals and arsenic? // *Environmental Geochemistry and Health*. 2021. Vol. 44. Iss. 1. P. 15-28. DOI: [10.1007/s10653-021-01035-5](https://doi.org/10.1007/s10653-021-01035-5)
2. *Roca-Perez L., Boluda R., Rodríguez-Martín J.A. et al.* Potentially harmful elements pollute soil and vegetation around the Atrevida mine (Tarragona, NE Spain) // *Environmental Geochemistry and Health*. 2023. Vol. 45. Iss. 12. P. 9215-9230. DOI: [10.1007/s10653-023-01591-y](https://doi.org/10.1007/s10653-023-01591-y)
3. *Радостева Э.Р., Кулагин А.Ю.* Биоаккумуляция металлов в органах древесных растений в условиях полиметаллических отвалов Учалинского горно-обогатительного комбината (Республика Башкортостан) // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13. № 5 (2). С. 200-202.
4. *Ning Li, Yan Li, Genmei Wang et al.* The sources risk assessment combined with APCS/MLR model for potentially toxic elements in farmland of a first-tier city, China // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. Iss. 33. P. 50717-50726. DOI: [10.1007/s11356-022-19325-5](https://doi.org/10.1007/s11356-022-19325-5)
5. *Lotfi S., Chakit M., Belghyti D.* Groundwater Quality and Pollution Index for Heavy Metals in Saïs Plain, Morocco // *Journal of Health & Pollution*. 2020. Vol. 10. Iss. 26. № 200603. DOI: [10.5696/2156-9614-10.26.200603](https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.26.200603)
6. *Mulenga C., Phiri D., Ortega-Rodríguez D.R., Meincken M.* Bioaccumulation of potentially toxic elements by indigenous and exotic trees growing around a copper leaching plant in Mufulira, Zambia // *Environmental Systems Research*. 2023. Vol. 12. № 26. DOI: [10.1186/s40068-023-00310-x](https://doi.org/10.1186/s40068-023-00310-x)
7. *Sabir M., Baltrėnaitė-Gedienė E., Ditta A. et al.* Bioaccumulation of Heavy Metals in a Soil-Plant System from an Open Dumpsite and the Associated Health Risks through Multiple Routes // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Iss. 20. № 13223. DOI: [10.3390/su142013223](https://doi.org/10.3390/su142013223)
8. *Петухов А.С., Кремлева Т.А., Петухова Г.А.* Биоаккумуляция тяжелых металлов овсом из техногенно загрязненных почв Тюмени // *Агрохимический вестник*. 2021. № 1. С. 73-80. DOI: [10.24412/1029-2551-2021-1-013](https://doi.org/10.24412/1029-2551-2021-1-013)
9. *Proshad R., Kormoker T., Islam Md.S., Chandra K.* Potential health risk of heavy metals via consumption of rice and vegetables grown in the industrial areas of Bangladesh // *Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal*. 2020. Vol. 26. Iss. 4. P. 921-943. DOI: [10.1080/10807039.2018.1546114](https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1546114)
10. *Hanyan Zhang, Xingzhong Yuan, Ting Xiong et al.* Bioremediation of co-contaminated soil with heavy metals and pesticides: Influence factors, mechanisms and evaluation methods // *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 398. № 125657. DOI: [10.1016/j.cej.2020.125657](https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125657)
11. *Ryzhenko N., El Amrani A., Giltrap M. et al.* Bioaccumulation of As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn in *Ambrosia artemisiifolia* L. in the polluted area by enterprise for the production and processing of batteries // *Annals of Civil and Environmental Engineering*. 2022. Vol. 6. P. 26-30. DOI: [10.29328/journal.acee.1001036](https://doi.org/10.29328/journal.acee.1001036)
12. *Gololobova A., Legostaeva Y.* An Assessment of the Impact of the Mining Industry on Soil and Plant Contamination by Potentially Toxic Elements in Boreal Forests // *Forests*. 2023. Vol. 14. Iss. 8. № 1641. DOI: [10.3390/f14081641](https://doi.org/10.3390/f14081641)
13. *Зинчук Н.Н., Коптиль В.И.* Об особенностях алмазов из кимберлитов и древних осадочных толщ (на примере центрально-сибирской алмазоносной субпровинции) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2018. № 4. С. 28-38. DOI: [10.17308/geology.2018.4/1645](https://doi.org/10.17308/geology.2018.4/1645)
14. *Зинчук Н.Н., Бардухинов Л.Д.* Сравнительные особенности алмазов из кимберлитовых месторождений северной части Сибирской платформы // *Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова. Серия «Науки о Земле»*. 2024. № 1 (33). С. 11-30. DOI: [10.25587/2587-8751-2024-1-11-30](https://doi.org/10.25587/2587-8751-2024-1-11-30)
15. *Легостаева Я., Козлова И., Попов В., Ноев Д.* Геоэкологическая ситуация в районе Айхальского ГОКа // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 8-10 апреля 2020, Якутск, Россия. Якутск: Издательский дом Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, 2020. С. 482-485.*
16. *Янников А.М.* Гидрогеология Далдынского кимберлитового поля: Республика Саха (Якутия). Мирный: АПРОСА, 2023. 305 с.
17. *Атрощенко Ф.Г., Филин Р.А.* Гидрогеологические проблемы на месторождениях алмазов Якутии // *Записки Горного института*. 2003. Т. 153. С. 123-125.
18. *Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Гладков А.С. и др.* Рассолы глубоких горизонтов кимберлитовой трубки Удачная // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 4. С. 1235-1253. DOI: [10.5800/GT-2018-9-4-0393](https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0393)
19. *Легостаева Я.Б., Попов В.Ф., Ксенофонтова М.И.* Гидрогеологические условия и геоэкологическая ситуация на территории подземных техногенных хранилищ при утилизации дренажных рассолов Удачинского горнообогатительного комбината // *Отечественная геология*. 2018. № 5. С. 93-102. DOI: [10.24411/0869-7175-2018-10021](https://doi.org/10.24411/0869-7175-2018-10021)
20. *Миронова С.И.* Растительные сукцессии на природно-техногенных ландшафтах Западной Якутии и их оптимизация. М.: Издательский дом Академия Естествознания, 2016. 140 с.
21. *Петрунина Н.С., Ермаков В.В.* Современные аспекты геохимической экологии растений // *Проблемы биогеохимии и геохимической экологии*. 2006. Т. 1. № 1. С. 147-155.
22. *Неверова О.А., Колмогорова Е.Ю.* Древесные растения и урбанизированная среда. Экологические и биотехнологические аспекты. Новосибирск: Наука, 2003. 222 с.
23. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы в системе почва-растение. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1991. 151 с.
24. *Ладонин Д.В.* Соединения тяжелых металлов в почвах – проблемы и методы изучения // *Почвоведение*. 2002. № 6. С. 682-692.
25. *Сысо А.И.* Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 274 с.
26. *Šmejkalová M., Mikanová O., Borůvka L.* Effects of heavy metal concentrations on biological activity of soil microorganisms // *Plant, Soil and Environment*. 2003. Vol. 49. Iss. 7. P. 321-326. DOI: [10.17221/4131-PSE](https://doi.org/10.17221/4131-PSE)
27. *Hakanson L.* An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach // *Water Research*. 2020. Vol. 14. Iss. 8. P. 975-1001. DOI: [10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)



28. Sajad M.A., Khan M.S., Bahadur S. et al. Nickel Phytoremediation Potential of Some Plant Species of the Lower Dir, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan // *Limnological Review*. 2020. Vol. 20. Iss. 1. P. 13-22. DOI: [10.2478/limre-2020-0002](https://doi.org/10.2478/limre-2020-0002)
29. Fuling Zhang, Guangchao Cao, Shengkui Cao et al. Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metal Content in the Soil of a Plateau Alpine Mining Area in the Qilian Mountains // *Land*. 2023. Vol. 12. Iss. 9. № 1727. DOI: [10.3390/land12091727](https://doi.org/10.3390/land12091727)
30. Shicheng Xie, Tian Lan, An Xing et al. Spatial distribution and ecological risk of heavy metals and their source apportionment in soils from a typical mining area, Inner Mongolia, China // *Journal of Arid Land*. 2023. Vol. 15. Iss. 10. P. 1196-1215. DOI: [10.1007/s40333-023-0109-1](https://doi.org/10.1007/s40333-023-0109-1)
31. Zhaotong Fang, Chunyu Hua, Jingyu He et al. Pollution assessment and source apportionment of heavy metal(loid)s in soil of Huangshui River basin, Qinghai Province, China // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2023. Vol. 37. Iss. 12. P. 4843-4855. DOI: [10.1007/s00477-023-02544-8](https://doi.org/10.1007/s00477-023-02544-8)
32. Kilavi P.K., Kaniu M.I., Patel J.P., Usman I.T. Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Associated Risks in the Environs Adjacent to a Heavy Mineral Sand Mine on the South Coast of Kenya // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2023. Vol. 234. Iss. 12. № 748. DOI: [10.1007/s11270-023-06751-5](https://doi.org/10.1007/s11270-023-06751-5)
33. Naz R., Khan M.S., Hafeez A. et al. Assessment of phytoremediation potential of native plant species naturally growing in a heavy metal-polluted industrial soils // *Brazilian Journal of Biology*. 2024. Vol. 84. DOI: [10.1590/1519-6984.264473](https://doi.org/10.1590/1519-6984.264473)
34. Khotimah N.N., Roziwan, Putri W.A.E. et al. Bioaccumulation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Contamination (Lead and Copper) Build Up in the Roots of *Avicennia alba* and *Excoecaria agallocha* // *Journal of Ecological Engineering*. 2024. Vol. 25. Iss. 5. P. 101-113. DOI: [10.12911/22998993/185716](https://doi.org/10.12911/22998993/185716)
35. Ramirez A., Garcia G., Werner O. et al. Implications of the Phytoremediation of Heavy Metal Contamination of Soils and Wild Plants in the Industrial Area of Haina, Dominican Republic // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 3. № 1403. DOI: [10.3390/su13031403](https://doi.org/10.3390/su13031403)
36. Pawlowsky-Glahn V., Buccianti A. *Compositional Data Analysis: Theory and Applications*. Wiley, 2011. 400 p.
37. Федоров-Давыдов Д.Г., Давыдов С.П., Давыдова А.И. и др. Термическое состояние почв Северной Якутии // *Криосфера Земли*. 2018. Т. 22. № 3. С. 52-66. DOI: [10.21782/KZ1560-7496-2018-3\(52-66\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-3(52-66))
38. Дягилева А.Г. Устойчивость к химическому загрязнению криоземов Западной Якутии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Якутск: Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, 2015. 22 с.
39. Mingshi Wang, Qiao Han, Chenlu Gui et al. Differences in the risk assessment of soil heavy metals between newly built and original parks in Jiaozuo, Henan Province, China // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 676. P. 1-10. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.03.396](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.396)
40. Abliz A., Qingdong Shi, 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*. 2022. Vol. 13. Iss. 11. № 1914. DOI: [10.3390/f13111914](https://doi.org/10.3390/f13111914)
41. Bortey-Sam N., Nakayama S.M.M., Akoto O. et al. Ecological Risk of Heavy Metals and a Metalloid in Agricultural Soils in Tarkwa, Ghana // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015. Vol. 12. Iss. 9. P. 11448-11465. DOI: [10.3390/ijerph120911448](https://doi.org/10.3390/ijerph120911448)
42. 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](https://doi.org/10.18799/24131830/2021/9/3364)
43. Ягнышев Б.С., Ягнышева Т.А., Зинчук М.Н., Легостаева Я.Б. Экология Западной Якутии (геохимия геосистем: состояние и проблемы). Якутск: Изд-во Якутского научного центра СО РАН, 2005. 430 с.
44. Зинчук Н.Н. О геохимических особенностях разновозрастных образований алмазоперспективных территорий // *Отечественная геология*. 2023. Т. 1. С. 46-69. DOI: [10.47765/0869-7175-2023-10004](https://doi.org/10.47765/0869-7175-2023-10004)
45. Эрлих Х. Жизнь микробов в присутствии тяжелых металлов, мышьяка и сурьмы. М.: Мир, 1981. С. 440-469.
46. Эльбекьян К.С. Экологическая и экспериментальная характеристика токсичности тяжелых металлов и оценка возможного антиоксидантного механизма: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Ставрополь: Ставропольская государственная медицинская академия Федерального агентства по здравоохранению и социальному развитию, 2008. 35 с.
47. Ortiz D.F., Krepler L., Speiser D.M. Heavy metal tolerance in the fission yeast requires an ATP-binding cassette-type vacuolar membrane transporter // *The EMBO Journal*. 1992. Vol. 11. Iss. 10. P. 3491-3499. DOI: [10.1002/j.1460-2075.1992.tb05431.x](https://doi.org/10.1002/j.1460-2075.1992.tb05431.x)
48. Vatamaniuk O.K., Mari S., Yu-Ping Lu, Rea P.A. Mechanism of Heavy Metal Ion Activation of Phytochelatin (PC) Synthase: blocked thiols are sufficient for pc synthase-catalyzed transpeptidation of glutathione and related thiol peptides // *The Journal of Biological Chemistry*. 2000. Vol. 275. № 40. P. 31451-31459. DOI: [10.1074/jbc.M002997200](https://doi.org/10.1074/jbc.M002997200)
49. Choi Y.-E., Harada E., Wada M. et al. Detoxification of cadmium in tobacco plants: formation and active excretion of crystals containing cadmium and calcium through trichomes // *Planta*. 2001. Vol. 213. Iss. 1. P. 45-50. DOI: [10.1007/s004250000487](https://doi.org/10.1007/s004250000487)
50. Лукичева А.Н. Возможности использования крупномасштабных геоботанических карт при геологическом картировании (на примере северо-востока Сибирской платформы) // *Геоботаническое картографирование*. 1965. С. 32-39.
51. Ермаков В.В., Тютиков С.Ф., Сафонов В.А. Биогеохимическая индикация микроэлементов. М.: Российская академия наук, 2018. 386 с.
52. Атабаева С.Д. Некоторые механизмы детоксикации тяжелых металлов в растениях // *Биотехнология. Теория и практика*. 2006. № 2. С. 32-43.

Авторы: Анна Григорьевна Гололобова, канд. биол. наук, старший научный сотрудник (Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия), nuta0687@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0813-5404>, Яна Борисовна Легостаева, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник (Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-1556-9182>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.