

УДК 631.4:504.5:622.7

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ ФОНОВЫХ И ИМПАКТНЫХ ЗОН НА УЧАСТКАХ АЛМАЗОДОБЫЧИ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Легостаева Яна Борисовна<sup>1</sup>,  
ylego@mail.ru

Гололобова Анна Григорьевна<sup>2</sup>,  
nuta0687@mail.ru

<sup>1</sup> Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,  
Россия, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 39.

<sup>2</sup> Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,  
Россия, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 43.

**Актуальность** исследования обусловлена интенсивным развитием горнодобывающей промышленности на территории Западной Якутии в последний 70-летний период. В результате чего происходит загрязнение окружающей среды химическими веществами в условиях распространения многолетнемерзлых пород. В первую очередь это загрязнение почв поллютантами, которые образуются в техногенных отложениях при извлечении горных масс из недр земли при отработке коренных месторождений алмазов и остаются в почве в течение многих лет даже после ремедиации техногенно-трансформированных территорий. Настоящее исследование позволяет выявить геохимическую специфику мерзлотных почв с разной геолого-геохимической обстановкой и ее трансформацию при техногенном воздействии.

**Цель:** изучение элементного состава и его вертикального распределения в профиле мерзлотных почв Северо-Западной Якутии, подверженных техногенному воздействию при проведении алмазодобывочных работ.

**Объекты:** криоземы – мерзлотные почвы северо-таежных ландшафтов Северо-Западной Якутии.

**Объекты и методы.** Статья представляет результаты выполненных работ за период с 1994 по 2019 гг. на территории Далдынского кимберлитового поля, где разрабатываются открытым способом кимберлитовые трубки Удачная и Зарница и где находится Удачинский горно-обогатительный комбинат АК «Алроса» (ПАО). Объектом изучения являлись мерзлотные почвы северо-таежных ландшафтов Северо-Западной Якутии. Почвы данного района отражают общие закономерности формирования почвенного покрова на территории исследования и входят в состав Восточно-Сибирской мерзлотно-северотаежной области бореального пояса почв России. В ходе полевых наблюдений был применен профилейный подход, предполагающий сбор образцов из почвенных генетических горизонтов до границы сезонно-талого слоя. Определены знаковые содержания 23 химических элементов методом спектрального полуколичественного анализа.

**Результаты** геохимических исследований мерзлотных почв приведены с учетом геохимии почвообразующих пород Далдыно-Алакитского горнопромышленного района. Для выявления геохимических характеристик рассчитаны коэффициенты концентрации (K<sub>c</sub>) и коэффициенты накопления (K<sub>0</sub>–K<sub>3</sub>) исследуемых элементов в системе породы–почвы. Построены накопительные ряды, отражающие геохимическую специфику доминирующих типов почв территории исследования. Каждый из исследованных типов почв характеризуется своеобразием микроэлементного спектра. Полиэлементные ассоциации создаются в результате геохимического влияния почвообразующего субстрата. Выявлено, что территория Далдыно-Алакитского района отличается повышенными концентрациями в почвах Cr, Ni, Co, V, Cu, Pb, Li, Sr.

### Ключевые слова:

Криоземы, региональный фон, природная геохимическая аномалия, кимберлитовые трубки, микроэлементы, горно-обогатительный комбинат.

### Введение

В последнее время серьезной экологической проблемой стало интенсивное развитие промышленности, представляющее собой наиболее мощный источник загрязнения биосферы вредными веществами [1, 2]. В сложной структуре биосферных миграционных циклов химических элементов особое место занимает почва [3–5]. Почвы служат основным поглотителем тяжелых металлов в наземных экосистемах [6], а загрязнение почв тяжелыми металлами является глобальной проблемой [7]. Почвы депонируют в себе разные вещества, в том числе тяжелые металлы, которые в высоких концентрациях являются токсичными для живых организмов, а также могут привести к загрязнению поверхностных и подземных водных систем [8, 9]. Характеристики загрязнения почв тяжелыми металлами и эко-

логические риски являются основой оценки качества окружающей среды почв [10].

Добыча полезных ископаемых открытым способом является одним из мощных видов техногенеза. Его воздействие на окружающую среду ежегодно возрастает и захватывает все большие территории [11, 12]. В северо-западной части Республики Саха (Якутия), где ведутся интенсивные работы по открытой добыче алмазов, за последние десятилетия произошли значительные нарушения природных ландшафтов. Огромные площади заняты карьерами, отвалами пустых пород, отходами первичного обогащения руд – хвостохранилищами и другими источниками техногенных выбросов и аэрорассева, при которых различные вещества, оседая на поверхность почвы, трансформируют ее элементный состав.

В природных ландшафтах зависимость микроэлементного состава почв от особенностей состава подстилающих пород генетически закономерна и общеизвестна. В почвах с маломощным гомогенным почвенным профилем содержание микроэлементов напрямую зависит от состава и свойств подстилающих пород, а распределение микроэлементов в почвенном профиле, процессы аккумуляции и выноса являются следствием активации почвообразования и криотурбационных процессов для районов криолитозоны. Поэтому в северных регионах эколого-геохимическое состояние природного почвенного покрова – это отражение комплекса факторов, наиболее важные из которых – сложная литологическая обстановка и близкое к поверхности залегание многолетнемерзлых пород.

Имеется довольно много российских и зарубежных исследований, посвященных изучению микроэлементного состава почв в зонах воздействия различных промышленных предприятий [13–21]. Однако в почвах мерзлотных областей содержание, распределение и в целом поведение элементов значительно различаются, но при этом являются малоизученными.

Для исследуемой территории Далдыно-Алаkitского горнопромышленного района Якутии с наличием гетерогенных магматических образований изучение проблемы геохимических закономерностей в природной системе «породы–почвы» представляет особый интерес. Данное исследование позволит выявить маркеры природной геохимической аномальности почв, сформированных под влиянием кимберлитового магматизма и химизма агрессивных высокоминерализованных рассолов верхне- и среднекембрийского комплекса и воздействия техногенных ландшафтов импактной зоны промышленной площадки Удачинского горно-обогатительного комбината.

#### Объекты и методы исследования

Почвенно-геохимические исследования проведены в период с 1994 по 2019 гг. на территории Далдынского кимберлитового поля, находящегося в центральной части Далдыно-Алаkitского горнопромышленного района на Северо-западе Якутии. Фактографические материалы отражают систему точек наблюдений, где проходило комплексное опробование пород, почв и грунтов (рис. 1).

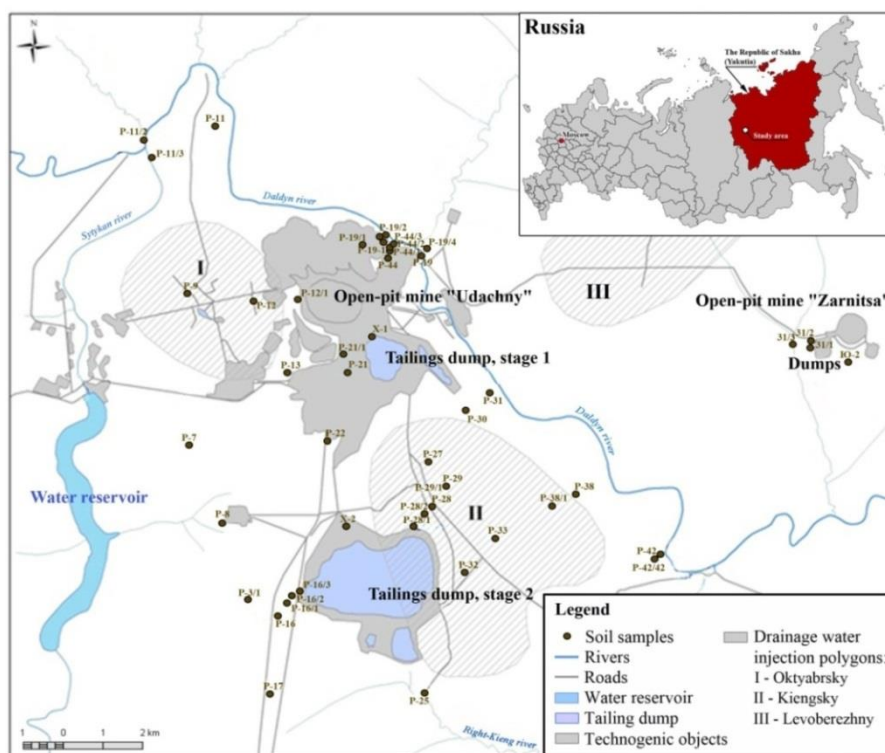


Рис. 1. Карта фактического опробования почв на территории Удачинского горно-обогатительного комбината  
Fig. 1. Map of the factual soil sampling on the territory of the Udachninsky mining and processing division (UMPD)

В ходе полевых наблюдений был применен профильный подход, предполагающий сбор образцов со всех почвенных генетических горизонтов до границы сезонно-талого слоя. Такой подход представляется более предпочтительным при изучении поведения химических элементов в почвах криогенных ландшафтов, где вертикальные профили и распределение почвенного вещества сильно зависит от уровня проявления мерзлотных процессов в ландшафте. С целью

классификации почв закладывался почвенный разрез с погоризонтным отбором проб на всю глубину оттаивания. Техногенно-трансформированные территории исследовались двумя методами: транссекты (удаление от источника воздействия на 1–5–10–20–50–100 м) и ключевые участки (закладка разреза на площадках с разной степенью зарастания). Образцы отбирались по слоям из каждых 10 см на глубину в среднем до 40–80 см.

Всего на территории исследования за весь период было отобрано 2664 почвенных образцов. Образцы почвы были высушены на воздухе при комнатной температуре и просеяны через сито диаметром 1 мм. Общее валовое содержание микроэлементов в почвах определено методом эмиссионного спектрального анализа в сертифицированной Центральной геолого-аналитической лаборатории АО Якутскгеология (Аттестат соответствия №СДС «УКАРГЕО»RU 0027.16, действителен до 06.06.2021 г.) на дифракционном спектрографе ДФС-8. Определено 23 химических элемента (Li, Be, B, P, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Y, Nb, Mo, Ag, Sn, La, Yb, Pb). При анализе использовались стандартные эталоны почв СДПС-1 (*Albic Podzols*) и ССК-1 (*Haplic Calcisols*), а также пород типа «габбро», «карбонат», «гранит». Каждый анализ проводился в двух повторностях при  $d=15-30\%$ ,  $r=0,95$ .

Минеральный состав в отвалах пустых пород определялся методом полуколичественного рентгенофазового анализа с использованием дифрактометра D2 PHASER фирмы Bruker (Германия),  $\text{CuK}\alpha$  излучение, 30 кв, 10 ма на основе базы данных PDF 2.

Значения коэффициентов накопления рассчитывались относительно  $K_0$  – это отношение среднего содержания микроэлемента в конкретном почвенном разрезе к среднему содержанию этого же микроэлемента в почвообразующем субстрате:

$$\begin{aligned}K_0 &= C_{\text{почв}}/C_{\text{пород}}, \\K_1 &= C_{\text{гор.ВС (или С)}}/C_{\text{пород}}, \\K_2 &= C_{(\text{гор.В или АВ})}/C_{\text{гор.ВС(или С)}}, \\K_3 &= C_{\text{гор.А}_0}/C_{\text{гор.В (или АВ)}}.\end{aligned}$$

По данным наших предыдущих исследований территория Далдынского кимберлитового поля расположена в пределах формирования в почвенном покрове природной геохимической аномалии, где концентрация многих элементов и соединений намного превышает установленные нормативы ПДК [22]. Кроме этого, исследуемая территория по своим природно-климатическим характеристикам находится вне активного сельскохозяйственного освоения. Исходя из этих двух факторов, считаем целесообразным эколого-геохимическую характеристику состояния почвенного покрова проводить на основании параметров регионального фона.

Для геохимической характеристики почв рассчитывается коэффициент концентрации элемента относительно фонового содержания этого элемента ( $K_c$ ) [23]:

$$K_c = K_{\text{общ}}/K_{\text{фон}},$$

где  $K_{\text{общ}}$  – содержание элемента в исследуемой почве;  $K_{\text{фон}}$  – фоновое содержание элемента.

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 привлечени-

ем результатов известных геохимических изысканий в регионе, сопоставимых по химико-аналитическим методам [24–27].

Полученные данные обработаны с использованием программ Microsoft Excel 2013, Statistica 6.0, OriginPro 8.5.1. Построение карт выполнено с помощью программы ArcGIS 9.0.

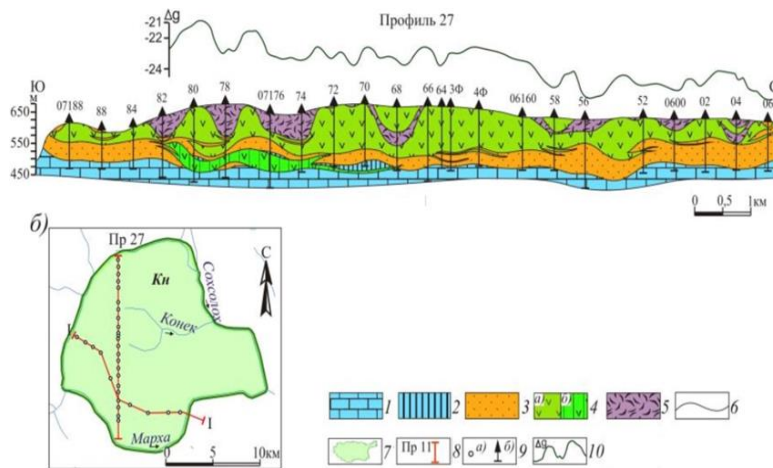
### Результаты и их обсуждение

Территория Далдынского кимберлитового поля приурочена к области сопряжения юго-западного склона Анабаро-Оленекской антеклизы и северо-восточного борта Тунгусской синеклизы [28]. В его строении участвуют кристаллические породы архея, карбонатные и терригенно-карбонатные отложения венда, кембрия, ордовика и силура, терригенные образования карбона. Глубина залегания кристаллического фундамента составляет 2,4 ... 2,5 км. Осадочный чехол интродуцирован пластовыми телами и дайками долеритов, трубками взрыва, дайками и жилами кимберлитов. Четвертичные отложения представлены различного генезиса песками, галечниками, пылеватыми супесями, часто со значительными включениями крупнообломочного материала.

На территории Далдыно-Алаkitского горнопромышленного района доминирующее положение занимают карбонатные породы раннего палеозоя, которые выступают в роли почвообразующего субстрата (рис. 2) [29]. Основной вектор современных геохимических процессов в системе порода–почва имеет карбонатную направленность с доминированием Са-Fe-Mg компоненты.

Уровень содержаний макро- и микроэлементов осадочных пород отвечает параметрам регионального геохимического фона и отражает характер общей геохимической специализации региона. Валовые содержания макро- и микроэлементов в основных почвообразующих породах Далдыно-Алаkitского района сведены в табл. 1, которая составлена по материалам Б.С. Ягнышева с соавторами [30, 31].

По данным геолого-геохимических исследований на территории Якутской алмазоносной провинции, направленных на поиски коренных месторождений алмазов, установлено, что при формировании кимберлитовых тел в роли главного концентратора практически всех макро- и микрокомпонентов выступает кимберлит-цемент – это связующая масса, составляющая до 80–85 % от всего объема породы [25, 26]. Порядка 10 % вещества приходится на минеральную составляющую кимберлитов. Это, как правило, гранаты – пиропы и альмандины; высокомагнезиальные ильменит-пикроильмениты, оливины, хромиты, магнетиты, карбонаты, сульфиды и т. д. Не более 5–7 % приходится на долю ксенолитов пород осадочного чехла, кристаллических пород фундамента и глубинных включений – обломков пород мантии преимущественно щелочно-ультраосновного состава. В целом связующая масса характеризуется преимущественным карбонат-серпентиновым составом, очень неустойчивым при выветривании и легко разлагающимся под атмосферным воздействием на поверхности современного ландшафтного среза [3].



**Рис. 2.** Геологический разрез на примере фрагмента схемы размещения в пределах обобщенных гидрографических границ [29]: 1 – терригенные отложения нижнего палеозоя; 2 – инъективные блоки пород нижнего палеозоя; 3 – отложения верхнего палеозоя; 4 – интрузии долеритов (а), в том числе проводящих каналов (б); 5 – туфы; 6 – геологические границы; 7 – обобщенные гидрографические границы в плане центральной части Далдыно-Алаakitского горнопромышленного района; 8 – линии профилей (геологических разрезов) и их номера; 9 – скважины: в плане (а) и на разрезе (б); 10 – график гравитационного поля

**Fig. 2.** Geological section on the example of a fragment of the distribution scheme within the generalized hydrographic boundaries [29]: 1 – terrigenous deposits of the Lower Paleozoic; 2 – injective blocks of rocks of the Lower Paleozoic; 3 – deposits of the Upper Paleozoic; 4 – intrusion of dolerites (a), including conductive channels (b); 5 – tuffs; 6 – geological boundaries; 7 – generalized hydrographic boundaries in terms of the central part of the Daldyn-Alakit mining region; 8 – lines of profiles (geological sections) and their numbers; 9 – wells: in plan (a) and in the section (b); 10 – graph of the gravitational field

**Таблица 1.** Средние содержания микроэлементов в почвообразующих породах Далдыно-Алаakitского горнопромышленного района (вес. %)

**Table 1.** Average content of trace elements in soil-forming rocks of the Daldyn-Alakit mining region (wt. %)

Элемент, множитель Element, multiplier	Осадочные породы/Sedimentary rocks			Магматические породы/Igneous rocks	
	$S_1mk$ n=18	$O_{1ss-O_{1ol}}$ n=166	$C_3mrk$ n=150	$\delta D_3-C_1$ n=2315	$\gamma\beta$ n=15
Li, $10^{-3}$	1,6±0,24	2,26±0,45	6,48±0,97	1,36±0,18	н/о
Be, $10^{-3}$	–	0,05±0,01	–	0,14±0,02	–
B, $10^{-3}$	2,8±0,42	1,47±0,22	1,7±0,26	10,02±1,53	2,27±0,36
P, $10^{-2}$	1,9±0,29	0,8±0,16	0,73±0,11	9,07±1,81	17,1±3,42
Sc, $10^{-3}$	–	0,05±0,01	0,34±0,05	н/о	–
Ti, $10^{-1}$	2,56±0,38	1,33±0,20	5,6±0,84	803,3±160,7	9,6±1,44
V, $10^{-3}$	2,14±0,32	2,58±0,39	3,02±0,45	4,5±0,68	13,0±1,95
Cr, $10^{-3}$	2,4±0,36	3,39±0,51	4,58±0,67	41,6±6,24	10,0±1,25
Mn, $10^{-3}$	9,0±1,8	7,05±1,06	9,86±1,48	101,4±15,21	19,6±2,94
Co, $10^{-3}$	0,1±0,02	0,33±0,05	0,35±0,07	9,16±1,37	6,4±0,96
Ni, $10^{-3}$	0,51±0,08	1,04±0,21	0,99±0,2	66,1±0,92	26,6±3,99
Cu, $10^{-3}$	3,4±0,51	1,64±0,25	1,19±0,18	5,23±0,78	48,6±7,29
Zn, $10^{-3}$	3,28±0,66	1,31±0,2	1,91±0,29	11,94±3,71	18,6±2,98
Ga, $10^{-3}$	0,11±0,02	0,28±0,04	0,22±0,03	0,17±0,02	2,46±0,37
Ge, $10^{-2}$	н/о	–	0,1±0,02	0,69±0,11	2,5±0,47
Y, $10^{-3}$	0,72±0,14	0,16±0,03	0,65±0,13	1,89±0,38	2,13±0,43
Nb, $10^{-3}$	0,61±0,09	0,54±0,11	н/о	4,99±1,3	2,1±0,42
Mo, $10^{-4}$	2,6±0,39	0,7±0,14	3,04±0,61	1,17±0,23	1,5±0,3
Ag, $10^{-5}$	н/о	0,32±0,06	1,0±0,32	1,04±0,21	5,16±1,04
Sn, $10^{-4}$	н/о	0,47±0,09	0,3±0,06	1,34±0,27	4,4±0,88
La, $10^{-3}$	0,05±0,01	0,05±0,01	–	0,53±0,11	н/о
Yb, $10^{-3}$	н/о	0,77±0,18	–	0,19±0,04	1,8±0,41
Pb, $10^{-3}$	0,64±0,08	1,18±0,27	0,73±0,17	0,66±0,15	0,94±0,22
Bi, $10^{-3}$	–	–	н/о	0,009±0,001	–
W, $10^{-3}$	–	0,34±0,05	0,1±0,02	0,02±0,001	–
Tl, $10^{-4}$	–	–	н/о	0,18±0,03	–

Примечание: n – количество образцов в выборке; «–» – не определено, «н/о» – не обнаружено;  $S_1mk$  – ранний Силур, Меикская свита;  $O_{1ss-O_{1ol}}$  – ранний Ордовик, Сохолоохская и Олдондинская свиты;  $C_3mrk$  – поздний Кембрий, Моркокинская свита;  $\delta D_3-C_1$  – кимберлиты;  $\gamma\beta$  – дайки долеритов.

Note: n is the number of samples in the selection; «–» not defined, «н/о» – not detected;  $S_1mk$  – Early Silurian rocks, Meiksk suite;  $O_{1ss-O_{1ol}}$  – Early Ordovician rocks, Sohsolohsk and Oldondinsk suites;  $C_3mrk$  – Late Cambrian rocks, Morkokinsk suite;  $\delta D_3-C_1$  – kimberlites;  $\gamma\beta$  – dolerite dikes.



Анализ содержания микроэлементов в почвообразующих породах позволяет считать, что наиболее высокие концентрации отмечены в составе кимберлитов. Достаточно высокими содержаниями характеризуются био- и литофильные элементы – В, Р, Тi, Мп, повышенные содержания отмечены для сидерофильных элементов – Сг, Ni и Со.

По сравнению с кимберлитами, более высокими концентрациями V, Cu, Zn и Pb характеризуются долериты. А по сравнению с осадочными породами, долериты обладают повышенными содержаниями Сг, Ni, Со, V и Cu.

Существенное влияние на параметры местного геохимического фона оказывают регионально распространенные подземные водоносные горизонты, в составе которых присутствуют высокоминерализованные рассолы, насыщенные Li и Sr [32].

Общеизвестно, что в природной обстановке почвы приобретают характерное для них содержание и профильное распределение микроэлементов в результате преобразования исходных пород почвообразовательным процессом. Поэтому вполне логично предположить, что в современных ненарушенных почвах Далдыно-

Алакитского горнопромышленного района будут отмечены ассоциации элементов, отражающие геохимическую специфику осадочных пород ордовика и кембрия – Li, Ag, P, Y и Cu, кимберлитов – Cr, Ni, Co, долеритов – V, Cu, Pb и элементов-индикаторов влияния водоносных высокоминерализованных рассолов – Li, Sr [3].

Пространственная дифференциация  
 микроэлементного состава почв

Почвы территории исследований отражают общие закономерности формирования почвенного покрова Северо-Западной Якутии и входят в состав Восточно-Сибирской мерзлотно-северотаежной области бореального (умеренно холодного) пояса почв России и относятся к отделу криотурбированных почв. На типовом уровне они разделяются по сочетанию подстильно-торфяного и криотурбированного горизонтов. На уровне подтипов – по особенностям строения органогенного горизонта, признакам оглеения, палево- и криометаморфизма [33].

По международной системе почвенной классификации [34] в структуре почвенного покрова большую долю занимают криосоли (*Cryosols*) (рис. 3).

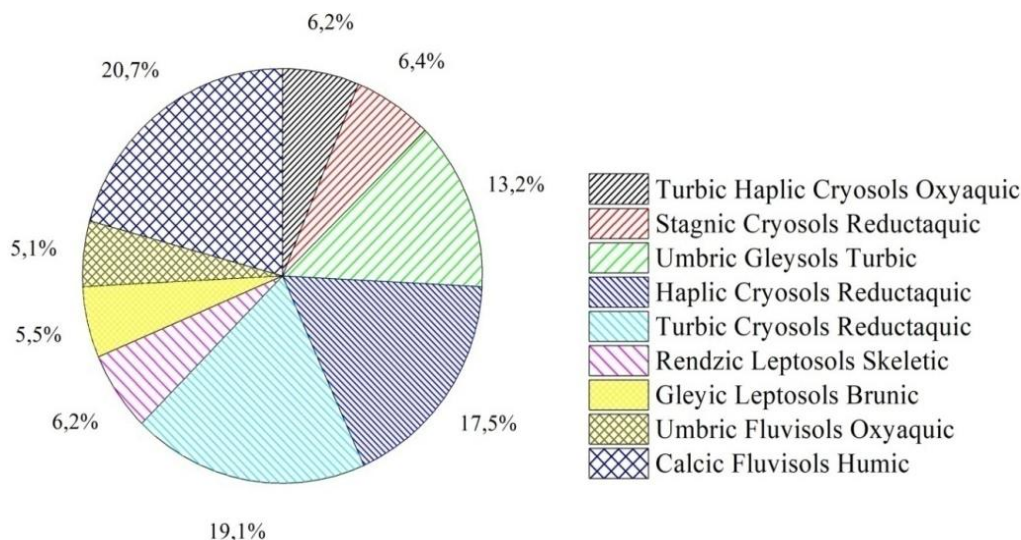


Рис. 3. Структура почвенного покрова территории Далдыно-Алакитского района по международной системе почвенной классификации

Fig. 3. Soil cover structure of the Daldyn-Alakit district according to the World Reference Base for Soil Resources

В табл. 2 приведены параметры пространственного распределения микроэлементов в почвах Далдыно-Алакитского горнопромышленного района.

В микроэлементном составе почв отмечаются черты, отражающие геолого-геохимическую специфику подстилающих пород. В почвах относительно фоновых параметров отмечены высокие значения Li, Be, Ti, Cr, Co, Ni, Y и Nb, при этом коэффициенты концентрации практически всех анализируемых элементов варьируют в широком диапазоне.

Литофильные элементы, маркирующие влияние водоносных высокоминерализованных рассолов и пород раннего палеозоя Li, Be, Ti и Y, присутствуют в почвенном покрове района в повышенных концентрациях с невысокими  $K_c=1,2-2,03$ .

Элементы, типоморфные кимберлитам – Cr, Co и Ni – выявлены в почвах исследуемого района с более высокими  $K_c=2,5-10,9$ . Обособленно в почвах района выделяется Nb, относящийся к литофилам и характеризующий влияние даек долеритов с  $K_c=7,9$ .

В почвах исследуемой территории деятельный органоминеральный слой находится на глубине до 30–40 см. Ниже, как правило, располагаются горизонты CR или C, практически характеризующие микроэлементный состав почвообразующих пород. Поэтому для микроэлементной характеристики доминирующих типов почв мы решили ограничиться почвенным слоем мощностью 0–30 см, включающим верхние гумусовые горизонты (A, AO) и минеральные или переходные органоминеральные горизонты (AB и CR).

Подобный принцип выбора части почвенного профиля, в наибольшей степени характеризующего специфику микроэлементного состава доминирующих типов почв, носит условный характер. Например, мощность почвенного профиля карбо-петрозема гумусового зачастую намного меньше даже с горизонтом CR<sub>ca</sub> [3].

**Таблица 2.** Обобщенная микроэлементная характеристика почв территории Далдыно-Алаkitского горнопромышленного района (вес. %)

**Table 2.** Generalized trace element characteristics of soils of the Daldyn-Alakit mining region (wt. %)

Элемент Element	Региональный фон Regional background n=1241	Содержание микроэлементов в почвах ненарушенных ландшафтов района (0–60 см) Content of trace elements in the soils of undisturbed landscapes of the region (0–60 cm)		Коэффициенты концентрации (K <sub>c</sub> ) Concentration factors (K <sub>c</sub> )
		ср. геом./mean n=175	Min–Max	
Элементы, содержания которых превышают региональный фон в >50 % исследованных образцов почв Elements with contents exceeding the regional background in >50 % of the studied soil samples				
Ni, 10 <sup>-3</sup>	3,85	42,0±2,1	1,0...114,0	0,3...29,6
Nb, 10 <sup>-3</sup>	0,92	7,31±0,37	0,5...11,0	0,6...11,9
Cr, 10 <sup>-3</sup>	8,06	20,8±1,0	2,0...57,0	0,2...7,1
Co, 10 <sup>-3</sup>	4,2	12,9±0,6	0,7...15,5	0,2...3,7
Y, 10 <sup>-3</sup>	3,63	6,71±0,34	1,5...13,0	0,4...3,6
Be, 10 <sup>-3</sup>	0,27	0,55±0,03	0,25...0,7	0,9...2,6
Li, 10 <sup>-3</sup>	8,02	9,59±0,29	3,0...15,0	0,4...1,9
Ti, 10 <sup>-1</sup>	3,84	4,70±0,24	2,0...7,0	0,5...1,8
Элементы, единично выявленные в высоких надфоновых концентрациях Elements singly detected in high above-background concentrations				
Mn, 10 <sup>-3</sup>	10,36	6,59±0,33	3,0...120,0	0,3...11,6
Sc, 10 <sup>-3</sup>	1,97	1,70±0,09	1,0...5,0	0,5...2,5
Ag, 10 <sup>-3</sup>	1,0	0,90±0,05	0,05...2,0	0,05...2,0
Yb, 10 <sup>-3</sup>	2,8	2,70±0,14	2,5...5,0	0,9...1,8
La, 10 <sup>-3</sup>	0,17	0,18±0,01	0,15...0,3	0,9...1,8
Элементы, находящиеся на уровне или ниже фона Elements that are at or below the background				
Pb, 10 <sup>-3</sup>	1,0	0,77±0,04	0,3...1,5	0,3...1,5
Zn, 10 <sup>-3</sup>	5,42	4,18±0,21	2,0...7,0	0,4...1,3
Ga, 10 <sup>-3</sup>	1,5	1,41±0,07	0,7...2,0	0,5...1,3
Ge, 10 <sup>-2</sup>	0,8	0,60±0,03	0,5...1,0	0,6...1,3
V, 10 <sup>-3</sup>	8,51	7,76±0,39	5,0...10,0	0,6...1,2
Sn, 10 <sup>-4</sup>	1,7	1,60±0,08	1,0...2,0	0,6...1,2
P, 10 <sup>-2</sup>	4,4	3,46±0,17	3,0...5,0	0,7...1,1
B, 10 <sup>-3</sup>	3,22	2,53±0,13	1,5...3,0	0,5...0,9
Cu, 10 <sup>-3</sup>	3,2	2,06±0,10	1,5...3,0	0,5...0,9
Mo, 10 <sup>-4</sup>	1,6	1,10±0,06	0,7...1,5	0,4...0,9

Примечание: K<sub>c</sub> – коэффициент концентрации относительно регионального фона.

Note: K<sub>c</sub> – concentration factor over the regional background.

В целом почвенный покров Далдыно-Алаkitского горнопромышленного района, сформированный в результате действия биогенно-аккумулятивных, иллювиально-аккумулятивных и криотурбационных процессов, характеризуется концентрациями микроэлементов, находящимися на уровне или несколько ниже значений регионального фона.

Внутрипрофильная дифференциация микроэлементного состава в почвах природных ландшафтов вне зоны воздействия объектов алмазодобычи

Отличительной чертой почвенных профилей природных ландшафтов мерзлотно-северотаежной области являются отчетливо выраженные явления криотурбации, которые приводят к нарушению цельности генетических горизонтов и перемешиванию почвенного материала по всему профилю.

Живые организмы аккумулируют необходимые элементы, которые сохраняются в их остатках, и поступают в почву [35]. Далее, под влиянием криотурбационных процессов, органическое вещество насыщает весь почвенный профиль и аккумулируется в надмерзлотно-горизонте. Так, совокупность геохимических и биохимических процессов с учетом специфики природно-климатических факторов почв формирует профиль мерзлотно-горизонтов, что, на наш взгляд, представляет двухуровневую систему, где горизонты CR и TC (иногда C<sub>g</sub>) в нижней части почвенного профиля являются продуктом геохимического выветривания почвообразующих пород, а горизонты A и A<sub>sg</sub> в верхней части почвенного профиля аккумулируют биофильные элементы. При этом часть веществ выносятся из сферы биологического круговорота под действием атмосферных агентов и, вовлекаясь в миграционные потоки, оказывает влияние на состав подпочвенной минеральной толщи [36]. Таким образом, микроэлементная структура почвенного профиля меняется, образуя качественно новые накопительные ряды.

В результате вариаций геохимической и петрохимической специфики почвообразующих пород меняются микроэлементные ассоциации накопительных рядов доминирующих типов почв. Коэффициенты накопления (K<sub>1</sub>–K<sub>3</sub>) варьируют в очень широких пределах (табл. 3).

При пересчете коэффициентов накопления от подстилающих пород к почвам в почвенном профиле глееземов перегнойных наблюдается явное накопление в минеральной части Li, V, Mn, Ni, Zn, Y и Pb, что носит закономерный, увеличивающийся с глубиной характер.

Горизонт A<sub>1</sub> (гумусово-аккумулятивный) обладает более широким спектром накопления микроэлементов с большими вариациями коэффициентов накопления относительно горизонта CR<sub>g</sub>, что, конечно, связано с активным участием органики и с выносом из нижележащего горизонта таких элементов, как V, Ti, Ni, Cr, Cu, Nb и Y.

Mn, Ti и Co имеют двойное происхождение: биогенное накопление с постепенным снижением вниз по профилю и выносом из нижележащих горизонтов и аккумуляцией органическим веществом. Для глееземов перегнойных характерна аккумуляция Mn и Ti. Поведение остальных микроэлементов зависит от геохимических свойств почвообразующего субстрата. Необходимо отметить, что криоземы типичные отличаются самым маломощным почвенным профилем, поэтому отмечается относительно равномерное распределение микроэлементов, а незначительная аккумуляция в верхней части профиля связана с сорбцией их органическим веществом.

**Таблица 3.** Характер распределения микроэлементов по почвенному профилю доминирующих типов почв Далдыно-Алакитского горнопромышленного района

**Table 3.** Distribution pattern of the trace elements along the soil profile of the dominant soil types in the Daldyn-Alakit mining region

Коэффициент накопления Accumulation factor	Элемент/Element													
	Li	B	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Y	Nb	Sn	Pb
Глеезем перегнойный на породах Меикской свиты раннего силура Umbric Gleysol Turbic formed on the rocks of the Meisk suite of the early Silurian period														
K <sub>3</sub>	0,6	0,8	1,7*	0,3	0,3	2,5*	14,0*	0,3	0,8	0,5	0,7	0,3	0,3	0,6
K <sub>2</sub>	0,9	0,7	16,6*	1,4*	4,9*	0,6	2,2*	6,0*	1,7*	0,8	2,3*	2,8*	0,5	0,7
K <sub>1</sub>	3,6**	0,7	0,1	3,3**	0,6	1,2**	0,2	1,1**	0,3	2,2**	4,4**	0,8	–	1,1**
Криозем надмерзлотно-глеяватый на кимберлитах гр. «Юность» Stagnic Crysol Reductaquic formed on kimberlites of the «Yunost» pipe														
K <sub>3</sub>	0,8	6,2*	0,7	3,5*	0,3	0,6	0,5	0,2	0,5	0,6	1,7*	–	0,6	0,2
K <sub>2</sub>	1,3	0,1	1,0	0,5	0,8	0,1	0,9	0,5	0,9	1,0	1,7	–	1,0	1,2
K <sub>1</sub>	0,9	0,2	0,01	1,4**	1,2**	1,2**	1,3**	1,7**	1,0	0,5	0,7	–	0,9	0,7
Криозем типичный над дайкой долеритов Turbic Naplic Crysol Oxyaquic formed above dolerite dikes														
K <sub>2</sub>	1,3*	1,1*	1,4*	1,2*	0,8	1,3*	0,9	1,0	0,7	1,2*	0,7	–	0,8	0,8
K <sub>1</sub>	–	0,6	0,6	0,7	0,9	0,5	0,7	0,4	0,1	0,3	2,3**	–	0,3	0,6
Криозем тиксотропный на породах Сохолохской свиты раннего ордовика Turbic Crysol Thixotropic formed on carbonate rocks of the Sohlohsk suite of the early Ordovician period														
K <sub>3</sub>	1,4*	0,7	2,8	1,9*	0,7	0,7	0,3	1,3*	0,3	0,6	1,5*	0,4	1,7*	0,6
K <sub>2</sub>	0,9	1,9**	0,5	2,8**	2,2**	1,9**	7,9**	4,7**	6,1**	1,7**	1,7**	4,5**	0,5	1,0
K <sub>1</sub>	3,3**	1,9**	0,4	0,1	0,6	0,3	0,1	0,04	0,02	0,3	0,9	0,2	0,5	0,5
Карбо-петрозем гумусовый на породах Моркокинской свиты позднего кембрия Rendzic Leptosol Skeletic formed on carbonate rocks of the Morkokinsk suite of the late Cambrian period														
K <sub>3</sub>	0,4	0,6	0,6	0,3	1,0	1,1*	0,4	0,6	0,9	2,1*	0,6	2,0*	0,5	1,0
K <sub>2</sub>	0,4	0,9	1,5**	3,6**	1,0	0,9	1,5**	1,5**	1,0	0,5	2,3**	0,3	0,5	0,2
K <sub>1</sub>	2,3**	2,1**	0,9	0,5	0,6	1,0	0,9	0,9	1,7**	4,2**	4,9**	–	6,6**	1,5**

Примечание: 2,3\* – выделены элементы, аккумулирующиеся органикой; 4,2\*\* – вынос элемента из нижележащего горизонта.

Note: 2,3\* – marked the elements accumulated by organic matter; 4,2 \*\* – marked the elements transferred from the underlying horizon.

Для каждого типа криосолей характерно накопление определенного спектра микроэлементов, которые в природных условиях создаются главным образом в результате геохимического влияния почвообразующего субстрата [3]. При этом ассоциации микроэлементов и их концентрации в каждом конкретном случае имеют ряд отличительных свойств. Например, такие элементы, как Cr, Ni, Cu, Mn, обнаруживают закономерное возрастание содержания с глубиной по всему почвенному профилю над кимберлитами. Близкое поведение этих элементов, но уже с участием V, отмечается в почвах над дайками долеритов. Резко отличная схема дифференциации микроэлементов в почвенном профиле определена в криоземах над кембрийскими карбонатными породами, где обнаруживается выраженное накопление в минеральном горизонте Cr, Sc, V и Ni, с практически индивидуальным поведением каждого из этих элементов в верхней органогенной части или в составе переходных к почвообразующим породам горизонтов. В частности, ванадий, скандий и хром имеют минимальные количества именно на границе перехода почв и материнской породы (вынос), а Mn закономерно проявляет свои биогенные свойства накопления в составе органогенного горизонта (АО). Все эти выявленные закономерности распределения содержания микроэлементов отражают особенности почвообразо-

вательных процессов на территории исследования и позволяют оценить степень их участия в каждом конкретном генетическом типе почв.

#### Техногенные образования и техногенно-преобразованные почвы импактных зон

На территории промышленной площадки Удачинского горно-обогатительного комбината АК АЛРОСА (ПАО) открытым способом разрабатывается кимберлитовая трубка Зарница и комбинированным способом – трубка Удачная. Техногенные образования представлены отвалами вокруг карьеров разрабатываемых месторождений алмазов и сохранными «хвостами» обогащения кимберлитов. Отвалы сложены щебнисто-глыбистым материалом вмещающих и перекарывающих кимберлиты отложений с примесью глинисто-песчаного наполнителя, «хвосты» – песчано-песчаной фракцией кимберлитов.

Площадь распространения и мощность техногенных отложений напрямую зависят от размеров и глубины разрабатываемых карьеров [37]. Например, техногенные массивы, налегающие на разнообразные по генезису и возрасту четвертичные образования на правом склоне долины р. Далдын, занимают:

- отвал Северный – площадь 238 га, высота 125 м;
- отвал Западный – площадь 272 га, высота 125 м;

• отвал Южный – площадь 70 га, высота 85 м.  
 Их абсолютные отметки составляют 420, 455 и 425 м соответственно. По результатам рентгенофазового анализа карбонатных пород, в основном слагающих отвалы пустых пород карьеров трубки Удачная и Зарница, подавляющее большинство представлено карбонатными породами – известняками и доломитами с малыми примесями кальцита, кварца, полевых шпатов и слюды (рис. 4).

О возможном воздействии гидротермальных процессов свидетельствует присутствие в небольших количествах (от 2,27 до 9,06 %) клинохлора. Обломки магматических пород в отвалах встречаются достаточно редко и представлены долеритами и кимберлитовыми брекчиями. В кимберлитовых брекчиях отмечен кальцит, доломит, магнетит, пирит, магнезит и минералы группы серпентина, слюд и хлорита.

В микроэлементном составе грунтов промышленной площадки отражена геохимическая специфика пород, слагающих наземные техногенные массивы. Например, мергели – Mn; глинистые карбонатные породы и известняки – Zn; песчаники – P, Ag; кимбер-

литовые породы – Cr, Ni, Co, Ti, Sr, Nb и Y; долериты – Mn, V, Cu, Sc, Yb и Sn (табл. 5).

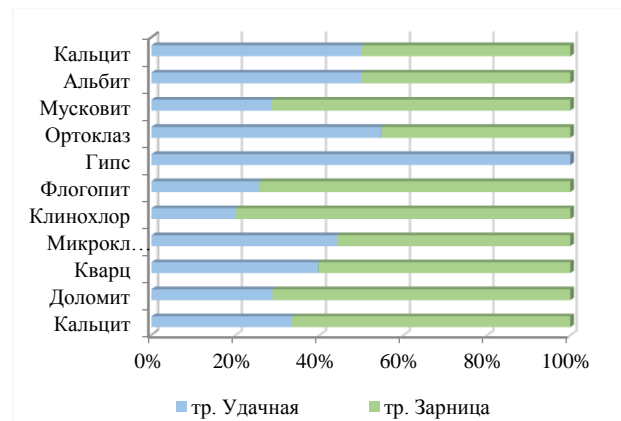


Рис. 4. Минеральный состав техногенных образований отвалов пустых пород на территории промышленной площадки УГОКа АК АЛРОСА (ИАО)

Fig. 4. Mineral composition of technogenic formations of waste rock dumps on the territory of the industrial site of UMPD PJSC ALROSA

Таблица 5. Средние содержания валовых форм микроэлементов в грунтах импактной зоны промышленной площадки Удачинского ГОКа

Table 5. Average contents of gross forms of microelements in the soils of the impact zone of the industrial site of the Udachny MPD

Элемент, множитель Element, multiplier	Средние содержания в почвах Зап. Якутии Average contents in soils of Western Yakutia	Средние содержания микроэлементов в грунтах (вес. %)/Average contents of trace elements in soils (wt. %)					
		Селитебной территории, г. Удачный residential area	Площадки гидрологических скважин на полигоне «Октябрьский» Hydrological well sites at the Oktyabrsky landfill	Хвостохранилища 1 очереди Tailings dumps of the 1 stage	Дорожных насыпей Road embankments	Южного борта карьера тр. Удачная Southern side of the Udachny pipe	Отвалов пустых пород тр. Удачная Waste rock heaps of the Udachny pipe
	n=1241	n=116	n=91	n=19	n=18	n=20	n=10
Li, 10 <sup>-3</sup>	8,0±0,4	9,8±0,5	<b>15,7±0,8</b>	<b>14,9±0,7</b>	18,3±0,9	14,9±0,7	15,0±0,8
Be, 10 <sup>-3</sup>	0,27±0,01			н/о			0,500±0,025
B, 10 <sup>-3</sup>	3,22±0,16	2,48±0,12	7,53±0,38	<b>4,86±0,24</b>	5,60±0,28	4,51±0,23	15,4±0,8
P, 10 <sup>-2</sup>	4,40±0,22	3,47±0,17	4,51±0,23	3,62±0,18	4,06±0,20	4,55±0,23	10,5±0,5
Sc, 10 <sup>-3</sup>	1,97±0,09	1,25 ±0,06	1,30±0,07	0,40±0,02	н/о	0,420±0,021	7,38±0,37
Ti, 10 <sup>-1</sup>	3,84±0,19	3,17±0,16	7,13±0,36	<b>4,40±0,22</b>	3,17±0,16	6,26±0,31	10,1±0,5
V, 10 <sup>-3</sup>	8,51±0,43	11,8±0,6	6,8±0,34	<b>15,1±0,8</b>	8,3±0,4	19,2±0,9	15,6±0,8
Cr, 10 <sup>-3</sup>	8,06±0,40	5,80±0,29	8,0±0,4	8,0±0,4	5,33±0,27	15,0±0,8	20,9±1,0
Mn, 10 <sup>-3</sup>	10,4±0,5	<b>84,4±4,2</b>	218±11	<b>110±6</b>	98±5	195±10	152±8
Co, 10 <sup>-3</sup>	4,20±0,21	11,6±0,6	22,3±1,1	н/о	11,3±0,6	н/о	20,0±0,1
Ni, 10 <sup>-3</sup>	3,85±0,19	2,51±0,13	2,30±0,12	<b>11,9±0,6</b>	2,23±0,13	5,56±0,28	7,31±0,37
Cu, 10 <sup>-3</sup>	3,20±0,16	2,96±0,15	2,76±0,14	<b>4,16±0,21</b>	2,86±0,09	4,73±0,24	5,78±0,29
Zn, 10 <sup>-3</sup>	5,42±0,27	4,2±0,21	11,16±0,56	<b>8,7±0,4</b>	5,40±0,27	8,06±0,40	7,10±0,36
Ga, 10 <sup>-3</sup>	1,50±0,08	1,32±0,07	2,46±0,12	<b>2,23±0,11</b>	1,26±0,06	2,26±0,11	2,01±0,10
Ge, 10 <sup>-2</sup>	0,80±0,04	0,4±0,02	1,00±0,05	<b>1,00±0,05</b>	1,2±0,06	0,8±0,04	2,10±0,11
Y, 10 <sup>-3</sup>	3,63±0,18	1,65±0,08	1,21±0,06	2,96±0,15		2,43±0,12	7,21±0,36
Nb, 10 <sup>-3</sup>	0,92±0,05	1,30±0,07	2,00±0,10	<b>2,1±0,11</b>	н/о	5,3±0,27	11,3±0,6
Mo, 10 <sup>-4</sup>	1,60±0,08	0,40±0,02	0,70±0,04	1,2±0,06	0,80±0,05	1,4±0,07	2,2±0,11
Ag, 10 <sup>-5</sup>	1,00±0,05	1,00±0,05	1,00±0,05	1,00±0,05	1,00±0,05	1,00±0,05	1,00±0,05
Sn, 10 <sup>-4</sup>	1,70±0,09	1,70±0,09	2,00±0,10	<b>2,8±0,14</b>	1,80±0,09	3,0±0,15	3,00±0,15
La, 10 <sup>-3</sup>	0,170±0,009			н/о			0,030±0,001
Pb, 10 <sup>-3</sup>	1,00±0,05	<b>5,17±0,26</b>	1,15±0,06	1,23±0,06	1,93±0,10	1,55±0,08	1,5±0,08
Bi, 10 <sup>-3</sup>		0,10±0,005	1,30±0,07	0,6±0,03	0,500±0,025	0,300±0,015	1,00±0,05
Tl, 10 <sup>-4</sup>	н/о			н/о		1,8±0,09	н/о

Примечание: n – количество образцов в выборке; «н/о» – не обнаружено; полужирным обозначено превышение средних содержаний (регионального фона) в 1,5 и более раз.

Note: n is the number of samples in the selection; «н/о» – not detected; bold indicates the excess of average contents (regional background) by 1,5 and more times.



Грунты импактных зон на разных объектах промышленной площадки отличаются высокими содержаниями Mn, Co, Li и Ti. Во всех образцах зафиксировано невысокое содержание Bi. А в грунтах самого карьера трубки Удачная выявлены значительные содержания таллия.

На каждой площадке грунты характеризуются специфическим микроэлементным спектром. Для грунтов селитебных территорий свойственно накопление Pb-V-Sc. Площадки гидрологических скважин и дорожные насыпи отличаются преобладанием Li-B-Zn.

Наиболее высокие концентрации микроэлементов, среди которых доминируют Mn, Ni, Sc, Nb, Co, Li, V, B, Ti, отмечены в грунтах хвостохранилищ и в отвалах пустых пород.

#### Заключение

Содержание и характер распределения микроэлементов в почвах фоновых зон на участках алмазодобычи в северо-западной части Сибирской платформы отражают специфику формирования почвообразующего субстрата.

Внутрипрофильное распределение микро- и макроэлементов обуславливается биогенной аккумуляцией и перемешиванием почвенного материала в результате криогенеза. Это приводит к перераспределению микроэлементов внутри почвенных профилей маломощных гомогенных почв северо-таежных

ландшафтов на биологическом, сорбционном, карбонатном и надмерзлотном геохимических барьерах.

В криоземах и глееземах отмечается значительная вариабельность содержания валовых форм лито- и сидерофильных элементов – Cr, Ni, Co, Mn, V, B, Zn, Li и Sr.

В целом для почв исследуемой территории отмечены токсичные концентрации Cr, Ni и Co.

В грунтах импактных зон объектов промышленной площадки зафиксированы высокие надфоновые концентрации Mn, Co, Li, Ti, Li и поверхностная аккумуляция P, Ag, Cr, Ni, Co, Ti, Sr, Nb, Y, V, Cu, Sc и Sn, связанная с геохимической спецификой пород, слагающих наземные техногенные массивы.

Выявленные закономерности микроэлементного перераспределения как по латерали, так и внутри почвенного профиля для территории Далдыно-Алакитского горнопромышленного района являются эталонной моделью геохимического состава природного состояния доминирующих типов почв Северо-Западной Якутии.

*Статья подготовлена в рамках выполнения проектов Государственного задания Минобрнауки РФ FUEM-2019-0003 «Эколого-геохимическое изучение техногенных массивов на территории Якутской алмазодобывающей провинции» и FSRG-2020-0018 «Изучение особенностей функционирования арктических и субарктических экосистем Якутии в условиях усиления техногенного воздействия и глобального изменения климата».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белошейкина А.В., Таловская А.В., Язиков Е.Г. Эколого-геохимическая оценка состояния почвенного покрова территории Сорского горного-обогатительного комбината (Республика Хакасия) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 1. – С. 44–53.
2. Басова И.А., Иоина М.А., Глухова Е.Н. Геоэкологическое состояние почвенного покрова в горнопромышленных регионах // Известия Тульского государственного университета. – 2010. – № 1. – С. 16–20.
3. Легостаева Я.Б. Пространственная и внутрипрофильная дифференциация мерзлотных почв северо-западной Якутии: дис. ... канд. биол. наук. – Улан-Удэ, 2005. – 143 с.
4. Nyenda T., Gwenzu W., Jacobs S.M. Changes in physicochemical properties on a chronosequence of gold mine tailings // Geoderma. – 2021. – V. 395, article 115037. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115037> (дата обращения 15.08.2021).
5. Ушакова Е.С., Караваева Т.И., Белкин П.А. Экологическое состояние почв промышленных территорий (на примере г. Березники, пермский край): сравнение отечественных и зарубежных методов оценки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 58–70.
6. Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China / X.Y. Li, L.J. Liu, Y.G. Wang, G.P. Luo, X. Chen, X.L. Yang, M.H.P. Hall, R. Guo, H. Wang, J. Cui, X. He // Geoderma. – 2013. – V. 192. – P. 50–58.
7. Liu X.M., Wu J.J., Xu J.M. Characterizing the risk assessment of heavy metals and sampling uncertainty analysis in paddy field by geostatistics and GIS // Environmental pollution. – 2006. – V. 141. – P. 257–264.
8. Zhang Ch.Sh. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland // Environmental Pollution. – 2006. – V. 142. – P. 501–511.
9. Metal mobility at an old, heavily loaded sludge application site / B.K. Richards, T.S. Steenhuis, J.H. Peverly, M.B. McBride // Environmental Pollution. – 1998. – V. 99 (3). – P. 365–377.
10. Soil heavy metal pollution and risk assessment in shenyang industrial district, Northeast China / X. Jiao, Y. Teng, Y. Zhan, J. Wu, X. Lin // PLoS ONE. – 2015. – V. 10 (5): e0127736. DOI: 10.1371/journal.pone.0127736.
11. Завалишин С.И., Завалишина О.М., Щевурдин А.И. Геохимические особенности профильного распределения тяжелых металлов в почвах средней тайги Западно-Сибирской низменности // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2005. – № 4. – С. 36–38.
12. Зеньков И.В. Обзор зарубежных исследований в области экологии горнодобывающего производства // Горный журнал. – 2016. – № 10. – С. 96–99.
13. Benidire L., Benidire L., Boularbah A. Impacts of mining activities on soil properties: case studies from Morocco mine sites // Soil Science Annual. – 2020. – V. 71 (4). – P. 395–407.
14. Hooda P.S. A special issue on heavy metals in soils: editorial foreword // Advances in Environmental Research. – 2003. – V. 8. – P. 1–3. DOI: 10.1016/S1093-0191(03)00030-3
15. Ежов А.Ю. Техногенное загрязнение тяжелыми металлами ландшафтов северо-запада Кольского полуострова // Вестник Московского государственного областного университета. Серия «Естественные науки». – 2010. – № 1. – С. 98–103.
16. Loska K., Wiechula D., Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry // Environment International. – 2004. – V. 30. – P. 159–165.
17. Pollution indices as comprehensive tools for evaluation of the accumulation and provenance of potentially toxic elements in soils in Ojców National Park / R. Mazurek, J.B. Kowalska, M. Gąsiorek, P. Zadrozny, J. Wiczorek // National Park Journal of Geochemical Exploration. – 2019. – V. 201. – P. 13–30. DOI: 10.1016/j.gexplo.2019.03.001.
18. 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.
19. Potential ecological risk and human health risk assessment of heavy metal pollution in industrial affected soils by coal mining and metallurgy in Ostrava, Czech Republic / H. Doležalová-Weissmannová, S. Mihočová, P. Chovanec, J. Pavlovský //

- International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2019. – V. 16 (22): 4495. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph16224495> (дата обращения 15.08.2021).
20. Ants as indicators of the success of rehabilitation efforts in deposits of gold mining aillings / C.R. Ribas, J.H. Schoereder, F.A. Schmidt, R.R.C. Solar, C.L. Valentim, R.B.F. Campos // Restoration Ecology. – 2012. – V. 20 (6). – P. 712–720.
  21. Zglobicki W., Telecka M., Skupiński S. Assessment of short-term changes in street dust pollution with heavy metals in Lublin (E Poland) – levels, sources and risks // Environmental Science Pollution Research. – 2019. – Res. 26. – P. 35049–35060. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06496-x> (дата обращения 15.08.2021).
  22. Легостаева Я.Б. Экологическая значимость микроэлементного состава почв Далдынского кимберлитового поля // Проблемы региональной экологии. – 2008. – № 2. – С. 15–20.
  23. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Сает, Б.А. Ревич, Е.П. Янин, Р.С. Смирнова, И.Л. Башаркевич, Т.Л. Онищенко, Л.Н. Павлова, Н.Я. Трефилова, А.И. Ачкасов, С.Ш. Саркисян. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
  24. Экология Западной Якутии (геохимия геосистем: состояние и проблемы) / Б.С. Ягнышев, Т.А. Ягнышева, М.Н. Зинчук, Я.Б. Легостаева. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2005. – 432 с.
  25. Ягнышев Б.С., Ягнышева Т.А., Андреев С.К. Вторичное минералообразование пород нижнего палеозоя как основа минералого-геохимического картирования при поисках кимберлитов // Типоморфизм и геохимические особенности минералов эндогенных образований Якутии. – Якутск: Изд-во ЯФАН СССР, 1985. – С. 110–116.
  26. Факторы минералообразования и некоторые экологические аспекты кимберлитов / Н.Н. Зинчук, М.Н. Зинчук, А.В. Пизнюр, Б.С. Ягнышев. – Воронеж: Изд-во Воронежский государственный университет, 2003. – 110 с.
  27. Ягнышев Б.С., Ягнышева Т.А. Геохимическое изучение Якутской алмазонасной провинции (история применения методов прикладной геохимии, их результаты и перспективы развития) // Геология алмазов – настоящее и будущее. – Воронеж: Воронеж. гос. ун-т., 2005. – С. 386–396.
  28. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири / В.В. Шепелев, О.Н. Толстихин, В.М. Пигузова, Н.М. Никитина, Н.С. Ломовцева, Л.Д. Иванова, И.А. Некрасов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 191 с.
  29. Коробков И.Г., Евстратов А.А. Модели базитовых вулканоструктур и их роль в прогнозной оценке закрытых территорий алмазонасных районов на востоке Тунгусской синеклизы // Руды и металлы. – 2011. – № 3/4. Специальный выпуск памяти А.И. Кривцова. – С. 93–94.
  30. Экологическая минералогия - новое направление в практике изучения техногенных ландшафтов Якутии / Н.Н. Зинчук, Б.С. Ягнышев, Д.Д. Саввинов, Ю.Б. Стегницкий // Геология, закономерности распространения, методы прогноза и поисков месторождений алмазов: Материалы научно-практической конференции. – Якутск: Якутское научно-исследовательское геологоразведочное предприятие ЦНИГРИ, 1999. – С. 355–358.
  31. Ягнышев Б.С. Поиск кимберлитов по первичным геохимическим ореолам // Геология и рудоносность Якутии. – Якутск: Изд-во Якутского государственного университета, 1989. – С. 78–86.
  32. Легостаева Я.Б., Попов В.Ф., Ксенофонтова М.И. Гидрогеологические условия и геоэкологическая ситуация на территории подземных техногенных хранилищ при утилизации дренажных рассолов Удачинского горно-обогатительного комбината // Отечественная геология. – 2018. – № 3. – С. 93–102. DOI: 10.24411/0869-7175-2018-10021.
  33. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И. Классификация и диагностика почв России. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
  34. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. – Rome: FAO, 2015. – 192 p.
  35. Роль биологического фактора в процессе формирования почвы в таежной зоне / И.Б. Арчегова, А.Н. Панюков, Е.Г. Кузнецова, В.А. Ковалева // Вестник СПбГУ. Сер. 3. Биология. – 2016. – Вып. 2. – С. 127–139. DOI: 10.21638/11701/spbu03.2016.210
  36. Арчегова И.Б. Экологическое мировоззрение – основа развития // Вестник Российской академии наук. – 2003. – Т. 73 (2). – С. 114–116.
  37. Опарин Н.А., Легостаева Я.Б. Особенности состава пород наземных техногенных массивов Западной Якутии // Новые познания процессов рудообразования: сборник материалов. – М.: ИГЕМ РАН, 2018. – С. 274–278.

Поступила 25.08.2021 г.

#### Информация об авторах

**Легостаева Я.Б.**, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории металлогении Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН.

**Голлобова А.Г.**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории мерзлотных почв Научно-исследовательского института прикладной экологии Севера им. проф. Д.Д. Саввинова Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

UDC 631.4:504.5:622.7

## FEATURES OF DISTRIBUTION OF TRACE ELEMENTS IN SOILS OF BACKGROUND AND IMPACT ZONES IN DIAMOND MINING AREAS IN THE NORTHWEST OF THE SIBERIAN PLATFORM

Yana B. Legostaeva<sup>1</sup>,  
ylego@mail.ru

Anna G. Gololobova<sup>2</sup>,  
nuta0687@mail.ru

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

<sup>2</sup> D.D. Savvinov Research Institute of Applied Ecology of the North, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 43, Lenin avenue, Yakutsk, 677980, Russia.

**The study relevance** is caused by the intensive development of the mining industry in the study area, during which the environment is polluted with chemical substances in the conditions of the spread of permafrost. First, this is soil pollution with pollutants, which remain in the soil for many years, even after removing pollution sources. Therefore, this study makes it possible to identify the geochemical specificity of soils under the influence of anthropogenic activity.

**The main aim:** study of the elemental composition and their vertical distribution in the permafrost soils of North-West Yakutia exposed to technogenic impact in the conditions of diamond mining.

**Objects and Methods.** This article presents the results of the work performed for the period from 1994 to 2019 on the territory of the Daldyn kimberlite field, where the kimberlite pipes Udachnaya and Zarnitsa are being mined, and where the Udachny mining and processing plant of AK Alrosa (PJSC) is located. The object of study is the permafrost soils of the north-taiga landscapes of North-West Yakutia. The soils of this region reflect the general patterns of soil cover formation in the study area. They are part of the East Siberian permafrost-northern taiga region of the boreal soil belt of Russia. In field observations, a profile approach was applied, involving the collection of samples from all soil genetic horizons to the boundary of the seasonally thawed layer. The sign contents of 23 chemical elements were determined by the method of spectral-semiquantitative analysis.

**Results.** The geochemical studies of permafrost soils on the territory of the Udachninsky mining and processing plant are presented. To characterize the geochemical environment of soils, the coefficient of technogenic concentration ( $K_c$ ) and the coefficient of accumulation ( $K_0$ – $K_3$ ) of the studied elements were calculated. Accumulative series reflecting the geochemical specifics of the study area were built. Each of the studied soil types is characterized by the originality of the microelement spectrum. Polyelement associations are created as a result of the geochemical influence of the soil-forming substrate. It was revealed that the territory of the Daldyn-Alakit region is characterized by increased concentrations of Cr, Ni, Co, V, Cu, Pb, Li, Sr in soils.

### Key words:

Cryozems, regional background, natural geochemical anomaly, kimberlite pipes, trace elements, mining and processing division.

The paper was prepared with in the projects of the State Task of the Ministry of Education of the FUEM-2019-0003 «Ecological and geochemical study of man-made arrays in the territory of Yakutia diamond-bearing province» and RFFSRG-2020-0018 «Studying the features of Yakutia arctic and subarctic ecosystems functioning under conditions of increasing man-made impact and global climate change».

### REFERENCES

1. 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, vol. 331, no. 1, pp. 44–53. In Rus.
2. Basova I.A., Ioina M.A., Glukhova E.N. Geoeological condition of soil cover in mining regions. *Izvestiya Tuskogo gosudarstvennogo universiteta: nauki o zemle*, 2010, no. 1, pp. 16–20. In Rus.
3. Legostaeva Ya.B. *Prostranstvennaya i vnutriprofilnaya differentsiatsiya merzlotnykh pochv severo-zapadnoy Yakutii*. Diss. Kand. nauk [Spatial and intraprofile differentiation of permafrost soils in northwestern Yakutia. Cand. Diss.]. Ulan-Ude, 2005. 143 p.
4. Nyenda T., Gwenzi W., Jacobs S.M. Changes in physicochemical properties on a chronosequence of gold mine tailings. *Geoderma*, 2021, vol. 395, article 115037. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115037> (accessed 15 August 2021).
5. Ushakova T.I., Karavaeva P.A., Belkin P.A. Ecological state of soils of industrial territories (on the example of Berezniki, Perm region): comparison of domestic and foreign assessment methods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 58–70. In Rus.
6. Li X.Y., Liu L.J., Wang Y.G., Luo G.P., Chen X., Yang X.L., Hall M.H.P., Guo R., Wang H., Cui J., He X. Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China. *Geoderma*, 2013, vol. 192, pp. 50–58.
7. Liu X.M., Wu J.J., Xu J.M. Characterizing the risk assessment of heavy metals and sampling uncertainty analysis in paddy field by geostatistics and GIS. *Environmental pollution*, 2006, vol. 141, pp. 257–264.
8. Zhang Ch.Sh. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland. *Environmental Pollution*, 2006, vol. 142, pp. 501–511.
9. Richards B.K., Steenhuis T.S., Pevery J.H., McBride M.B. Metal mobility at an old, heavily loaded sludge application site. *Environmental Pollution*, 1998, vol. 99 (3), pp. 365–377.
10. Jiao X., Teng Y., Zhan Y., Wu J., Lin X. Soil heavy metal pollution and risk assessment in shenyang industrial district, Northeast China. *PLoS ONE*, 2015, vol. 10 (5): e0127736. DOI: 10.1371/journal.pone.0127736.
11. Zavalishin S.I., Zavalishina O.M., Shcheverdin A.I. Geochemical features of the profile distribution of heavy metals in soils of the middle taiga of the West Siberian lowland. *Bulletin of the Orenburg State Agrarian University*, 2005, vol. 4, pp. 36–38. In Rus.

12. Zenkov I.V. Review of foreign studies in the field of ecology of mining production. *Gornyi Zhurnal*, 2016, vol. 10, pp. 96–99. In Rus.
13. Benidire L., Benidire L., Boularbah A. Impacts of mining activities on soil properties: case studies from Morocco mine sites. *Soil Science Annual*, 2020, vol. 71 (4), pp. 395–407
14. Hooda P.S. A special issue on heavy metals in soils: editorial foreword. *Advances in Environmental Research*, 2003, vol. 8, pp. 1–3. DOI: 10.1016/S1093-0191(03)00030-3
15. Yezhov A.Yu. Technogenic pollution of landscapes of the north-west of the Kola Peninsula by heavy metals. *Vestnik MGOU. Ser. Natural Sciences*, 2010, vol. 1, pp. 98–103. In Rus.
16. Loska K., Wiechula D., Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment International*, 2004, vol. 30, pp. 159–165.
17. Mazurek R., Kowalska J.B., Gąsiorek M., Zadrozny P., Wiczorek J. Pollution indices as comprehensive tools for evaluation of the accumulation and provenance of potentially toxic elements in soils in Ojców National Park. *National Park Journal of Geochemical Exploration*, 2019, vol. 201, pp. 13–30. DOI: 10.1016/j.gexplo.2019.03.001.
18. Sorokina O.A., Kiselev V.I. Zagryaznenie pochv v zone osvoineniya Dzhaldindinskogo rossypnogo i rudnogo mestorozhdeniy zolota v Priamure [Soil contamination in the development zone of the Dzhaldindinsky placer and ore gold deposits in the Amur region]. *Ecology and industry in Russia*, 2005, vol. 7, pp. 24–28.
19. Doležalová-Weissmannová H., Mihočová S., Chovanec P., Pavlovský J. Potential ecological risk and human health risk assessment of heavy metal pollution in industrial affected soils by coal mining and metallurgy in Ostrava, Czech Republic. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, vol. 16 (22): 4495. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph16224495> (accessed 15 August 2021).
20. Ribas C.R., Schoeeder J.H., Schmidt F.A., Solar R.R.C., Valentim C.L., Campos R.B.F. Ants as indicators of the success of rehabilitation efforts in deposits of gold mining ailments. *Restoration Ecology*, 2012, vol. 20 (6), pp. 712–720.
21. Zgłobicki W., Telecka M., Skupiński S. Assessment of short-term changes in street dust pollution with heavy metals in Lublin (E Poland) – levels, sources and risks. *Environmental Science Pollution Research*, 2019, Res. 26, pp. 35049–35060. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06496-x> (дата обращения 15.08.2021).
22. Legostaeva Ya.B. The ecological significance of the microelement composition of the soils of the Daldyn kimberlite field. *Problems of regional ecology*, 2008, vol. 2, pp. 15–20. In Rus.
23. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Trefilova N.Ya., Achkasov A.I., Sargsyan S.Sh. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
24. Yagnyshev B.S., Yagnysheva T.A., Zinchuk M.N., Legostaeva Ya.B. *Ekologiya Zapadnoy Yakutii (geokhimiya geosistem: sostoyanie i problemy)* [Ecology of western Yakutia (geochemistry of geosystems: state and problems)]. Yakutsk, YSC SB RAS Publ. House, 2005. 432 p.
25. Yagnyshev B.S., Yagnysheva T.A., Andreev S.K. Vtorichnoe mineraloobrazovanie porod nizhnego paleozoya kak osnova mineralogo-geokhimicheskogo kartirovaniya pri poiskakh kimberlitov [Secondary mineral formation of the Lower Paleozoic rocks as the basis of mineralogical and geochemical mapping in the search for kimberlites]. *Tipomorfizm i geokhimicheskie osobennosti mineralov endogennykh obrazovaniy Yakutii* [Typomorphism and geochemical features of minerals of endogenous formations of Yakutia]. Yakutsk, Yakutsk branch of the Academy of Sciences USSR Publ., 1985. pp. 110–116.
26. Zinchuk N.N., Zinchuk M.N., Piznur A.V., Yagnyshev B.S. *Fakty mineraloobrazovaniya i nekotorye ekologicheskie aspekty kimberlitov* [Mineral formation factors and some ecological aspects of kimberlites]. Voronezh, Voronezh State University Publ., 2003. 110 p.
27. Yagnyshev B.S., Yagnysheva T.A. Geokhimicheskoe izucheniye Yakutskoy almazonosnoy provintsii (istoriya primeneniya metodov prikladnoy geokhimii, ikh rezultaty i perspektivy razvitiya) [Geochemical study of the Yakut diamondiferous province (history of application of methods of applied geochemistry, their results and development prospects)]. *Geologiya almazov – nastoyashchee i budushchee* [Geology of Diamonds – Present and Future]. Voronezh, Voronezh State University Publ., 2005. pp. 386–396.
28. Shepelev V.V., Tolstikhin O.N., Piguzova V.M., Nikitina N.M., Lomovtseva N.S., Ivanova L.D., Nekrasov I.A. *Merzlotno-gidrogeologicheskie usloviya Vostochnoy Sibiri* [Permafrost-hydrogeological conditions of Eastern Siberia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 191 p.
29. Korobkov I.G., Evstratov A.A. Models of basic volcano structures and their role in predictive assessment of closed territories of diamondiferous regions in the east of the Tunguska syncline. *Ores and metals*, 2011, vol. 3/4, Special issue in memory of A.I. Krivtsova, pp. 93–94. In Rus.
30. Zinchuk N.N., Yagnyshev B.S., Savvinov D.D., Stegnitsky Yu.B. *Ekologicheskaya mineralogiya – novoe napravlenie v praktike izucheniya tekhnogennykh landshaftov Yakutii* [Ecological mineralogy – a new direction in the practice of studying the technogenic landscapes of Yakutia]. *Geologiya, zakonmernosti rasprostraneniya, metody prognoza i poiskov mestorozhdeniy almazov. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Geology, distribution patterns, methods of forecasting and prospecting for diamond deposits. Materials of the scientific and practical conference]. Yakutsk, Yakutsk Research Geological Prospecting Enterprise TsNIGRI Publ., 1999. pp. 355–358.
31. Yagnyshev B.S. Poisk kimberlitov po pervichnym geokhimicheskim oreolam [Search for kimberlites by primary geochemical halos]. *Geologiya i rudonosnost Yakutii* [Geology and ore content of Yakutia]. Yakutsk, Yakutsk State University Publ., 1989. pp. 78–86.
32. Legostaeva Ya.B., Popov V.F., Ksenofontova M.I. Hydrogeological conditions and geoeological situation on the territory of underground technogenic storages during the utilization of drainage brines of the Udachinsky mining and processing plant. *Otechestvennaya geologiya*, 2018, vol. 3, pp. 93–102. In Rus. DOI: 10.24411/0869-7175-2018-10021.
33. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and diagnostics of soils in Russia]. Smolensk, Oikumena Publ., 2004. 342 p.
34. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources. 2014*. Rome, FAO, 2015. 192 p.
35. Arhegova I.B., Panyukov A.N., Kuznetsova E.G., Kovaleva V.A. The role of the biological factor in the process of soil formation in the taiga zone. *Bulletin of St. Petersburg State University. Ser. 3. Biology*, 2016, vol. 2, pp. 127–139. In Rus. DOI: 10.21638/11701/spbu03.2016.210.
36. Arhegova I.B. Environmental outlook – the basis for development. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2003, vol. 73 (2), pp. 114–116. In Rus.
37. Oparin N.A., Legostaeva Ya.B. Osobennosti sostava porod nazemnykh tekhnogennykh massivov Zapadnoy Yakutii [Features of the composition of rocks of terrestrial technogenic massifs of Western Yakutia]. *Novye poznaniya protsessov rudoobrazovaniya: sbornik materialov* [New knowledge of ore formation processes: collection of materials]. Moscow, IGEM Publ., 2018. pp. 274–278.

Received: 25 August 2021.

#### Information about the authors

**Yana B. Legostaeva**, Cand. Sc., leading researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Anna G. Gololobova**, Cand. Sc., senior researcher, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.