eISSN 2500-0632
https://mst.misis.ru/

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-188
УДК 550.424:504.064.2:631.4

Геоэкологическая оценка разных типов почв криолитозоны Западной Якутии в условиях функционирования алмазодобывающих предприятий

А. С. Титов[1], **А. С. Торопов**[2]
[1] *ООО «ЭКОСТАНДАРТ «Технические решения», г. Москва, Российская Федерация*
[2] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*
✉ *torop990@gmail.com*

Аннотация
Проблемы геоэкологических последствий горнодобывающих предприятий стоят особенно остро в арктических и приарктических районах, где распространение вечной мерзлоты значительно сокращает буферные способности ландшафтов. В статье представлены данные о содержании тяжелых металлов в почвенном покрове переходной зоны от среднетаежных к северотаежным ландшафтам Западной Якутии в условиях функционирования горнодобывающего производства и предложены подходы к оценке устойчивости разных типов почв к загрязнению тяжелыми металлами. Полевые и лабораторные работы проведены в августе 2022 г. Определение содержания тяжелых металлов проводилось методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Для анализа использовалось специализированное программное обеспечение – MS Excel 2013, Statistica 12.0, QGis 3.26.1. Расчет органических форм нахождения тяжелых металлов в почвенных растворах выполнен с помощью модели NICA-Donnan. В ходе исследования определена структура почвенного покрова Накынского кимберлитового поля в условиях функционирования горнопромышленного комплекса и составлена карта-схема почвенного покрова территории. Геохимический ряд изученных тяжелых металлов по степени концентрирования тяжелых металлов в почвах криолитозоны: Pb > Zn > Ni > Cu > Cd > As > Hg. Выявлены положительные зависимости между гумусом и Cd, Pb, Zn, а также проявление синергизма в парах Pb–Cd, Zn–Pb, Zn–Cu. Органическое вещество почв усиливает миграцию тяжелых металлов. Техногенное поступление в почвы криолитозоны Ni и Zn приведет к росту доли их подвижных форм. В палево-карбонатных и криоземах в большей степени подвижен Cd. Рассчитан региональный фоновый уровень тяжелых металлов для данных типов почв, который может быть использован в будущих работах при увеличении интенсивности горнодобывающих работ.

Ключевые слова
тяжелые металлы, загрязнение почв, таежно-мерзлотные почвы, криозёмы, алмазодобыча, нюрбинское кимберлитовое поле, мышьяк (As), кадмий (Cd), ртуть (Hg), свинец (Pb), медь (Cu), никель (Ni), цинк (Zn), Западная Якутия, формы миграции, геохимия, термодинамическое моделирование, NICA-Donnan

Благодарности
Авторы благодарят коллектив испытательной лаборатории ООО «ЭКОСТАНДАРТ «Технические решения» за предоставление тары, реагентов и выполнение аналитических исследований, а также руководство ООО «ЭКОСТАНДАРТ «Технические решения» за организацию полевых работ. Работа по изучению миграционных форм тяжелых металлов выполнена при поддержке гранта РНФ 23-27-00140.

Для цитирования
Titov A.S., Toropov A.S. Geoenvironmetal assessment of different types of cryolithic soils in Western Yakutia under the conditions of diamond-mining operations. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(2):170–182. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-188

© Титов А. С., Торопов А. С., 2024

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Geoenvironmetal assessment of different types of cryolithic soils in Western Yakutia under the conditions of diamond-mining operations

A.S. Titov[1], **A.S. Toropov**[2] ✉

[1] *ECOSTANDARD Technical Solutions LLC, Moscow, Russian Federation*

[2] *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

✉ *torop990@gmail.com*

Abstract

The problems of geoenvironmental consequences of mining operations are especially acute in the arctic and subarctic regions, where the spread of permafrost significantly reduces the buffering capacity of landscapes. The article presents data on the content of heavy metals in the soil cover of the transient zone between the middle taiga and north taiga landscapes of Western Yakutia under the conditions of mining operations and assesses the resistance of different types of soils to heavy metals pollution. Field and laboratory works were carried out in August 2022. The heavy metals content was determined by atomic absorption spectrometry. Specialized software was used for analysis, such as MS Excel 2013, Statistica 12.0, and QGis 3.26.1. Calculation of organic forms of heavy metals in soil solutions was performed using the NICA-Donnan model. In the course of studies, the structure of the soil cover in the Nakyn kimberlite field in the conditions of the mining industrial complex operation was determined and a sketch map of the soil cover of the territory was compiled. The geochemical series of the studied heavy metals is as follows according to the degree of concentration of heavy metals in cryolithic soils: Pb > Zn > Ni > Cu > Cd > As > Hg. Positive correlations between humus and Cd, Pb, Zn, as well as the occurrence of synergism in the Pb–Cd, Zn–Pb, Zn–Cu pairs were revealed. The soils organic matter enhances migration of heavy metals. The man-made input of Ni and Zn in cryolithic soils will lead to increase of mobile fraction. Cd is more mobile in pale-yellow carbonate and cryogenic soils. The regional background level of heavy metals for these types of soils was calculated, which can be used in future works when the intensity of mining operations increases.

Keywords

heavy metals, soil pollution, taiga-frozen soils, cryogenic soils, diamond mining, Nyurba kimberlite field, arsenic (As), cadmium (Cd), mercury (Hg), lead (Pb), copper (Cu), nickel (Ni), zinc (Zn), Western Yakutia, speciation, geochemistry, thermodynamic modeling, NICA-Donnan.

Acknowledgments

The authors thank the team of the testing laboratory of ECOSTANDARD Technical Solutions LLC for providing containers, reagents and performing analytical studies, as well as the management of ECOSTANDARD Technical Solutions LLC for arranging the field work. The work on the study of migration forms of heavy metals was supported by the RSF grant No. 23-27-00140.

For citation

Titov A.S., Toropov A.S. Geoenvironmetal assessment of different types of cryolithic soils in Western Yakutia under the conditions of diamond-mining operations. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(2):170–182. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-188

Введение

Крупные промышленные комплексы оказывают влияние на изменение физико-химических параметров почв криолитозоны [1], непосредственно на функционирование почвенного покрова и определяют интенсивность его техногенного загрязнения [2]. Техногенное загрязнение почв распространяется по преобладающему направлению ветров на значительные расстояния посредством атмосферного переноса поллютантов, образующихся в ходе работы тяжелой техники [3] и процессов пыления [4]. Территории постоянного отвода практически полностью трансформируются [5], естественные ландшафты переходят в техногенные, а за его пределами возможно образование локальных участков, характеризующихся повышенным содержанием химических элементов [6].

Расположение крупных промышленных комплексов в приарктических районах, где имеются малая мощность почвенного профиля, слабый дренаж территории, распространены многолетнемёрзлые породы, требует более глубокого изучения геоэкологических последствий добычи минерального сырья [7], поскольку они оказывают негативное влияние на способность почв к самовосстановлению, что также отмечает ряд авторов [8].

Вышеперечисленные факторы обусловливают необходимость исследования тяжелых металлов в почвенном покрове криолитозоны вблизи функционирования промышленных комплексов для формирования базы данных под комплексные геоэкологические исследования и мониторинг [9]. Актуальность исследования геохимических особенностей природной среды

на Дальнем Востоке РФ, в том числе в условиях активного протекания криогенных процессов, подчеркивается наличием современных исследований в таких регионах [10].

Исследования проводились на территории Нюрбинского района Республики Саха (Якутия) в пределах распространения Накынского кимберлитового поля (НКП) [11] (рис. 1). Цель исследования – анализ особенностей и закономерностей распределения валового содержания наряду с оценкой особенностей миграции, связанных с органическим веществом тяжелых металлов (ТМ) в почвах криолитозоны в условиях функционирования алмазодобывающих предприятий.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи: провести полевые геоэкологические исследования на рассматриваемой территории и отбор образцов почв, определить основные химические показатели и фактическое содержание ТМ в почвах, определить основные закономерности распределения ТМ в зависимости от химических показателей и типа почв и установить формы нахождения ТМ в водных вытяжках, произвести расчёт фоновых значений валового содержания Cd, Hg, Ni, Cu, Zn, Pb и As для дальнейших исследований.

НКП расположено в пределах Сибирской платформы, сложенной метаморфическими породами архея, перекрытой мощным осадочным чехлом V–J возраста. В аспекте регионального тектонического строения НКП расположено на сочленении Непско-Ботуобинской антеклизы, Сюгджерской седловины и Вилюйской синеклизы. Рельеф территории денудационный, представлен слабонаклонной равниной, которая в структурном плане приурочена к макросклону Марха-Хання-Накынского междуречья. Абсолютные отметки 220–248 м.

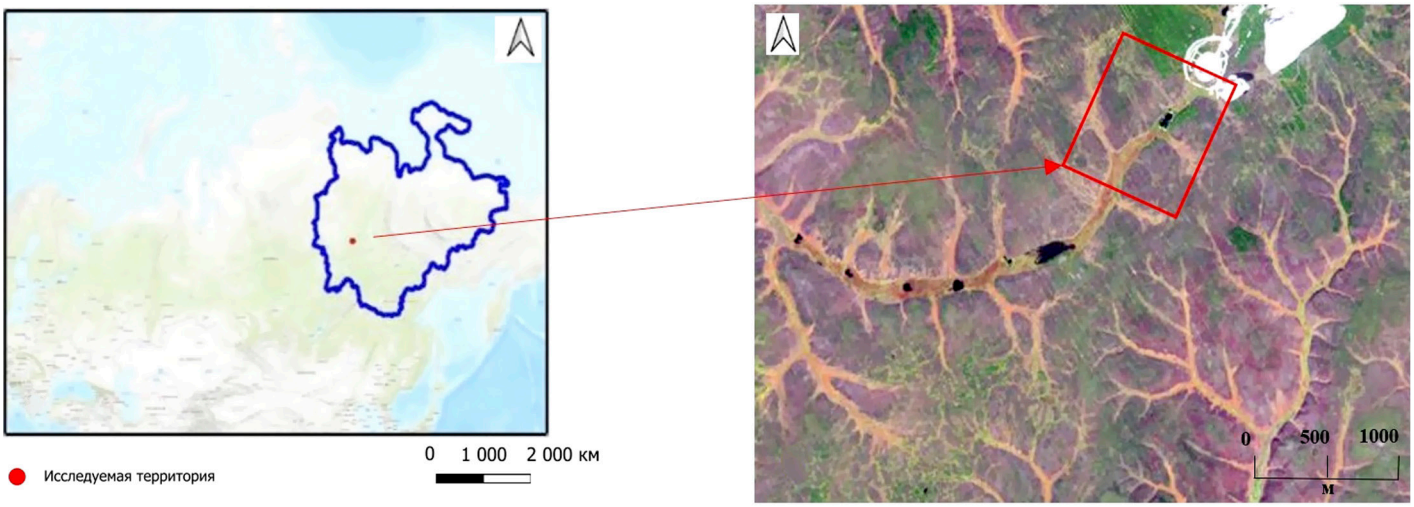
Климат района резкоконтинентальный, преобладает северо-западное направление ветров (27 %), однако доминирует штиль (36 %). Территория расчленена овражно-балочной сетью. Основной водной артерией является р. Дяхтар-Юряге (Приток Мархи). Почвенный покров относится к группе таежно-мерзлотных почв. По геоботаническому районированию территория относится к бореальному царству растительности центральносибирской провинции с преобладанием лиственницы Гмелина Larix Gmelinii (Rupr.) [11].

Объекты и методы исследования

Полевые работы проводились в 2022 г. на территории переходных ландшафтов Марха-Хання-Накынского междуречья (рис. 2). Часть исследований выполнена в пределах санитарно-защитной зоны (СЗЗ) горнопромышленного комплекса, часть за пределами СЗЗ, в соотношении 40/60. Для определения содержания тяжелых металлов в почвенном покрове примыкающей территории были заложены пробные площадки с пунктами изучения строения почв. По всей территории закладывались почвенные прикопки, на площадках с разными биотопами закладывались почвенные разрезы на глубину залегания многолетнемерзлых пород. Пробные площадки заложены с учетом розы ветров: половина пробных площадок заложена с подветренной стороны, другая – с наветренной. Основными источниками возможного загрязнения почвенного покрова при таком расположении служат площадка непосредственной разработки месторождения и ее инфраструктура.

Отбор проб и их транспортировка производились в соответствии с общепринятыми в геоэкологических исследованиях методами[1]. Всего на исследуемой территории было отобрано 54 пробы в 27 местах отбора.

[1] Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользования, ГОСТ 17.4.4.02 «Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа».



а *б*

Рис. 1. Карта-схема расположения исследуемой территории:
а – относительно РФ; *б* – космоснимок исследованной территории в R–G–B

В отобранных образцах определялось валовое содержание следующих тяжелых металлов: Cd, Hg, Ni, Cu, Zn, Pb и As, методом атомно-абсорбционной спектрометрии на спектрометре «Квант-Z». Физико-химические показатели определены потенциометрическим методом (pH), методом колориметрии – содержание органического вещества по И.В. Тюрину, гранулометрический состав в полевых условиях по Качинскому, лабораторные исследования – ситовым анализом. Полученные количественные данные были обработаны с использованием программ Microsoft Excel 2013, Statistica 12.0, картографический материал составлен с помощью программного обеспечения – Quantum GIS 3.26.1.

Для интегральной оценки применялся стандартный расчет показателя суммарного загрязнения – Z_c [12]:

$$Z_c = \sum (K_{c_i} + \ldots + K_{c_n}) - (n-1),$$

где K_{c_i} – коэффициент концентрации i-го компонента; n – число суммируемых K_c,

$$K_c = \frac{C_i}{C_\text{ф}},$$

где C_i – фактическое содержание элемента; $C_\text{ф}$ – фоновое содержание элемента.

Ранжирование принято условно в соответствии с действующими НД: 16 – допустимая; 16–32 – умеренно-опасная; 32–128 – опасная; ⩾128 – чрезвычайно опасная [12].

Формы миграции элементов в водорастворимой фракции (1 : 10) почв рассчитывались с помощью комплекса Minteq 3.1 с учетом pH, основных анионов и катионов, а также концентраций растворенного органического углерода по модели NICA-Donnan с соотношением фульвокислот и гуминовых 1 : 8.

Для оценки экологического состояния почв принято использовать эталонное (фоновое) содержание в них различных элементов, однако на сегодняшний день обширные фоновые исследования для валового содержания ТМ для данной территории или в схожих условиях не проводились. Сравнение предлагается провести на основе собственных фоновых исследований, $n = 5$.

Результаты и их обсуждение

В пределах исследуемой территории распространены криоземы, палевые карбонатные почвы и торфяно-болотные почвы (рис. 3).

Криоземы гомогенные высокомерзлотные (рис. 4, *а*) имеют мощность до 42 см, бесструктурные, плывучие. Гранулометрический состав близок

а *б*

Рис. 2. Проведение работ по исследованию почвенного покрова:
а – подготовка к проходке шурфа; *б* – проходка шурфа

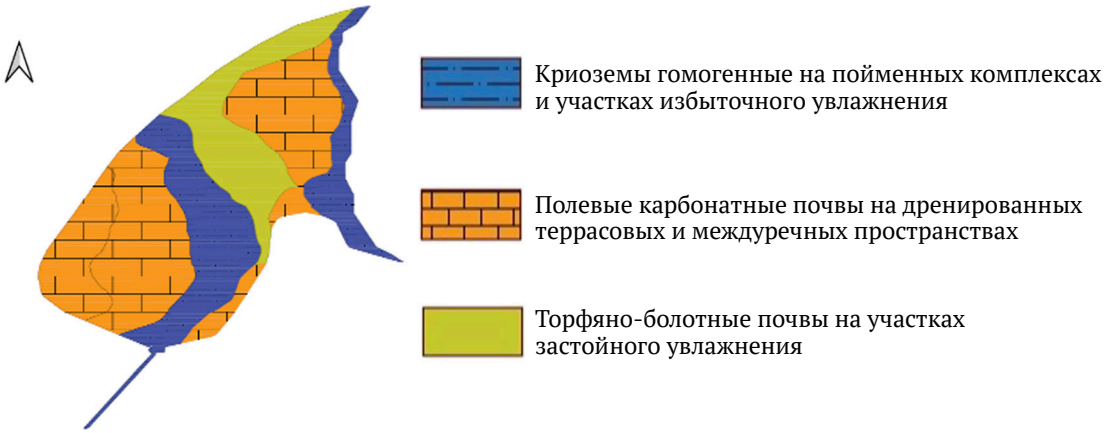


Рис. 3. Схематическая карта почвенных условий исследованной территории (1 : 5000)

к легким суглинкам, поверхность мерзлоты мелковолнистая. Верхние горизонты слабокислые, нейтрализуются с глубиной, кислотность почв находится в прямой зависимости с органическим веществом, что типично для таких почв [13].

Торфяно-болотные почвы (рис. 4, *б*) сформированы в пределах олиготрофных болот и на участках локальных понижений. Эти почвы развиты до 40 см, нижний горизонт обводнен.

Палевые карбонатные почвы (рис. 4, *в*) на исследуемой территории являются доминантными и занимают до 69 % территории. Данный тип почв обладает большей мощностью профиля – до 64 см, сформированы на песчано-легко-суглинистом субстрате в старом русле р. Дяхтар Юряге, мерзлотный слой залегает под аллювиальными отложениями.

Криоземы занимают преимущественно слабонаклонные участки Дяхтар-Накынского междуречья, формируются на криогенных формах рельефа (рис. 5, *а* – булгуняхи, слабополигональный рельеф). Подтип – гомогенные маломощные криоземы высокомерзлотные. Диагностируются преимущественно по следам криотурбации внутри профиля [14].

Торфяно-болотные почвы (рис. 5, *б*) приурочены к долине р. Дяхтар-Юряге (рис. 5, *б*). По результатам исследований установлено, что почвенные группировки обладают относительно однородным строением и мощностью. Растительный покров однороден, в древостое доминирующий вид – *Larix Gmelinii*, в примеси – береза повислая *Betula Alba* (Roth.), состояние древостоя в междуречных и террасовых комплексах – подавленное, отмечаются дехромация, реже дефолиация, в пойменных – удовлетворительное [15].

Палевые карбонатные почвы (рис. 5, *в*). Формируются как на сплошных массивах *Larix Gmelinii*, так и на лесных опушках, покрытых преимущественно кустарничковыми видами – брусникой *Vaccinium vitis-idaea* (L.) Avror., голубикой *Vaccinium uliginosum* (L.), водяникой *Empetrun nigrum* (L.), на обширных зарослях кладонии звездчатой *Cladonia stellaris* (Opiz.) Pouzar&Vezda и оленьей *Cladonia rangiferina* (L.) Weber&Wigg (рис. 5, *в*).

а *б* *в*

Рис. 4. Характерное строение почвенного профиля:
а – исследованных криоземов; *б* – торфяно-болотных почв; *в* – палевых карбонатных почв

а *б* *в*

Рис. 5. Общий вид на участки:
а – вскрытых криоземов; *б* – торфяно-болотных почв; *в* – палевых карбонатных почв

Для исследованных криоземов характерно в целом невысокое содержание гумуса в верхнем горизонте (в среднем 0,73±0,05 %) с резким характерным увеличением в нижнем слое за счет криотурбации (V = 12/56 %) (табл. 1). Глинистая фракция относительно однородна в пределах 24,0–29,1 %, что соответствует тяжелопесчаным-легкосуглинистым грунтам. Реакция среды в исследуемых горизонтах изменяется от слабокислой до слабощелочной, отсутствует характерное распределение в горизонтах за счет криотурбации.

Содержание гумуса в верхних горизонтах палевых карбонатных почв в целом равномерное, в нижележащем горизонте содержание гумуса резко сокращается. Глинистая фракция варьирует от 16,8 до 39,1 % в верхнем горизонте и 20–31 % в нижнем, что соответствует легким суглинкам с незначительными супесчаными прослоями. Реакция среды типична для палевых карбонатных почв – изменяется с глубиной по профилю от кислой к щелочной.

В торфяно-болотных почвах заметно снижается общее содержание гумуса, среда с глубиной изменяется от нейтральной до слабокислой-кислой. Содержание физической глины от 9 до 29 %, что соответствует песчаным и легкосуглинистым грунтам.

При этом наиболее высокие содержания гумуса отмечаются на периферийных участках исследуемой территории в непосредственной близости к объектам транспортной и производственной инфраструктуры с наветренной стороны. При относительной однородности почвенно-растительных условий, отличия в содержании гумуса могут быть охарактеризованы повышением содержания не только гумуса, но и негуминовой части органического вещества за счет включения техногенного воздействия [16]. Это может приводить к подкислению органогенных горизонтов почв и повышению миграционных свойств ТМ с увеличением их концентрации в будущем [17].

Таблица 1

Результаты химических исследований отобранных почв

Показатель	Горизонт	Глубина, см	Размах варьирования Limit	Среднее и его ошибка $x \pm S_x$	Коэффициент вариации V, %
Криоземы гомогенные высокомерзлотные					
Гумус, %	T	7...24	0,60...0,83	0,73±0,05	12
	Cr	24...43	0,42...2,44	1,29±0,36	56
pH водный	T	7...24	6,8...7,1	7,00±0,06	2
	Cr	24...43	6,1....7,6	6,93±0,27	8
pH солевой	T	7...24	3,9...4,6	4,25±0,01	7
	Cr	24...43	4,5...6,7	5,13±0,46	18
Физическая глина, %	T	7...24	22,3...26,7	24,0±0,9	7
	Cr	24...43	24,0...36,7	29,10±2,62	18
Палевые карбонатные почвы					
Гумус, %	A_{1K}	2...26	0,95...8,53	1,9±0,7	116
	B_K–BC_K	26...53	0,2...3,6	0,8±0,3	119
pH водный	A_{1K}	2...26	5,1...5,9	5,60±0,09	6
	B_K–BC_K	26...53	6,2...7,1	6,85±0,08	4
pH солевой	A_{1K}	2...26	4,1...5,9	4,10±0,17	4
	B_K–BC_K	26...53	4,1...4,4	4,25±0,04	12
Физическая глина, %	A_{1K}	2...26	16,8...39,1	30,50±2,14	27
	B_K–BC_K	26...53	20,2...40,0	27,05±1,34	22
Торфяно-болотные почвы					
Гумус, %	O	5–14	0,8...5,8	2,36±0,80	77
	T	14–36	0,1...1,3	0,80±0,22	61
pH водный	O	5–14	5,6...7,3	6,76±0,30	9
	T	14–36	5,5...6,2	6,00±0,11	4
pH солевой	O	5–14	4,1...5,5	4,6±0,2	11
	T	14–36	3,6...4,0	3,84±0,06	4
Физическая глина, %	O	5–14	21,5...28,3	25,12±1,10	10
	T	14–36	9,0...29,9	22,20±3,14	32

Примечание. Обозначения почвенных горизонтов приведены в соответствии с классификацией почв 2004 г.

Содержание ТМ относительно однородно (табл. 2), практически не наблюдается резких пиков по выборке проб, повышенное содержание отмечается по всем исследуемым ТМ (за исключением As и Hg). Накопление происходит в верхних горизонтах по Ni, Cu, реже по Cd, в нижних горизонтах преимущественно по Cd, Pb, Zn. Тем не менее такие различия слабоконтрастные. Увеличение контрастности накопления металлов в почвенных горизонтах будет свидетельствовать об усилении техногенной нагрузки и преобразовании ландшафта.

По средним значениям содержание ТМ выше в нижних горизонтах. Анализируя характер накопления ТМ, можно сказать, что верхние горизонты накапливают ТМ преимущественно через механизм сорбции их органическими компонентами в условиях слабокислой среды и слабого дренажа – формируются преимущественно кислородные сорбционные физико-химические барьеры. Для нижних горизонтов характерна аккумуляция в условиях нейтральной и слабощелочной среды, в почвенном профиле для этих глубин отмечается слабое развитие глеевых процессов в виде сизоватых пятен и примазок. Таким образом, справедливым будет заключение о формировании глеевых щелочных физико-химических барьеров в надмерзлотных горизонтах [14]. Содержание ТМ в верхнем слое в порядке убывания можно записать в следующем виде: Pb > Zn > Ni > Cu > Cd > As > Hg.

Для нижних слоев запись идентична, изменяются лишь концентрации отдельных элементов. При этом содержание Pb, Zn, Cu в торфяно-болотных почвах выше, чем в палевых и криоземах. Это обусловлено более высоким содержанием гумуса в почвенном профиле и геохимической спецификой (рис. 6).

Таблица 2

Результаты исследования ТМ в отобранных почвах

Показатель	Горизонт	Размах варьирования Limit	Среднее и его ошибка $x \pm S_x$	Коэффициент вариации V, %	Фоновые значения, n = 5
pH	Верхний	5,2...8,1	7,00±0,14	10	-
	Нижний	6,1...8,1	7,09±0,10	7	
Мышьяк As	Верхний	Менее 0,05			Менее 0,05
	Нижний	Менее 0,05			
Кадмий Cd	Верхний	0,65...4,00	1,52±0,18	62	1,04
	Нижний	0,53...3,80	1,52±0,14	48	
Ртуть Hg	Верхний	Менее 0,005			Менее 0,005
	Нижний	Менее 0,005			
Свинец Pb	Верхний	31...120	56±4	33	50
	Нижний	39...155	58±5	43	
Медь Cu	Верхний	3,22...21,90	6,80±0,87	68	9
	Нижний	2,8...28,9	7,77±1,40	93	
Никель Ni	Верхний	16,9...28,6	22,9±0,5	12	21
	Нижний	19,2...37,0	24,00±0,74	16	
Цинк Zn	Верхний	18,6...51,0	35,6±2,1	31	34
	Нижний	18,6...52,0	36,6±2,0	28	

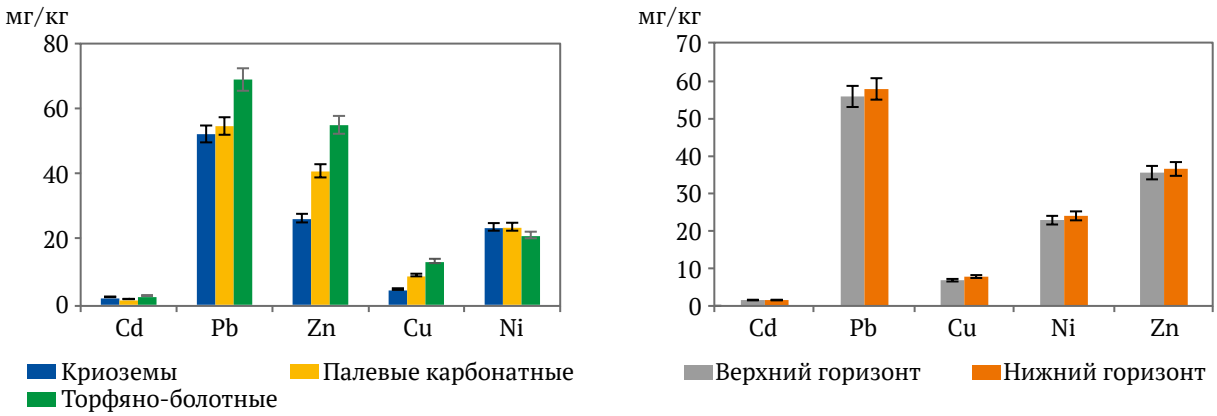


Рис. 6. Распределение содержания тяжелых металлов в почвах в зависимости от типа почв (слева) и от почвенного горизонта (справа)

С учетом весьма однородного пространственного распределения ТМ в поверхностном слое почвы как с наветренной, так и с подветренной сторон, можно сделать вывод об отсутствии либо труднодиагностируемом доступными методами техногенном воздействии как таковом, исключением являются несколько пробных площадок, отобранных в зоне непосредственного примыкания к отвалу горных пород – здесь фиксируются максимальные концентрации исследованных ТМ. Однако, учитывая металлогению района, это может иметь также преимущественно природное происхождение, поскольку соотношение рудных элементов сохраняется. К аналогичным выводам для сопряженных с горнодобывающими районами ландшафтов криолитозоны приходят и другие авторы [3]. Отмечается и повышенное относительно остальных проб содержание органического вещества в почвах на этих участках. Собственных исследований по структуре выбросов на территории предприятия не проводилось. Анализ государственных докладов Республики Якутия показал, что в структуре выбросов преобладают газы, 50–65 % из них приходится на оксид углерода.

Корреляционный анализ показывает наличие взаимосвязи между концентрациями ТМ при уровне значимости < 0,05 и гумусом (рис. 7). Положительные зависимости просматриваются между гумусом и Cd, Pb, Zn. Синергизм среди изучаемых ТМ отражается в следующих парах: Pb-Cd, Zn-Pb, Zn-Cu.

Значения коэффициентов концентрации (КК) содержания ТМ в почвенном покрове, превышающие фон, отмечаются по всей выборке проб по Cd, Pb, Ni, Zn. Значения КК по Cu выше единицы в 87 % случаев, данный элемент имеет тенденцию к накоплению в верхних горизонтах. Основу структуры коэффициентов концентрации составляет кадмий, в меньшей степени – свинец и никель. Суммарный показатель загрязнения варьируется в пределах от 2 до 10 (см. рис. 3) со средним значением 6. Согласно критериям [12], ранжировать территорию можно по одному уровню загрязнения – «Допустимая» (100 % территории). Важно отметить, что показатель суммарного загрязнения разработан для почв селитебных территорий, и не вполне корректно применять его к естественным территориям (включая подверженные техногенезу), может служить справочно-информационным показателем и применение действующих градаций в соответствии с НД является условным. Степень воздействия на геосистемы следует оценивать с помощью комплексных исследований [16].

По рассмотренной группе почв структура суммарного показателя загрязнения отличается (рис. 8). Для палевых карбонатных почв характерно преобладание кадмия и никеля, наиболее высокие коэффициенты концентрации имеет кадмий (ККмах – 5.4 ед). В торфяно-болотных почвах кадмий и медь также демонстрируют высокую долю в структуре суммарного показателя загрязнения. Это может быть обусловлено более высоким содержанием органических соединений и преобладанием гуминовых веществ в профиле этих почв. В исследованных криоземах сложно выявить определенные закономерности в содержании ТМ за счет отсутствия четкой дифференциации содержания химических элементов в профиле этих почв. В структуре суммарного показателя загрязнения преобладает свинец.

Также об отсутствии либо малой проявленности на исследованной территории техногенной составляющей может говорить однородное распределение концентраций ТМ в верхнем горизонте относительно нижнего – лишь на участках, примыкающих к отвалу горных пород, коэффициент накопления увеличивается в 1,7–3,2 раза.

Показатель	Гумус, %	pH	Cd	Pb	Zn	Cu	Ni
Гумус, %		–0,40	0,45	0,31	0,32	–0,06	0,06
pH	–0,40		–0,03	–0,05	–0,12	–0,05	–0,15
Cd	0,45	–0,03		0,52	–0,28	–0,43	–0,12
Pb	0,31	–0,05	0,52		0,34	–0,22	0,10
Xn	0,32	–0,12	–0,28	0,34		0,30	–0,07
Cu	–0,06	–0,05	–0,43	–0,22	0,30		0,06
Ni	0,06	–0,15	–0,12	0,10	–0,07	0,06	

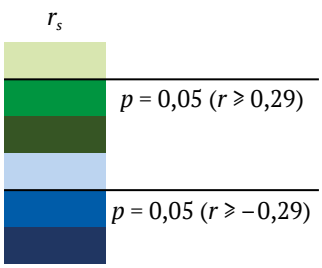


Рис. 7. Коэффициенты корреляции Спирмена между гумусом и тяжелыми металлами

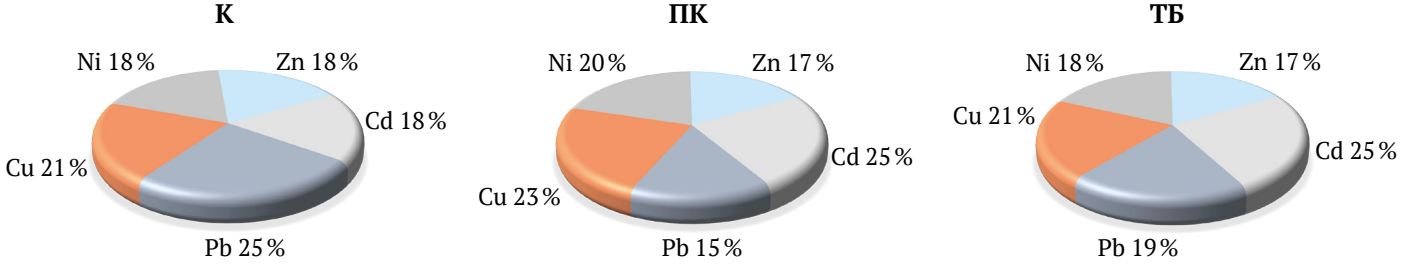


Рис. 8. Структура Z_c в исследованных почвах:
К – криоземы; ПК – палевые карбонатные почвы; ТБ – торфяно-болотные почвы

Особенности распределения химических элементов ТМ в почвенном покрове могут быть охарактеризованы металлогеническими особенностями самой территории, в меньшей степени наличием рассмотренных ТМ в структуре выбросов от алмазодобычного производства [17]. Важно отметить, что рассматриваемая территория относится к Вилюйско-Мархинской системе глубинных разломов. В целом для депонирующей среды в районе таких структур характерно формирование геохимических аномалий в виде ореолов рассеивания преимущественно сидерофильных (Fe, Ni, Co) и халькофильных (Zn, Cd, Cu, Pb, S) элементов [18]. Незначительный вклад техногенного воздействия в структуре показателя суммарного загрязнения почв действительно приурочен к территориям, примыкающим к объектам ГОК. Это может быть обусловлено как металлогенией района, так и преобладанием штилей, а атмосферный перенос при преобладании северо-западных ветров ожидаем на значительном удалении от этих объектов [19].

Техногенное поступление тяжелых металлов в результате горнодобывающих работ будет сопровождаться увеличением доли наиболее подвижных форм этих элементов. Как показывают многочисленные геоэкологические исследования, наибольшая доля элементов в почвах прочно связана с ее минеральными и органоминеральными компонентами. В связи с этим интерес был направлен на изучение миграционной способности изученных элементов в наиболее подвижной форме – водорастворимой (рис. 9). Установление преобладающих форм нахождения металлов и их связывание с природными органическими лигандами может обосновывать прогноз изменения экологической обстановки и изменение списка приоритетных поллютантов [18].

Несмотря на то что в водорастворимой вытяжке мобилизуется небольшая доля (до 2%) от общего органического углерода в почве и примерно такая же аналогичная доля от валового содержания металлов (до 2,5%), именно эта фракция наиболее подвижна в экосистемах и способна включаться в биологический круговорот.

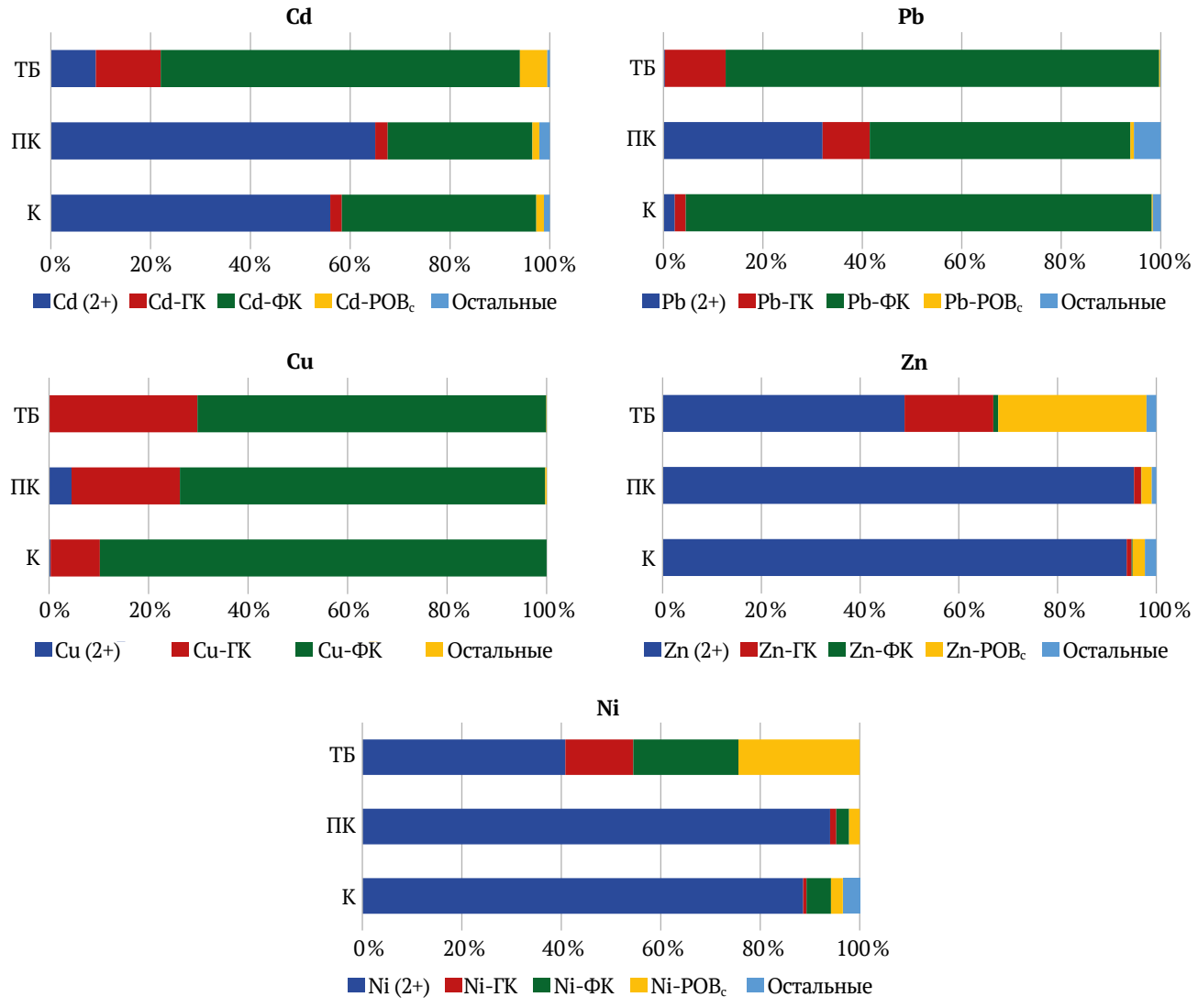


Рис. 9. Формы нахождения тяжелых металлов в водорастворимой фракции почв: К – криоземы; ПК – палевые карбонатные почвы; ТБ – торфяно-болотные почвы; Ме-ГК – комплексы с гуминовыми кислотами; ФК – комплексы с фульвокислотами; Ме-РОВ$_c$ – слабо (электростатически) связанные с органическим веществом (Доннановская фаза)

По данным термодинамического моделирования изученные элементы распределились на две группы: преимущественно связанные с фульвокислотами (Cu, Cd, Pb) и находящиеся в виде свободных ионов (Zn и Ni). Свободные ионы являются наиболее доступной формой для включения металлов в биологический круговорот. Она же является наиболее токсичной. Таким образом, при поступлении в почвы криолитозоны изучаемой территории без учета класса опасности никель и цинк будут максимально подвижными элементами. Кадмий будет в большей степени подвижен в палево-карбонатных и криоземах. Наиболее прочно связанным с природными органическими веществами во всех типах почв является медь. Часть цинка и никеля в торфяных болотных почвах слабо связана с органическим веществом. При изменении геохимической обстановки эти металлы могут переходить как в форму свободных ионов, так и более прочно связываться с гуминовыми веществами.

Изученные типы почв по доле подвижности водорастворимых форм тяжелых металлов образуют следующий ряд: палевые карбонатные < криоземы < торфяно-болотные.

Таким образом, наименьшей экологической емкостью по отношению к тяжелым металлам можно считать палевые карбонатные почвы, которые доминируют на данной территории. Однако с учетом рельефа можно предположить, что при дренировании территории палевых карбонатных почв осадками существенная доля растворимых форм металлов будет поступать на территорию с застойным увлажнением (торфяно-болотные почвы), где токсичность металлов будет частично нивелироваться.

В настоящие время нормирование почвенного покрова на содержание ТМ предлагается проводить в соответствии с действующими ПДК, а при их отсутствии – с ОДК. Данное предложение вызывает сомнения, т.к. ПДК/ОДК не учитывают региональные биогеохимические особенности территории. При отсутствии установленных ПДК/ОДК предлагается использовать установленный региональный фон, но и он рассчитан не во всех регионах и не для всех почв.

Ввиду длительного функционирования и эволюции почвенного покрова в условиях относительно близкого расположения действующего горно-обогатительного комбината полученные данные по валовому содержанию ТМ могут быть использованы в качестве фоновых значений для дальнейших исследований и контроля состояния почвенного покрова при мониторинге и производственном контроле.

На основании результатов исследования почв были рассчитаны фоновые значения для изученных почв. Распределение ТМ в выборках торфяно-болотных почв и палевых карбонатных почв подчиняется закону Гаусса. При таком распределении фоновые значения могут быть определены как математическое ожидание нормально распределённой выборки с учетом утроенного стандартного отклонения. Для определения фоновых значений содержания ТМ в криозёмах объем выборки был недостаточен, к тому же криотурбационные процессы в профиле почвы предопределяют сложные условия распределения химических элементов в самих почвах.

С позиции отсутствия данных по фоновому содержанию для дальнейших исследований факт истинного загрязнения и его динамику предлагается устанавливать с помощью полученных данных о верхней границе фонового содержания ТМ в торфяно-болотных и палевых карбонатных почвах (табл. 3).

Таблица 3

Расчет фоновых значений для палевых карбонатных и торфяно-болотных почв

ТМ	Минимум	Максимум	Математическое ожидание u	Расчетный фон $u + 3\sigma$
Торфяно-болотные почвы, n = 18				
Мышьяк As	Менее 0,05			
Кадмий Cd	0,8	4,0	2,0	5
Ртуть Hg	Менее 0,005			
Свинец Pb	31,0	72,0	51,0	81,0
Медь Cu	5,9	10,3	8,0	13
Никель Ni	19,2	28,5	23,0	32
Цинк Zn	18,6	50	31,0	80
Палевые карбонатные почвы, n = 26				
Мышьяк As	Менее 0,05			
Кадмий Cd	0,53	3,50	1,0	3
Ртуть Hg	Менее 0,005			
Свинец Pb	39,0	107,0	53,0	102
Медь Cu	3,31	28,9	10,0	32
Никель Ni	16,9	37,0	24,0	37
Цинк Zn	24,0	52	41	67

Для данной территории рекомендуется проведение локального экологического мониторинга состояния природных ландшафтов в зоне непосредственного функционирования горнодобывающего производства. Валовое содержание ТМ может быть использовано в качестве оценки общего состояния территории, в рамках же определения воздействия необходим переход к подвижным формам ТМ в системе «почва-фитоценоз–зооценоз». Пробные площадки необходимо расположить с учетом розы ветров на наиболее типичных биотопах, для отбора проб органов растений стоит принимать наиболее типичные виды – *Larix Gmelinii, Vaccinium vitis-idaea, Vaccinium uliginosum, Cladonia stellaris*. При этом сам факт воздействия или его отсутствие рекомендуется определять только при комплексных исследованиях.

Заключение

Результаты исследования показывают высокое содержание кадмия, свинца, никеля и меди в почвенном покрове в непосредственной близости функционирования алмазодобычного производства. Анализ коэффициентов концентрации показывает, что верхние горизонты накапливают ТМ путем их сорбции гумусом в условиях слабокислой среды и слабого дренажа – на кислородном сорбционном физико-химическом барьере. Для нижних горизонтов характерна аккумуляция в условиях нейтральной и слабощелочной среды, в почвенном профиле на глеевом щелочном физико-химическом барьере в надмерзлотных горизонтах. Геохимическое представление ряда ТМ в почвенном покрове исследуемой территории характеризуется как: Pb > Zn > Ni > Cu > Cd > As > Hg. Были составлены корреляционные ряды ТМ, которые отражают положительные зависимости между гумусом и Cd, Pb, Zn, а также проявление синергизма в парах Pb–Cd, Zn–Pb, Zn–Cu. Ранжировать территорию можно по одному уровню загрязнения – «Допустимый». Увеличение содержания ТМ в почвенном покрове проявляется по мере приближения к промышленным площадкам горно-обогатительного комплекса.

Палевые карбонатные почвы обладают наименьшей среди изученных почв буферностью по отношению к тяжелым металлам исходя из структуры форм их нахождения в наиболее подвижной водорастворимой фракции. Среди изученных поллютантов наибольшую склонность к связыванию природными органическими лигандами выявили для таких элементов, как свинец и медь. Цинк и никель будут активно мигрировать в ионной форме. Кадмий занимает промежуточное положение по соотношению ионных и органически связанных форм.

Данные, приведенные в исследовании, ввиду отсутствия аналогичных исследований могут быть использованы при контроле состояния почвенного покрова в зоне добычи алмазов в пределах Накынского кимберлитового поля, в границах СЗЗ горно-обогатительных комбинатов, а также в качестве целевых показателей при последующей рекультивации нарушенных земель.

Список литературы / References

1. Гололобова А.Г., Легостаева Я.Б. Экогеохимический мониторинг почвенного покрова на участках алмазодобычи в Западной Якутии. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(12):146–157. https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2948
Gololobova A.G., Legostaeva Ya.B. Ecogeochemical monitoring of soil cover on diamond mining site in Western Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(12):146–157. (In Russ.) https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2948
2. Demkova L., Jezny T., Bobulska L. Assessment of soil heavy metal pollution in a former mining area – before and after the end of mining activities. *Soil & Water Research*. 2017;12(4):229–236. https://doi.org/10.17221/107/2016-SWR
3. Елсукова Е.Ю., Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю. Техногенная трансформация потоков тяжелых металлов в почвах в зоне воздействия медно-никелевого производства. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2019;(12):118–124. https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.024
Elsukova E.Yu., Opekunova M.G., Opekunov A.Yu. Technogenic transformation of heavy metal streams in soils in regions under influence of copper-nickel production. *International Research Journal*. 2019;(12):118–124. (In Russ.) https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.024
4. Высоцкая Н.А., Пискун Е.В. Основные факторы неблагоприятного воздействия на окружающую среду деятельности калийного производства и способы ее защиты. *Горные науки и технологии*. 2019;4(3):172–180. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2019-3-172-180
Vysotskaya N.A., Piskun E.V. The Main Factors of Adverse Environmental Impact of Potash Production and Methods of Environmental Protection. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2019;4(3):172–180. (In Russ.) https://doi.org/10.17073/2500-0632-2019-3-172-180
5. Сорокина О.А., Киселев В.И. Химическое загрязнение почв в зоне освоения Джалиндинского россыпного и рудного месторождений золота. *Экология и промышленность России*. 2005;(7):24–28.
Sorokina O.A., Kisselev V.I. Chemical pollution of soils in the area of development of Dzhalindinsky alluvial and ore deposits of gold (Amur region). *Ecology and Industry of Russia*. 2005;(7):24–28. (In Russ.)

6. Басова И.А., Иватанова Н.П., Копылов А.В. Оценка экологического состояния почв в регионах развитой горной промышленности. *Известия Тульского государственного университета. Естественные науки*. 2012;(1–2):14–16.
Basova I.A., Ivatanova N.P., Kopylov A.V. Assessment of the ecological state of soils in regions of developed mining industry. *Proceeding of Tula State University. Natural Sciences*. 2012;(1–2):14–16. (In Russ.)
7. Gololobova A.G., Legostaeva Ya.B. The stability of frozen soils in conditions of development of mining industry. In: *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2017. Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems Conference Proceedings*. Albena, Bulgaria. 2017;17:655–662.
8. Легостаева Я.Б., Попов В.Ф., Козлова И.Г. и др. Тектоническая обстановка и эколого-геохимическая ситуация Накынского кимберлитового поля. В: *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. 5–7 апреля 2021 г.* Якутск: Изд. дом СВФУ; 2021. С. 388–390. https://doi.org/10.52994/9785751331399_2021_103
Legostaeva Ya., Popov V., Kozlova I. et al. Tectonic and eco-geochemical situation of the Nakyn Kimberlite Field. In: *Geology and Mineral Resources of the North-East of Russia: Materials of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference*. April 5–7, 2021. Yakutsk: North-Eastern Federal University Publ. House; 2021. Pp. 388–390. (In Russ.) https://doi.org/10.52994/9785751331399_2021_103
9. Зверева В.П., Фролов К.Р., Лысенко А.И. Формирование рудничных вод в Дальневосточном регионе России и их влияние на экосферу и здоровье населения. *Горные науки и технологии*. 2022;7(3):203–215. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-3-203-215
Zvereva V.P., Frolov K.R., Lysenko A.I. Formation of mine drainage in the Far Eastern region and its impacton the ecosphere and public health. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2022;7(3):203–215. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-3-203-215
10. Серебряков Е.В., Гладков А.С., Кошкарев Д.А. Трехмерные структурно-вещественные модели формирования кимберлитовых трубок Нюрбинской и Ботуобинской (Якутская алмазоносная провинция). *Геодинамика и тектонофизика.* 2019;10(4):899–920. https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-4-0448
Serebryakov E.V., Gladkov A.S., Koshkarev D.A. Three-dimensional structural-material models of the formation of the Nurbinskaya and Botuobinskya kimberlite pipes. *Geodynamics & Tectonophisics*. 2019;4(4):899–920. (In Russ.) https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-4-0448
11. Килижеков О.К., Толстов А.В. Новые возможности прироста запасов алмазов в Средне-Мархинском районе Якутии. В: *Труды рабочего совещания. Месторождения алмазов: процессы формирования, закономерности локализации, методы прогнозирования и поисков. Материалы встречи*. Новосибирск; 2016. С. 54–60.
Kilizhekov O.K., Tolstov A.V. New opportunities for the growth of diamond reserves in the Sredne-Markhinsky district of Yakutia. In: *Proceedings of the Workshop. Diamond Deposits: Formation Processes, Localization Patterns, Forecasting and Prospecting Methods. Materials of the Meeting*. Novosibirsk; 2016. Pp. 54–60. (In Russ.)
12. Ершов Ю.И. Криогенные почвы на породах трапповой формации Центральной Сибири. *Почвоведение*. 2022;(6):657–672. https://doi.org/10.31857/S0032180X22060053 (Пер. вер.: Yershov Y.I. Cryogenic soils on the trappean rocks of Central Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2022;55(6):695–709. https://doi.org/10.1134/S1064229322060059)
Yershov Y.I. Cryogenic soils on the trappean rocks of Central Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2022;55(6):695–709. https://doi.org/10.1134/S1064229322060059 (Orig. ver.: Yershov Y.I. Cryogenic soils on the trappean rocks of Central Siberia. *Pochvovedenie*. 2022;(6):657–672. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S0032180X22060053)
13. Мотузова Г.В. *Устойчивость почв к химическому воздействию*. М.: Изд-во МГУ; 2000. 57 с.
Motuzova G.V. *Soil resistance to chemical effects*. Moscow: Moscow State University Publ. House; 2000. 57 p. (In Russ.)
14. Легостаева Я.Б., Шадрина Е.Г., Солдатова В.Ю., Дягилева А.Г. Эколого-геохимическая и биоиндикационная оценка трансформации экосистем при разработках коренных месторождений алмазов в Якутии. *Современные проблемы науки и образования*. 2011;(6).
Legostaeva Ya.B., Shadrina E.G., Soldatova V.Yu., Dyagileva A.G. Ecogeochemical and bioindication assessment of transformation of ecosystem in process drafting of primary deposits of diamonds in Yakutia. *Modern Problems of Science and Education*. 2011;(6). (In Russ.)
15. Феклистов П.А. Определение зоны воздействия автодороги «Вахтовый поселок Накын-Промзона» Нюрбинского месторождения алмазов методом биоиндикации. *Arctic Enviromental Research*. 2012;(3):48–53.
Feklistov P.A. Estimation of the impact area of the Nyurbinsk diamond deposit road rotational settlement Nakyn-Industrial zone by means of bioindication. *Arctic Enviromental Research*. 2012;(3):48–53. (In Russ.)
16. Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N. et al. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*. 2014;7(2):60–72. https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009
17. Гололобова А.Г., Легостаева Я.В. Влияние горнодобывающей и перерабатывающей деятельности на содержание тяжелых металлов и микроэлементов в мерзлотных почвах. В: *Геология и минераль-*

но-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. 5–7 апреля 2021 г. Якутск: Изд. дом СВФУ; 2021. С. 367–370. https://doi.org/10.52994/9785751331399_2021_97
Gololobova A.G., Legostaeva Ya.V. Influence of mining and processing activities on frozen soils of the khannya-nakyn interfluves (Western Yakutia). In: *Geology and Mineral Resources of the North-East of Russia: Materials of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference*. April 5–7, 2021. Yakutsk: North-Eastern Federal University Publ. House; 2021. Pp. 367–370. (In Russ.) https://doi.org/10.52994/9785751331399_2021_97

18. Дину М.И., Шкинев В.М. Комплексообразование ионов металлов с органическими веществами гумусовой природы: методы исследования и структурные особенности лигандов, распределение элементов по формам. *Геохимия*. 2020;65(2):165–177. https://doi.org/10.31857/S001675252002003X (Перев. вер.: Dinu M.I., Shkinev V.M. Complexation of metal ions with organic substances of humus nature: methods of study and structural features of ligands, and distribution of elements between species. *Geochemistry International*. 2020;58(2):200–211. https://doi.org/10.1134/S0016702920020032)
Dinu M.I., Shkinev V.M. Complexation of metal ions with organic substances of humus nature: methods of study and structural features of ligands, and distribution of elements between species. *Geochemistry International*. 2020;58(2):200–211. https://doi.org/10.1134/S0016702920020032 (Orig. ver.: Dinu M.I., Shkinev V. M. Complexation of metal ions with organic substances of humus nature: methods of study and structural features of ligands, and distribution of elements between species. *Geohimiya*. 2020;65(2):165–177. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S001675252002003X)
19. Gololobova A.G., Legostaeva Ya.V. Heavy metals in cryozems of Western Yakutia. In: *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2019. Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems Conference Proceedings*. Albena, Bulgaria. 2019;19(3.2):239–246.

Информация об авторах

Антон Сергеевич Титов – инженер-эколог, ООО «ЭКОСТАНДАРТ. «Технические решения», г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0009-0005-0157-4609; e-mail Titov.A@ecostandard.ru

Андрей Сергеевич Торопов – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник химического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-7759-2831, Scopus ID 57693206900; e-mail torop990@gmail.com

Information about the authors

Anton S. Titov – Environmental Engineer, EKOSTANDART LLC. “Technical solutions”, Moscow, Russian Federation; ORCID 0009-0005-0157-4609; e-mail Titov.A@ecostandard.ru

Andrey S. Toropov – Cand. Sci. (Geolog. and Mineral.), Researcher at the Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0001-7759-2831, Scopus ID 57693206900; e-mail torop990@gmail.com

Поступила в редакцию	11.12.2023	**Received**	11.12.2023
Поступила после рецензирования	11.03.2024	**Revised**	11.03.2024
Принята к публикации	15.03.2024	**Accepted**	15.03.2024