ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Геохимические свойства и трансформация микроэлементного состава почв при разработке коренных месторождений алмазов в Якутии

Я.Б.ЛЕГОСТАЕВА[1], **А.Г.ГОЛОЛОБОВА**[1] ✉, **В.Ф.ПОПОВ**[2], **В.С.МАКАРОВ**[3]
[1] *Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия*
[2] *Северо-Восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова, Якутск, Россия*
[3] *Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера Северо-Восточного федерального университета им. М.К.Аммосова, Якутск, Россия*

Как цитировать эту статью: Легостаева Я.Б., Гололобова А.Г., Попов В.Ф., Макаров В.С. Геохимические свойства и трансформация микроэлементного состава почв при разработке коренных месторождений алмазов в Якутии // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 212-225. DOI: 10.31897/PMI.2023.35

Аннотация. Добыча алмазов из коренных месторождений в Сибири связана с разработкой кимберлитовых трубок в сложной природной обстановке, сопровождаемой комплексным воздействием на окружающую среду. В статье представлены результаты мониторинга почвенного покрова Накынского кимберлитового поля на территории Якутской алмазоносной провинции, подверженного воздействию объектов Нюрбинского горно-обогатительного комбината. При разработке коренных алмазных месторождений оказываются масштабные воздействия на недра, рельеф и почвенный покров: создание крупнейших в мире карьеров, формирование отвалов высотой более 100 м, обустройство обширных хвостохранилищ, образование твердых и жидких промышленных отходов различного химического состава. Целью исследований является изучение пространственно-временных закономерностей воздействия техногенеза на почвенный покров, выявление характера и уровня трансформации микроэлементного состава почв на основе анализа внутрипрофильного и латерального распределения подвижных форм микроэлементов. Объектами изучения в период 2007-2018 гг. являлись зональные типы мерзлотных почв северотаежных ландшафтов – криоземы, занимающие 84 % от общей площади исследования, которым свойственна биогенная аккумуляция подвижных форм Ni, Mn и Cd в верхних горизонтах, AO, A_{cr} и Cr, Ni, Co, Mn, Cu – в надмерзлотном горизонте CR. Установлено, что загрязнение почвенного покрова промышленной площадки Нюрбинского горно-обогатительного комбината носит полиэлементный характер с локальными участками с высокой и очень высокой категорией загрязнения. За десятилетний период наблюдений формируются области стабильного загрязнения почв, где основными поллютантами являются подвижные формы Mn, Zn, Ni. Выдвинуто предположение, что на фоне природной геохимической аномалии, связанной с трапповым и кимберлитовым магматизмом, в поверхностных горизонтах почв формируются техногенные аномалии, пространственно увязанные с техногенно-преобразованными ландшафтами. Одним из источников поступления поллютантов является рассеивание твердой фазы пылевых выбросов в направлении господствующих ветров, что и приводит к формированию почв с аномально высокими содержаниями подвижных форм Mn, Zn, Ni.

Ключевые слова: загрязнение почв; криоземы; микроэлементы; подвижные формы; Якутская алмазоносная провинция; кимберлитовое поле

Благодарности. Полевые исследовательские, химико-аналитические и картографические работы выполнены в рамках проекта FSRG-2020-0018 «Изучение особенностей функционирования арктических и субарктических экосистем Якутии в условиях усиления техногенного воздействия и глобального изменения климата». Обобщение и интерпретация материала выполнены по проекту FUEM-2019-0003 «Эколого-геохимическое изучение техногенных массивов на территории Якутской алмазоносной провинции».

Поступила: 07.04.2022 ***Принята: 02.03.2023*** ***Онлайн: 10.04.2023*** ***Опубликована: 25.04.2023***

Введение. Горно-добывающие предприятия по всему миру являются источниками загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами и микроэлементами в токсичных концентрациях практически на всех этапах своей деятельности [1, 2], включая выемку грунта, бурение, разработку карьеров и транспортировку сырья, а также измельчение и обогащение руд до удаления в хвосты. Все эти операции вносят значительный вклад в загрязнение окружающей среды, что отмечают во

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

всех регионах, где развита горно-добывающая деятельность – России [3], Англии [4], Канаде [5], Африке [6], Китае [7], США [8] и др. Вопросам загрязнения почвенного покрова посвящено множество работ, где рассматриваются геохимическая специфика рудопроявления на территориях, почвообразование, генезис, формирование техногенных аномалий, пространственное и внутрипрофильное распространение загрязнений, сорбция поллютанов различного генезиса и т.д. [9, 10]. Как правило, эти исследования проводят на примере региональных объектов, которые обеспечивают подчас независимый взгляд на экологические проблемы и позволяют провести оценку совокупной геоэкологической ситуации. Кроме этого, региональные работы направлены на выявление закономерностей, например, для условий всего Арктического региона, и дальнейшего прогноза, который можно интерполировать для горно-промышленных регионов вне зависимости от характера месторождения и способа его отработки.

Освоение месторождений полезных ископаемых неизбежно сопровождается неконтролируемым поступлением в почвенную толщу значительного количества химических элементов и их соединений, выведенных на дневную поверхность из недр Земли. По расчетам ученых из Института горного дела Уральского отделения РАН, ежегодно из недр Земли извлекается более 100 млрд т руды, полезных ископаемых и строительных материалов [11]. В результате этого техногенный прессинг оказывается и на огромные площади, и на отдельные компоненты экосистемы как в период разведки и освоения месторождений, так и после его отработки в виде отвалов, шламо- и хвостохранилищ, твердых и жидких отходов различного химического состава [12-14]. Из техногенно обусловленных образований в окружающую среду поступают различные вещества, мигрирующие в природных ландшафтах [15-17].

Интенсивность многолетнего техногенного воздействия и пространственная картина распространения загрязняющих веществ на территориях добычи полезных ископаемых устанавливается по химическому составу и геохимическим свойствам почв, являющихся относительно консервативным компонентом экосистемы [18]. Специфичность любых геосистем, в том числе и горно-промышленных регионов, проявляется в том, что почвенный покров, как главная депонирующая природная среда, в наибольшей степени отражает масштабы и характер изменений окружающей среды в техногенный период [19-21].

В последние годы появилось достаточно много исследовательских работ о загрязнении почв тяжелыми металлами [22-24], включая накопление [25, 26], пространственное [27] и внутрипрофильное распределения [28-30]. При этом почвы, являясь базовым компонентом экосистемы, одновременно играют роль потенциального источника вторичного загрязнения для составляющих самого ландшафта и сопредельных территорий [31-33]. Наиболее активными агентами загрязнения являются подвижные формы микроэлементов, способные переходить из твердых фаз в почвенные растворы и поглощаться растениями [34, 35].

Одной из задач генетического почвоведения является расшифровка информации, записанной в почвах, использование ее для реконструкции природных обстановок прошлого и разработка сценариев будущих изменений почв и ландшафтов [36, 37]. В почвах отражаются природные геохимические аномалии как результаты рудопроявления. И в то же время в почвах формируются техногенные геохимические аномалии, определяющие техногенное загрязнение, где концентрации поллютантов нередко достигают опасных для живых организмов уровней [18]. Настоящее исследование позволит выявить характер и уровень трансформации микроэлементного состава почв на основе анализа внутрипрофильного и латерального распределения подвижных форм микроэлементов в мерзлотных почвах Накынского кимберлитового поля и промышленной площадки Нюрбинского горно-обогатительного комбината (НГОКа).

Объекты и методы исследования. Территория исследований находится в пределах Вилюйско-Мархинской денудационной равнины, расположенной на границе Среднесибирского плоскогорья и Центрально-Якутской равнины Средней Сибири (Россия) с абсолютными отметками водоразделов от 213 до 269 м [38]. Рельеф слаборасчлененный с относительными превышениями над ближайшими водотоками от 15 до 35 м.

Исследование проводилось на территории Накынского кимберлитового поля в пределах промышленной площадки Нюрбинского горно-обогатительного комбината (065°01′31″ с.ш., 117°04′53″ в.д.), которая расположена в северо-таежной ландшафтной зоне Западной Якутии (рис.1).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 212-225 DOI: 10.31897/PMI.2023.35
© Я.Б.Легостаева, А.Г.Гололобова, В.Ф.Попов, В.С.Макаров, 2023

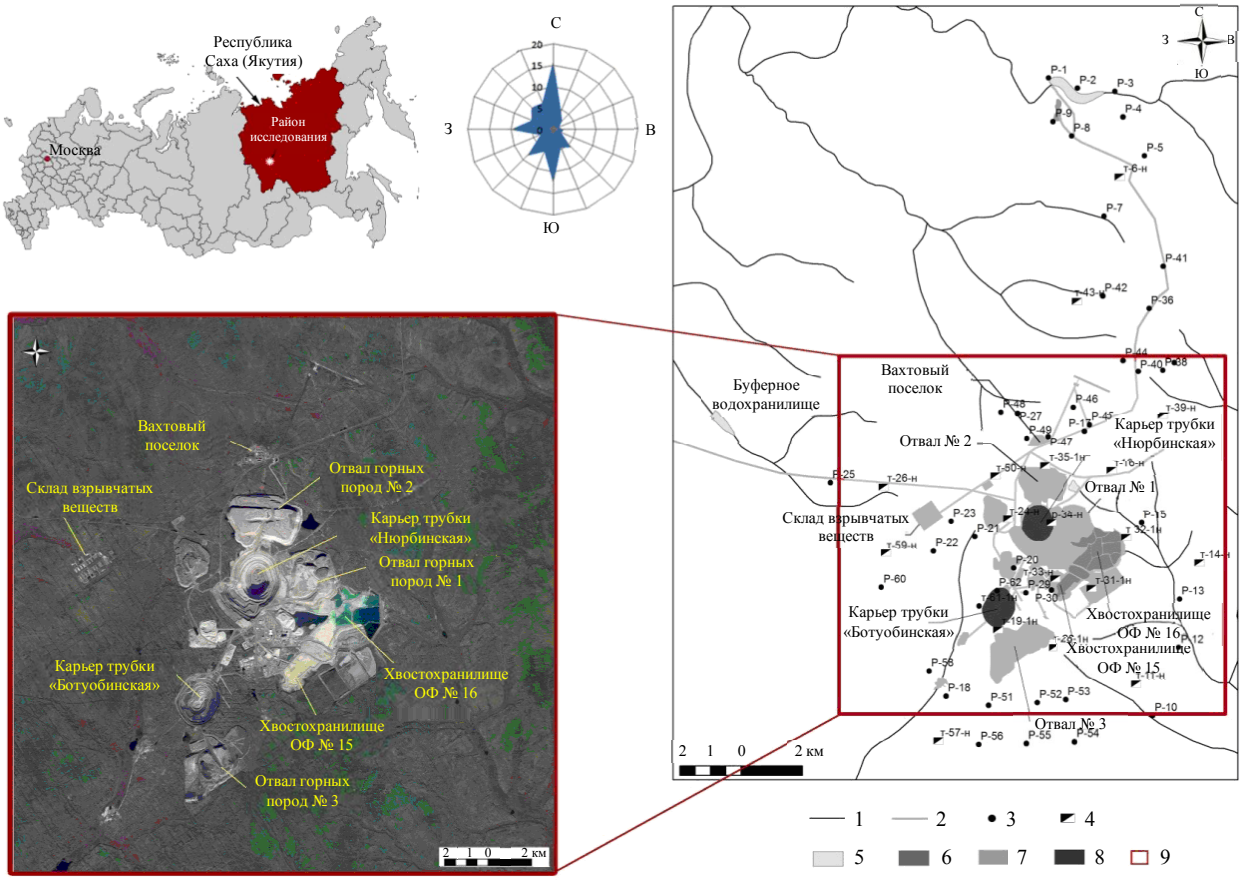


Рис.1. Территория исследования с точками наблюдения

1 – реки; 2 – дороги; 3 – точки опробования на глубине 0-20 см; 4 – точки опробования почвенных разрезов; 5 – антропогенно-трансформированные территории; 6 – отвалы пустых горных пород; 7 – гидротехнические сооружения, хвостохранилища; 8 – карьеры кимберлитовых трубок; 9 – контур условных границ промышленной площадки

На территории Хання-Накынского междуречья комплексные экологические работы, в том числе эколого-геохимические исследования почвенного покрова, при участии авторов проводятся с момента открытия Накынского кимберлитового поля в 1994-1995 гг. С 2007 г. на территории промышленной площадки Нюрбинского ГОКа АК АЛРОСА (ПАО) заложена сеть точек наблюдения с шагом 2×2 км. С периодичностью в три-четыре года в рамках производственного мониторинга проводились обследования почвенного покрова и отбор по единой сетке опробования. Опробование велось в теплый период времени (июль-август) двумя методами: прикопки на глубину 0-20 см и с закладкой почвенных разрезов в разных биотопах с по горизонтным отбором проб на всю глубину сезонного протаивания (табл.1). Всего отобрано и проанализировано 436 проб почвенных образцов.

Таблица 1

Объемы опробования почв и грунтов по годам исследований

Год исследований	Объект исследований	Количество точек наблюдения	Количество проб
2007	Поверхностный слой с глубины 0-20 см	50	50
2008	Почвенные разрезы	13	34
2011	Мониторинговые точки – с поверхности на глубины 0-10 и 10-20 см	86	172
2014	Мониторинговые точки – с поверхности на глубины 0-10 и 10-20 см	62	124
2018	Почвенные разрезы	19	56
Всего проб			436

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Все полученные образцы были высушены при комнатной температуре и просеяны через сито размером < 1,0 мм. Далее образцы почв растирали в ступке пестиком до тех пор, пока все частицы не проходили через сито с размером ячеек 0,25 мм. Затем 10 (±0,1) г почвенного материала растирали в ступке до порошкообразного состояния (ГОСТ ISO 11464-2015).

Значения pH водных вытяжек почв определены в системе почва:водная суспензия (1:2,5) при комнатной температуре методом потенциометрии на pH-метре (Mettler Toledo, Seven Compact Advanced) по ГОСТ-26483-85. Органическое вещество почвы (гумус) определяли фотоэлектроколориметрическим методом на КФК-2 УХЛ 4.2 по ГОСТ-26213-91; азот общий – спектрофотометрическим методом на ПЭ-5300ВИ по ГОСТ-26107-84; содержание физической глины – методом Качинского (метод пипетки); содержание подвижных форм элементов (Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn, Cu, As) – на атомно-абсорбционном спектрометре МГА-915 (ГК Люмэкс, Санкт-Петербург, Россия) после кислотной экстракции 1 Н HNO_3 (соотношение грунта и экстрагента 1:10) по методике М 03-07-2014. Экстрагент 1 Н HNO_3 извлекает наиболее подвижные – кислоторастворимые – формы элементов, более прочно связанные с почвой, в отличие от H_2O и 1 Н HCl [39, 40].

Для контроля точности измерения концентрации элементов в почвах использовались государственные стандартные образцы (ГСО) состава почв следующих серий: дерново-подзолистая супесчаная почва (СДПС-1, 2, 3); серозем карбонатный (ССК-1, 2, 3) [41].

Анализ суммарной полиэлементной нагрузки на почвенный покров Накынского кимберлитового поля Якутской алмазоносной провинции включал в себя расчет следующих эколого-геохимических показателей:

• коэффициента концентрации

$$К_c = \frac{C_i}{C_f}, \quad (1)$$

где C_i – фактическое содержание загрязняющего вещества в почве, мг/кг; C_f – фоновое содержание загрязняющего вещества в почве, мг/кг;

• суммарного показателя загрязнения [42]

$$Z_c = \sum_{i=1}^{n} К_c - (n-1), \quad (2)$$

где $К_c$ – коэффициент концентрации i-го химического элемента; n – число химических элементов с $К_c > 1,5$.

Элементы с очень низким фоновым содержанием не учитываются.

Согласно методическим указаниям по оценке степени опасности загрязнения почвы химическими веществами «МУ 4266-87», выделяют четыре категории опасности химического загрязнения почв по значениям суммарного показателя загрязнения Z_c: допустимая ($Z_c < 16$); умеренно опасная ($16 < Z_c < 32$); опасная ($32 < Z_c < 128$); чрезвычайно опасная ($Z_c > 128$).

Значения регионального фона рассчитаны по среднему геометрическому содержанию подвижных форм микроэлементов в выборке объемом в 212 проб почв, в которую вошли образцы поверхностных горизонтов почв природных ненарушенных ландшафтов Хання-Накынского междуречья вне зоны воздействия объектов горно-обогатительных работ [43, 44].

Полученные количественные данные обрабатывали с помощью программного обеспечения Microsoft Excel 2016, OriginPro 8.5.1. Статистический анализ проводили с помощью Statistica 13.0. Карты суммарного загрязнения почвенного покрова были созданы с помощью программы ArcGIS 9.0.

Результаты и обсуждение. Накынское кимберлитовое поле включает несколько высоко алмазоносных кимберлитовых тел, в том числе трубки «Ботуобинская» (открыта в 1994 г.), «Нюрбинская» (1996), дайки Мархинская (1999), Майская (2006) и россыпные проявления «Ботуобинское» и «Нюрбинское». В настоящее время на территории НГОКа открытым способом разрабатываются две кимберлитовые трубки – «Нюрбинская» и «Ботуобинская». Инфраструктура включает две обогатительные фабрики (ОФ) – № 15 и № 16, геологическую фабрику № 17, вахтовый поселок более чем на 1000 человек, склад материалов взрывчатых веществ,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 212-225 DOI: 10.31897/PMI.2023.35
© Я.Б.Легостаева, А.Г.Гололобова, В.Ф.Попов, В.С.Макаров, 2023

взлетно-посадочные полосы. Сформированы наземные техногенные хранилища продуктов добычи – отвалы пустых пород, и обогащения – хвостохранилища.

Мерзлотные почвы отнесены к стволу первичного, постлитогенного, органогенного и синлитогенного почвообразования и представляют собой разные подтипы криогенных почв. В структуре почвенного покрова территории промышленной площадки Нюрбинского горно-обогатительного комбината, как и всей территории Хання-Накынского междуречья, доминируют криоземы – 84 % от общей площади, которые характеризуются маломощным слабо дифференцированным почвенным профилем с ярко выраженными процессами криотурбации, приводящими к нарушению цельности генетических горизонтов и перемешиванию почвенного материала [44]. В табл.2 приведены основные физико-химические характеристики криоземов на примере трех почвенных разрезов, наиболее распространенных на территории типов криоземов.

Таблица 2

Основные физико-химические характеристики доминирующих типов криоземов Накынского кимберлитового поля

Индекс горизонта	Границы горизонтов, глубина опробования, см	Тип почвы	$pH_{водн}$	Гумус, %	$C_{орг}$, %	Общий азот, %	C:N	Физическая глина (<0,01 мм), %
АО	0-6(14)	Криозем гомогенный надмерзлотно-глееватый	5,0±0,3	6,8±0,3	3,94±0,19	0,20±0,01	19,7	23,2±1,2
A_{cr}	6(14)-43(50)		6,2±0,3	1,4±0,07	0,81±0,04	0,156±0,008	5,08	26,1±1,3
CR_g	43(50)-80(83)		7,0±0,4	1,9±0,1	1,10±0,06	0,125±0,006	8,48	28,2±1,4
$C_g\perp$	80(83)-∞		7,0±0,4	0,9±0,05	0,52±0,03	0,125±0,006	4,02	11,0±0,6
АО	0-5(10)	Криозем гомогенный перегнойно-глеевый	5,1±0,3	8,8±0,4	5,10±0,26	0,156±0,008	31,9	30,0±1,5
CR_g	5(10)-35(45)		6,4±0,3	1,4±0,07	0,81±0,04	0,156±0,008	5,08	31,6±1,6
$C\underline{\downarrow}$	35(45)-∞		7,2±0,4	2,1±0,1	1,22±0,06	0,168±0,008	7,17	30,1±1,5
АК	0-40(42)	Криозем глееватый оподзоленный	5,3±0,3	0,8 ±0,04	0,46±0,02	0,156±0,008	2,90	13,5±0,7
ELB	40(42)-61(72)		6,7±0,3	0,6±0,03	0,35±0,02	0,156±0,008	2,18	13,4±0,7
$C_g\perp$	61(72)-∞		7,0±0,4	1,9±0,10	1,10±0,06	0,168±0,008	6,48	20,5±1,0

Примечание: АО – грубогумусовый горизонт; A_{cr} – аккумулятивно-гумусовый криотурбированный горизонт; CR_g – криотурбированный горизонт с признаками оглеения; $C_g\perp$ – почвообразующая порода с присутствием льдистой мерзлоты; $C\underline{\downarrow}$ – почвообразующая порода с присутствием сухой мерзлоты; АК – криогумусовый горизонт; ELB – элювиально-оподзоленный горизонт [45].

Почвенный покров характеризуется преимущественно кислой реакцией почвенной среды в верхних органогенных горизонтах и меняется в сторону щелочности вниз по профилю. Высокие значения гумуса обуславливают наличие в почвах средне- и слаборазложившихся органических остатков, что характерно для почв северных областей. Расчет соотношения углерода к азоту свидетельствует о слабом разложении растительных остатков. По почвенному профилю криоземы имеют резко убывающий, бимодальный и нарастающий характер распределения. Присутствие значительного количества органического вещества в нижних горизонтах связано с мерзлотной деструкцией, т.е. перемешанностью и затекам ее по мерзлотным трещинам.

Почвенный профиль криоземов характеризуется двучленным строением по гранулометрическому составу с резким снижением содержания физической глины вниз по почвенному профилю за счет увеличения содержания фракций диаметром 0,25-0,05 мм до 70 % в криоземах надмерзлотно-глееватых и перегнойно-глеевых. В оподзоленных подтипах, наоборот, наблюдается уменьшение их содержания до 56 % [46].

Содержание подвижных форм тяжелых металлов в криоземах существенно не различается по типам (табл.3). В целом криоземы отличаются наличием двух максимумов при внутрипрофильном распределении подвижных форм микроэлементов: биогенного накопления в верхнем слое почвы с последующим уменьшением вниз по профилю и вторым пиком в надмерзлотном горизонте. Биогенная аккумуляция в криоземах, как правило, свойственна подвижным формам Mn, Zn, Co, Ni, Cd, As. Отмечены единичные случаи аккумуляции подвижных форм Cu в верхних органогенных горизонтах. Криоземы природных ландшафтов исследуемой территории вне зоны импактного

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2023.35

© Я.Б.Легостаева, А.Г.Гололобова, В.Ф.Попов, В.С.Макаров, 2023

воздействия горно-добычных работ отличаются биогенной аккумуляцией Ni, Mn и Cd и надмерзлотной – Cr, Ni, Co, Mn, Cu. Причем содержание микроэлементов в надмерзлотных горизонтах выше, чем в верхних органогенных.

Таблица 3

Среднее содержание подвижных форм микроэлементов в доминирующих типах криоземов Накынского кимберлитового поля

Индекс горизонта	Подвижные формы микроэлементов, мг/кг								
	Pb	Ni	Mn	Cd	Co	Cr	Zn	Cu	As
Фон, n = 212	2,88	1,77	13,19	0,03	2,14	4,70	6,31	11,5	0,22
	Криозем гомогенный надмерзлотно-глееватый, n = 16								
AO	3,8±0,9 0,4-1,5	**2,6**±0,6 5,2-5,6	**22,9**±5,5 7,2-215,1	0,023±0,006 0,015-0,245	1,5±0,4 0,9-2,6	2,2±0,5 0,9-4,9	4,5±1,1 1,0-32,6	4,8±0,02 1,2-6,1	0,2±0,1 0,02-0,33
A_{cr}	2,1±0,5 0,5-1,8	**5,3**±1,2 1,1-6,9	**41,8**±10,0 16,5-490,1	0,011±0,003 0,003-0,064	2,4±0,6 0,9-3,6	2,6±0,6 0,8-5,1	6,8±1,6 3,2-13,5	6,7±1,6 1,5-17,7	< 0,05
CR_g	2,3±0,5 0,4-1,3	**5,0**±1,2 0,8-7,2	**46,5**±11,2 13,9-138,6	0,014±0,003 0,001-0,023	2,5±0,6 0,4-6,2	2,5±0,6 1,2-5,2	**7,5**±1,8 3,8-13,4	8,1±1,9 0,7-30,0	0,1±0,02 0,03-0,12
$C_g\perp$	1,4±0,3 0,2-0,6	**3,8**±0,9 2,1-6,2	**43,8**±10,5 23,5-69,2	0,016±0,004 0,013-0,039	2,2± 0,5 1,4-3,9	3,3±0,8 1,3-9,3	6,2±1,5	3,9±0,9 2,5-7,9	< 0,05
	Криозем гомогенный перегнойно-глеевый, n = 11								
AO	**4,2**±1,01 1,4-12,7	**4,5**±1,0 2,0-12,7	**55,8**±13,4 45,1-108,7	0,022±0,005 0,017-0,124	2,3± 0,5 1,3-9,8	2,3±0,5 1,1-47,0	3,7±0,9 1,1-37,9	7,7±1,9 5,4-11,1	0,2±0,1 0,07-0,23
CRg	2,8±0,7 0,9-2,2	**4,2**±1,0 1,5-5,9	**38,9**±9,3 57,9-102,7	0,008±0,002 0,003-0,035	1,9±0,5 1,2-2,4	2,2±0,5 1,7-8,2	6,3±1,5 2,4-14,9	7,9±1,9 3,6-10,7	< 0,05
C↓	2,9±0,7 0,5-2,1	**5,1**±1,2 2,9-6,9	**39,4**±9,05 68,8-124,5	0,015±0,004 0,011-0,052	2,3±0,5 1,9-3,5	2,1±0,5 1,3-11,3	6,9±1,6 1,7-15,1	10,4±2,5 4,9-18,7	< 0,05
	Криозем глееватый оподзоленный, n = 5								
A	2,6±0,6 0,1-1,1	1,5±0,4 0,6-28,5	15,2±3,4 6,3-186,5	0,006±0,001 0,001-0,126	1,5±0,4 0,6-7,4	1,7±0,4 0,9-3,7	4,5±1,1 3,5-46,1	2,1± 0,5 0,7-5,3	< 0,05
ELB	2,2± 0,5 0,4-2,1	**3,4**±0,8 1,1-7,8	**27,4**±6,6 9,2-97,7	0,008±0,002 0,004-0,153	2,2±0,5 0,4-9,7	2,1±0,5 1,2-3,8	5,1±1,2 2,7-15,1	2,8±0,7 0,6-3,5	< 0,05
$C_g\perp$	2,2±0,5 0,4-1,2	**4,7**±1,1 0,9-3,9	**39,6**±9,5 19,5-87,5	0,019±0,005 0,006-0,193	2,5±0,6 0,6-7,3	1,8±0,4 1,3-5,9	7,1±1,7 3,1-11,9	4,7±1,1 0,5-10,4	< 0,05

Примечания: 1. Над чертой среднегеометрические значения $m\pm s$, под чертой – min-max; полужирным шрифтом отмечены значения, превышающие фоновые уровни. 2. n – количество однотипных почвенных разрезов.

Выявлена различная степень корреляции подвижных форм тяжелых металлов с содержанием гумуса, значениями pH и гранулометрическим составом, характеризующая селективность соединения элемента (или группы элементов) с основными компонентами почвы (табл.4). Установлена значимая положительная корреляция As и Pb с содержанием органического вещества, Cu и Ni – с содержанием физической глины. Слабая корреляция отмечена у Ni и Zn с pH, Mn и Cd с органическим веществом, Mn, Cd и Pb с физической глиной. В работе [44] выявлено, что в криоземах фракции мелкодисперсной пыли и ила связывают наибольшее количество элементов – Zn, Ni, Cr, Cu, Pb и As.

Последовательный анализ содержания подвижных форм микроэлементов в криоземах всей территории Накынского кимберлитового поля показал закономерности внутрипрофильного распределения: в верхней части почвенного профиля – связанное с биогенным накоплением, и в нижней части почвенного профиля – являющееся следствием влияния как подстилающих пород, так и криогенных процессов с затеками по морозобойным трещинам. При этом из-за близкого залегания мерзлоты образуется своего рода надмерзлотный геохимический барьер, где происходит основная аккумуляция микроэлементов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 212-225 DOI: 10.31897/PMI.2023.35
© Я.Б.Легостаева, А.Г.Гололобова, В.Ф.Попов, В.С.Макаров, 2023

Таблица 4

Коррелятивная матрица зависимости содержания микроэлементов от некоторых физико-химических показателей в криоземах Накынского кимберлитового поля (*n* = 436)

	pH	$C_{орг}$	ФГ	Mn	Cu	Zn	Cd	Co	Cr	Ni	As	Pb
pH	1											
$C_{орг}$	–0,37	1										
ФГ	0,35	0,45	1									
Mn	–0,01	0,42	0,35	1								
Cu	0,33	0,20	0,69*	0,23	1							
Zn	0,37	–0,23	0,17	–0,26	0,51*	1						
Cd	0,25	0,40	0,40	0,03	0,54*	0,38	1					
Co	0,14	–0,05	0,12	0,15	0,52*	0,81*	0,31	1				
Cr	0,02	–0,04	–0,08	0,30	–0,24	–0,07	–0,32	0,04	1			
Ni	0,46	–0,02	0,5*	–0,09	0,74*	0,88*	0,63*	0,72*	–0,17	1		
As	–0,33	0,84*	0,32	0,20	0,23	–0,20	0,46	–0,07	–0,06	0,01	1	
Pb	–0,34	0,72*	0,41	0,26	–0,13	–0,37	–0,04	–0,33	0,22	–0,31	0,57*	1

Примечания: Значения коэффициента корреляций: до 0,2 – очень слабая корреляция; до 0,5 – слабая; до 0,7 – средняя; до 0,9 – высокая; свыше 0,9 – очень высокая (Наследов А. IBM SPSS Statistics 20 и AMOS: профессиональный статистический анализ данных. СПб: Питер, 2013. 416 с.); ФГ – физическая глина; * – достоверная значимость при $P < 0,01$.

На современном этапе исследований эко-геохимическая ситуация обусловлена совокупным влиянием масштабных эпигенетических процессов тектоно-магматической структуры Накынского кимберлитового поля и техногенным воздействием на компоненты экосистемы, в первую очередь на почвенный покров. Ранее установлено [47], что в формировании природных геохимических аномалий в почвенном покрове на региональном уровне определяющую роль играют продукты выветривания пород трапповой формации Ханя-Накынского междуречья – кимберлиты с накоплением Cr, Co, Ni и долериты с аккумуляцией Mn Li, Be, Sn. Природные геохимические аномалии в почвенном покрове хорошо идентифицируются по материалам вторичных потоков рассеяния.

Региональная геохимическая аномалия почв отвечает структуре рудного поля кимберлитов, достаточно четко коррелирует с положением эндогенной аномалии на уровне раннепалеозойских карбонатно-терригенных пород и, вероятно, является телескопированным геохимическим отображением через толщу раннеюрских осадков на уровне современного эрозионного среза [47]. Проявление природной аномальности почв на территории Накынского кимберлитового поля в микроэлементном составе определяется повышенными концентрациями валовых и подвижных форм элементов, типоморфных кимберлитам – Cr, Ni, Co, Mn, Cu. В составе подвижных форм абсолютно преобладает Mn.

Геохимические спектры, построенные на основе коэффициентов концентрации позволили выявить степень трансформации элементного состава почв за период наблюдений (табл.5). В импактной зоне сохранившиеся участки с ненарушенным почвенным профилем характеризуются высокими концентрациями подвижных форм Mn, Ni, Zn Co. При этом вариабельность коэффициентов концентрации находится в очень широких пределах. Установлено, что почвы, попадающие в зону прямого воздействия техногенных объектов, характеризуются поверхностным накоплением этого же спектра микроэлементов, как и грунты техногенных ландшафтов (карьеров, отвалов, хвостохранилищ и насыпей различного назначения: $Mn_{28,0} > Zn_{8,0} > Ni_{7,7} > Cr_{6,8} > Co_{4,2} > As_{2,0}$ [48]).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2023.35

Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 212-225
© Я.Б.Легостаева, А.Г.Гололобова, В.Ф.Попов, В.С.Макаров, 2023

Таблица 5

Сравнительная характеристика микроэлементного состава криоземов на ключевых участках промышленной площадки НГОКа с максимальным значением Z_c по данным исследований 2007 и 2018 гг.

Номер точки наблюдения	Место отбора пробы	Координаты точек наблюдения	Микроэлементный спектр по годам наблюдения		Z_c подвижных форм
			2007	2018	
В зоне воздействия отвалов пустых пород					
19	1 м на З от отвала № 2	N 64 59.595 E 117 03.220	$Mn_{4,3}\rightarrow Ni_{2,9}\rightarrow Co_{2,4}$	$Mn_{69,7}\rightarrow Ni_{4,5}\rightarrow Zn_{4,1}\rightarrow Cd_{3,4}\rightarrow Co_{1,9}$	9,6** / 83,6
35	5 м на С от отвала № 1	N 65 02.361 E 117 05.320	$Mn_{2,6}\rightarrow Ni_{1,9}$	$Mn_{669,4}\rightarrow Ni_{16,11}\rightarrow Zn_{7,3}\rightarrow Cd_{4,2}\rightarrow Co_{3,4}$	4,5 / 700,4
16	1,4 км на В от отвала № 1	N 65 02.434 E 117 07.943	$Mn_{6,8}\rightarrow Ni_{2,3}$	$Mn_{186,8}\rightarrow Zn_{4,7}\rightarrow Ni_{2,0}$	9,1 / 193,5
В зоне воздействия хвостохранилищ обогатительных фабрик					
32	50 м на ЮВ от хвостохранилища ОФ № 16	N 65 01.239 E 117 08.272	$Mn_{6,4}\rightarrow Ni_{3,1}\rightarrow Zn_{2,7}$	$Mn_{160,4}\rightarrow Zn_{4,7}\rightarrow Ni_{2,9}\rightarrow Cd_{2,5}$	12,2 / 170,4
11	2,7 км на Ю от хвостохранилища ОФ №15, вершина водораздела	N 64 58.731 E 117 08.676	$Mn_{8,7}$	$Mn_{290,4}\rightarrow Zn_{5,4}\rightarrow Ni_{3,8}\rightarrow Co_{3,5}\rightarrow Cd_{3,0}$	8,7 / 306,1
14	2,5 км на В от хвостохранилища ОФ №16	N 65 00.837 E 117 11.509	$Mn_{10,6}\rightarrow Co_{5,3}\rightarrow Ni_{4,8}\rightarrow Cd_{2,0}$	$Mn_{141,4}\rightarrow Zn_{2,5}$	22,7 / 143,9
31	150 м на ЮВ от хвостохранилища ОФ №15	N 65 00.477 E 117 07.173	$Mn_{3,5}\rightarrow Co_{1,8}\rightarrow Ni_{1,7}$	$Mn_{127,0}\rightarrow Cr_{10,0}\rightarrow Ni_{7,2}\rightarrow Zn_{6,0}\rightarrow Co_{4,6}\rightarrow Cd_{4,1}$	7,0 / 158,9
В зоне воздействия карьеров					
34	15 м на ЮВ от карьера трубки «Нюрбинская»	N 65 01.452 E 117 05.334	–*	$Mn_{27,9}\rightarrow Zn_{8,0}\rightarrow Ni_{7,7}\rightarrow Cr_{6,8}\rightarrow Co_{4,2}\rightarrow As_{2,0}$	2,9 / 56,7
61	10 м на ЮВ от карьера трубки «Ботуобинская»	N 65 00.110 E 117 02.819	–	$Mn_{119,1}\rightarrow Zn_{4,9}\rightarrow Ni_{4,8}\rightarrow Cd_{3,2}\rightarrow Co_{2,5}$	1,5 / 134,2

* – нет превышения фоновых параметров, $K_c \le 1,5$; ** – над чертой значения 2007 г., под чертой – 2018 г.

На момент исследования территория промышленной площадки Нюрбинского ГОКа характеризуется полиэлементным характером загрязнения с наложением ореолов природной и техногенной аномалий. На основе расчета суммарного показателя загрязнения почвенного покрова по содержанию подвижных форм микроэлементов выявлено пространственное увеличение контрастности аномалий (рис.2). Тренд увеличения имеет северо-западное и юго-восточное направление. Эколого-геохимическая ситуация к 2018 г. сильно изменилась с преобладанием высокоопасной категории загрязнения почвенного покрова, ореолы которой занимают около 260,9 км^2.

Техногенные аномалии приурочены к техногенным ландшафтам и отличаются активным накоплением именно подвижных форм микроэлементов в поверхностных органогенных горизонтах почв. Содержание подвижных форм в поверхностных органогенных горизонтах почв увеличивается у элементов, генетически связанных с породами основного состава – кимберлитов и долеритов (рис.3). В 2007 г. на начальной стадии мониторинга максимальной степенью подвижности отличаются подвижные формы свинца (40,6 %), к 2018 г. – элементы, типоморфные кимберлитам и породам трапповой формации, приуроченные к объектам добычи – карьерам и обогащения – хвостохранилищам. Максимальная степень подвижности отмечается у Mn – 2007 г. 7,3 % и 2018 г. 47,8 %. Минимальные вариации подвижности выявлены у As – 2007 г. 7,1 % и 2018 г. 9,3 %.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 212-225 DOI: 10.31897/PMI.2023.35
© Я.Б.Легостаева, А.Г.Гололобова, В.Ф.Попов, В.С.Макаров, 2023

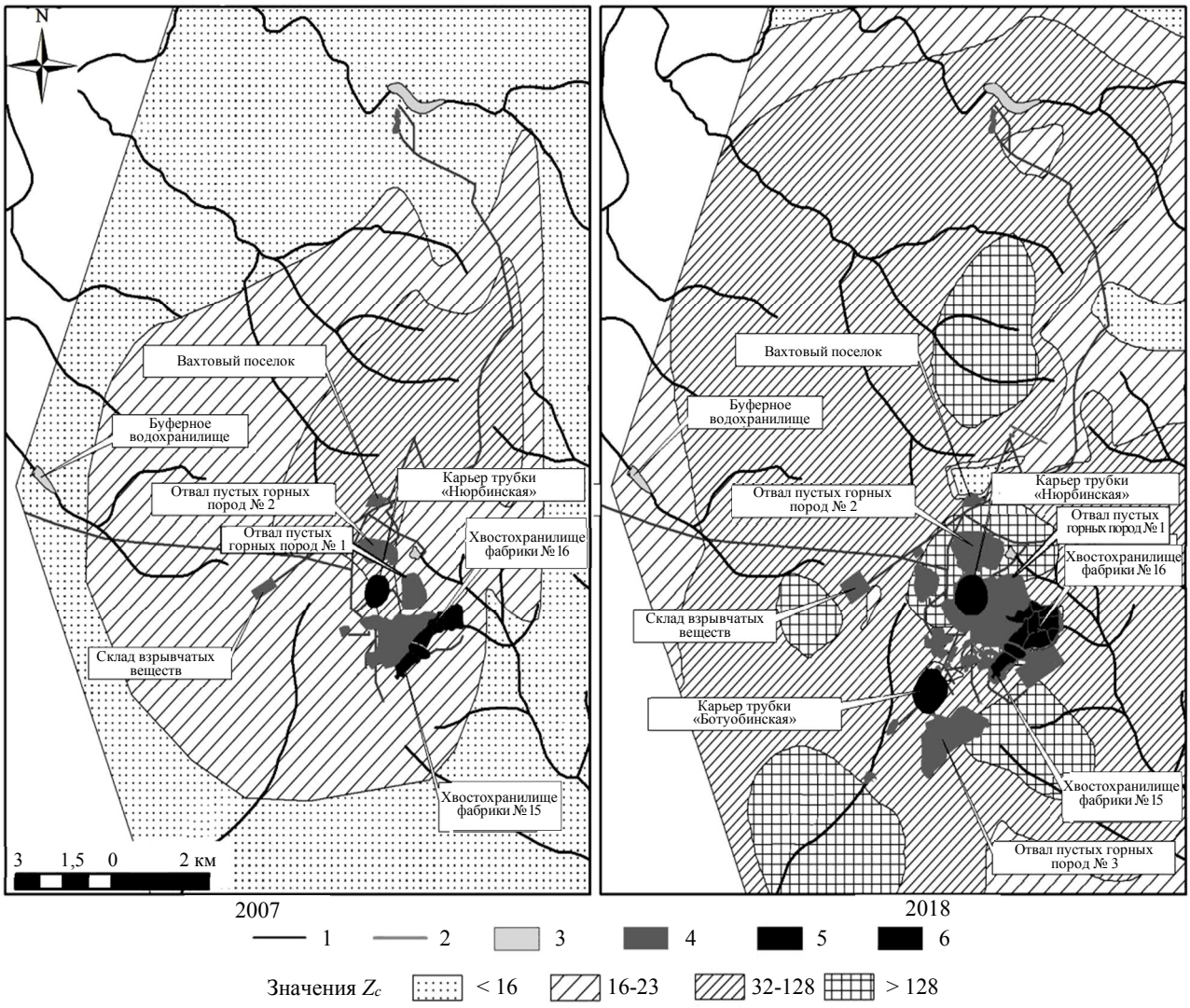


Рис.2. Динамика эколого-геохимического состояния почвенного покрова по показателю Z_c за 2007-2018 гг.

1 – реки; 2 – дороги; 3 – антропогенно-трансформированные территории; 4 – отвалы пустых горных пород; 5 – гидротехнические сооружения, хвостохранилища; 6 – карьеры кимберлитовых трубок

Анализ коэффициентов концентрации и степени подвижности элементов позволил сделать выводы, что основными Z_c-образующими элементами являются Mn, Zn, Ni.

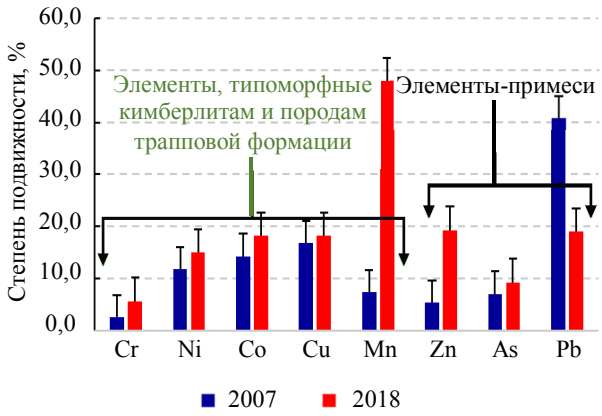


Рис.3. Степень подвижности микроэлементов в поверхностном слое почв промышленной площадки НГОКа по годам исследований

Формирование техногенных аномалий в почвенном покрове промышленной площадки может быть, в том числе, результатом атмосферных поступлений тонкозернистых продуктов пылевой составляющей при массовых взрывах на карьерах, при технологическом процессе обогащения руд, при пылении отвалов пустых пород или других насыпей. Например, рассеивание твердой фазы пылевых выбросов в направлении господствующих ветров приводит к формированию почв с аномально высокими содержаниями химических элементов. Формирование в почвенном покрове техногенных аномалий, связанных с аэральным переносом тонкодисперсной взвеси, наблюдается, например, в сформировавшихся Сибайской и

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2023.35

Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 212-225
© Я.Б.Легостаева, А.Г.Гололобова, В.Ф.Попов, В.С.Макаров, 2023

Учалинской геотехнических системах (ГТС), расположенных в Республике Башкортостан. К подобным выводам пришли коллеги, анализирующие состояние почв Башкирского Зауралья [20]. Они связывают поступление тяжелых металлов в почвы с аэральными выпадениями сульфидного материала из труб обогатительной фабрики и эоловым разносом сульфидно-силикатного вещества от отвалов и хвостохранилищ.

Выявленные авторами техногенные аномалии носят поверхностный характер. Поэтому для анализа пространственной связи сформированных в почвенном покрове аномалий с предполагаемыми источниками их возникновения более подробно следует рассмотреть некоторые климатические особенности территории Хання-Накынского междуречья. В климатическом отношении территория принадлежит субарктическому поясу сибирской области [44]. Климатические условия описываются данными ближайших метеостанций Якутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – Чумпурук и Эйик, расположенных в 50 км к югу и 112 км к северу соответственно. Доступные метеорологические параметры даны на сайтах www.meteo.ru и rp5.ru. Климат резко континентальный с продолжительной (восемь месяцев) зимой с морозной сухой погодой (средняя температура января –38 °С), определяемой господствующим Сибирским антициклоном, и коротким относительно теплым летом (средняя температура июля 16,8 °С). Многолетняя среднегодовая температура воздуха составляет –10,2 °С (рис.4). Среднегодовое количество осадков достаточно низкое, около 250 мм в год, из них в теплый период года (май-сентябрь) выпадает около 200 мм. Из графиков следует отметить повышение как теплообеспеченности, так и увлажненности. Снежный покров со средней годовой мощностью 50 см образуется в последней декаде сентября и сходит в мае, продолжительность его устойчивого существования в среднем 216 дней. Сезонно-талый слой составляет от 0,2 до 2,5 м в зависимости от геоморфологических и погодных условий года. Средняя скорость ветра, по данным метеостанций Чумпурук и Эйик, составляет 1,5 и 2,2 м/с. Наибольшие среднемесячные скорости ветра приходятся на апрель и май (Чумпурук – 2,0 и Эйик – 2,6-2/7 м/с). Безветренная погода занимает 30 и 15 % времени в году соответственно.

Степень пыления отвалов увеличивается с ростом их высоты, их пыление возможно при скорости ветра более 5 м/с [49]. По данным метеостанции Чумпурук, в период 2005-2019 гг. в сухую

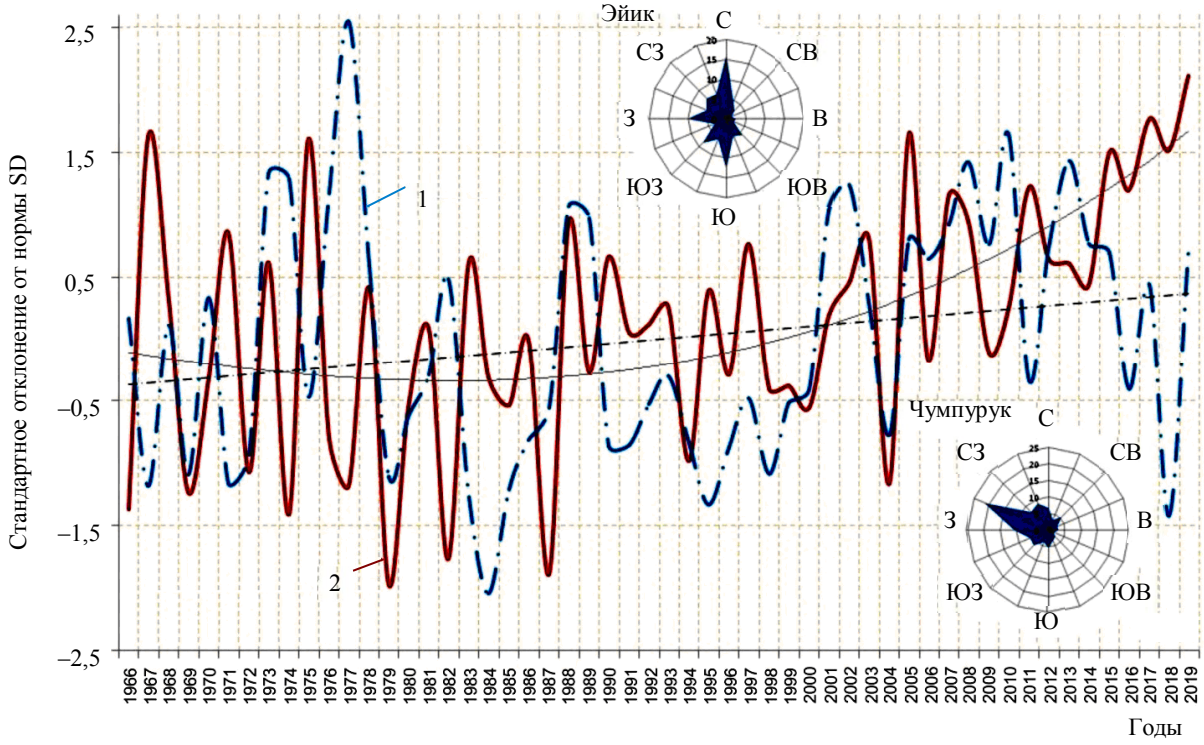


Рис.4. График хода среднегодовых температур воздуха и количества годовых осадков по данным метеостанции Чумпурук

1 – годовое количество осадков; 2 – среднегодовые температуры

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

погоду ветер со скоростью 5 м/с и более наблюдался в 15-145 случаях в год (в среднем 57). По данным метеостанции Эйик, в среднем за год 370 случаев. Усиление ветра связано с активизацией циклонической деятельности, для данной территории чаще западного и северо-западного направления.

В весенний период на территории Якутии отмечаются отдельные выходы южных циклонов. На ветровой режим кроме циркуляционных факторов оказывает влияние местоположение метеостанции и, прежде всего, рельеф. Для метеостанции Чумпурук основное направление ветра совпадает с направлением долины, на данные метеостанции Эйик значительное влияние оказывает ее расположение на северном побережье крупного одноименного озера.

Получается, что для характеристики территории месторождения Накын на основе эколого-географического анализа климатических факторов по количеству сильных ветров можно ориентироваться на данные метеостанции Чумпурук, а по направлению ветра – на данные метеостанции Эйик. В таком случае основным масштабным источником материала для пылевого рассеяния и формирования поверхностного техногенного загрязнения почвенного покрова являются отвалы пустых пород. В кратких временных промежутках возможно выпадение значительного количества загрязнителя на удалении от отвалов. В длительном же временном промежутке воздушному загрязнению должна подвергнуться вся прилегающая к промышленной площадке территория.

Проведенные исследования позволили установить закономерности внутрипрофильного и пространственного распределения микроэлементов в почвах Накынского кимберлитового поля. Формирование техногенных аномалий в почвенном покрове, пространственно увязанных с техногенно-преобразованными ландшафтами, наземными и подземными техногенными хранилищами, прослеживаются на промышленных площадках других горно-обогатительных комбинатов, расположенных в Якутии [50, 51]. Почвенный покров Мирнинского, Далдынского, Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей, в пределах которых действуют горно-обогатительные комбинаты, отличается по структуре и некоторым основным физико-химическим свойствам почв, но характеризуется схожими проявлениями формирования в почвенном покрове природных геохимических аномалий. Техногенно-преобразованные ландшафты на промышленных площадках ГОКов формируют ореолы загрязнения, как правило, поверхностного характера. Характер загрязнения и пространственный аспект формирования техногенных аномалий индивидуален для каждой рассматриваемой площадки. Поэтому выявленные закономерности действуют в условиях настоящего техногенного воздействия, где высока вероятность появления новых дополнительных факторов, которые, накладываясь на имеющиеся, могут внести коррективы в формирование микроэлементного состава почв и увеличить ореолы вторичного техногенного загрязнения.

За одиннадцатилетний период наблюдений за состоянием почвенного покрова на территории Хання-Накынского междуречья эколого-геохимическая ситуация ухудшилась с увеличением площади загрязнения почв и контрастности его проявления. В связи с высокой активностью циклонической деятельности основным источником формирования техногенных аномалий в поверхностных горизонтах почв на территории промышленной площадки НГОКа являются отвалы пустых пород или техногенные поверхностные хранилища. Высокая сорбционная способность верхних органогенных горизонтов криоземов способствует интенсивному накоплению микроэлементов, в том числе и тяжелых металлов. Таким образом, верхние органогенные горизонты криоземов выполняют защитную функцию по отношению к загрязнению всего почвенного профиля. Эта способность поступающих извне в результате аэропереноса микроэлементов прочно фиксироваться почвенным органическим веществом является фактором, который способен обеспечить невысокую опасность полиэлементного загрязнения для всей экосистемы при условии сохранения целостности почвенного профиля.

Заключение. Зональными типами почв Накынского кимберлитового поля являются криоземы с разной степенью проявления глеевого и криотурбационного процессов. Отличительной особенностью внутрипрофильного распределения подвижных форм микроэлементов исследуемых типов криоземов является наличие двух максимумов: биогенного накопления в верхнем органогенном горизонте с последующим уменьшением вниз по профилю и вторым пиком в надмерзлотном горизонте. Биогенная аккумуляция в горизонтах АО, A_{cr} свойственна для подвижных форм Ni, Mn и Cd, надмерзлотная в горизонте CR – для подвижных форм Cr, Ni, Co, Mn, Cu.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В грунтах и почвах, подвергшихся техногенному воздействию, происходит перераспределение в составе подвижных форм микроэлементов. На первое место выступают элементы, типоморфные кимберлитам. А также в целом увеличивается процент содержания подвижных форм практически всех определенных микроэлементов. Грунты отличаются аномально высокими концентрациями подвижных форм Mn, Zn, Ni, Cr, Co, As с коэффициентами концентрации, варьирующими в очень широких пределах. Криоземам импактной зоны на сохранившихся участках леса свойственна поверхностная аккумуляция подвижных форм Mn, Ni, Zn и Co.

В целом почвенный покров промышленной площадки НГОКа на момент исследования характеризуется полиэлементным составом природно-техногенных аномалий. На основе расчета суммарного показателя загрязнения почвенного покрова Z_c выявлено пространственное увеличение участков с высокой и очень высокой категориями загрязнения. Основными Z_c-образующими элементами, определяющими высокий уровень загрязнения почв, являются Mn, Zn, Ni.

Природная аномалия в почвах проявляется в закономерном распределении подвижных форм микроэлементов в почвенной толще с накоплением в верхних органогенных и в надмерзлотном горизонтах, причем надмерзлотная аккумуляция выше биогенной, что является следствием природных геолого-геохимических условий формирования кимберлитовых полей. В зонах непосредственного воздействия объектов инфраструктуры горно-обогатительного комбината на поверхности сосредотачивается большое количество мелкодисперсной глинистой фракции, характеризующейся повышенным содержанием ассоциаций Cr-Ni-Co и Cu-Mn, что и проявляется в высоких концентрациях подвижных форм этих элементов в поверхностных горизонтах почв.

Конфигурация поверхностных техногенных аномалий в почвах соответствует направлению господствующих ветров западного и северо-западного направлений.

При нарушении почвенного покрова, целостности почвенного профиля, оголения минеральной части почвенного профиля происходит изменение геохимических условий, в результате чего большая часть микроэлементов переходит в подвижное мобильное состояние – водорастворимые и кислоторастворимые формы и т.д., т.е. становится более доступной для растений, растворимой в воде, что создает напряжение в общей экологической ситуации на территории воздействия горно-обогатительного комбината.

Полученные результаты очень важны для разработки мероприятий по реабилитации почвенного покрова в зоне воздействия горно-обогатительных комбинатов, проведения геоэкологического мониторинга и оценки устойчивости ландшафтов к химическому загрязнению. Эти данные послужат основой для прогнозирования загрязнения почв микроэлементами, в том числе и тяжелыми металлами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Žibret G., Gosar M., Miler M., Alijagić J.* Impacts of mining and smelting activities on environment and landscape degradation – Slovenian case studies // Land Degradation & Development. 2018. Vol. 29. Iss. 12. P. 4457-4470. DOI: 10.1002/ldr.3198

2. *Dhar A., Miller V.S., Wilkinson S.R., Naeth M.A.* Substrate and Topsoil Impact on Soil Water and Soil Temperature in Arctic Diamond Mine Reclamation // Soil Systems. 2022. Vol. 6. Iss. 1. № 12. DOI: 10.3390/soilsystems6010012

3. *Юркевич Н.В., Ельцов И.Н., Гуреев В.Н. и др.* Техногенное воздействие на окружающую среду в российской Арктике на примере Норильского промышленного района // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 12. С. 230-249. DOI: 10.18799/24131830/2021/12/3207

4. *Bloodworth A.J., Scott P.W., McEvoy F.M.* Digging the backyard: Mining and quarrying in the UK and their impact on future land use // Land Use Policy. 2009. Vol. 26. P. S317-S325. DOI: 10.1016/j.landusepol.2009.08.022

5. *Newman J.E., Levasseur P.A., Beckett P., Watmough S.A.* The impact of severe pollution from smelter emissions on carbon and metal accumulation in peatlands in Ontario, Canada // Environmental Pollution. 2023. Vol. 320. № 121102. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121102

6. *Benidire L., Benidire L., Boularbah A.* Impacts of mining activities on soil properties: case studies from Morocco mine sites // Soil Science Annual. 2020. Vol. 74. Iss. 4. P. 395-407. DOI: 10.37501/soilsa/133011

7. *Xiu-Wu Zhang, Lin-Sheng Yang, Yong-Hua Li et al.* Estimation of lead and zinc emissions from mineral exploitation based on characteristics of lead/zinc deposits in China // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2011. Vol. 21. Iss. 11. P. 2513-2519. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)61044-3

8. *Wilkin R.T., Lee T.R., Beak D.G. et al.* Groundwater co-contaminant behavior of arsenic and selenium at a lead and zinc smelting facility // Applied Geochemistry. 2018. Vol. 89. P. 255-264. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.12.011

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

9. *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. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2446

10. *Demkova L., Tomas. J., Bobulska L.* Assessment of soil heavy metal pollution in a former mining area – before and after the end of mining activities // Soil and Water Research. 2017. Vol. 12. Iss. 4. P. 229-236. DOI: 10.17221/107/2016-SWR

11. *Славиковский О.В., Славиковский Ю.В., Валиев Н.Н.* Недроемкость геотехнологий как основополагающий фактор воздействия горно-промышленного комплекса на окружающую среду // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 2. С. 70-75.

12. *Зеньков И.В.* Обзор зарубежных исследований в области экологии горно-добывающего производства // Горный журнал. 2016. № 10. С. 96-99. DOI: 10.17580/gzh.2016.10.20

13. *Abiola O., Adegbola O., Hu R., Atta R.* Assessment of trace metals contamination in stream sediments and soils in Abuja leather mining, southwestern Nigeria // Acta Geochimica. 2018. Vol. 37. Iss. 4. P. 592-613. DOI: 10.1007/s11631-017-0256-1

14. *Xufeng Fei, Zhaohan Lou, George Christakos et al.* The association between heavy metal soil pollution and stomach cancer: a case study in Hangzhou City, China // Environmental Geochemistry and Health. 2018. Vol. 40. Iss. 6. P. 2481-2490. DOI: 10.1007/s10653-018-0113-0

15. *Сарапулова Г.И.* Эколого-геохимическая оценка почв в зоне техногенных объектов // Записки Горного института. 2018. Т. 234. С. 658-662. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.658

16. *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. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2850

17. *Hu Zhenqi, Wang Peijun, Li Jing.* Ecological Restoration of Abandoned Mine Land in China // Jornal of Resources and Ecology. 2012. Vol. 3. Iss. 4. P. 289-296. DOI: 10.5814/j.issn.1674-764x.2012.04.001

18. *Янин Е.П.* Химический состав и эколого-геохимические особенности городских почв. Аналитический обзор // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2020. № 2. С. 40-73. DOI: 10.36535/0235-5019-2020-02-3

19. *Басова И.А., Иватанова Н.П., Копылов А.Б.* Оценка экологического состояния почв в регионах с развитой горной промышленностью // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2012. №1-2. С. 14-16.

20. *Naeth M.A., Wilkinson S.R.* Establishment of Restoration Trajectories for Upland Tundra Communities on Diamond Mine Wastes in the Canadian Arctic // Restoration Ecology. 2014. Vol. 22. Iss. 4. P. 534-543. DOI: 10.1111/rec.12106

21. *Sena K., Barton C., Hall S. et al.* Influence of spoil type on afforestation success and natural vegetative recolonization on a surface coal mine in Appalachia, United States // Restoration Ecology. 2015. Vol. 23. Iss. 2. P. 131-138. DOI: 10.1111/rec.12164

22. *Шафигулина Г.Т., Удачин В.Н., Филиппова К.А., Аминов П.Г.* Геохимические характеристики техногенных почв горно-промышленных ландшафтов Южного Урала // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2015. Т. 20. № 4 (80). С. 93-101.

23. *Myga-Piątek U.* Landscape management on post -exploitation land using the example of the Silesian region, Poland // Environmental and Socio-economic Studies. 2014. Vol. 2. Iss. 1. P. 1-8. DOI: 10.1515/environ-2015-0026

24. *Oelofse S.H.H.* Mine water pollution – acid mine decant, effluent and treatment: a consideration of key emerging issues that may impact the State of the Environment // Mining: Environment and Health Concerns. 2008. P. 83-91.

25. *Zabergja-Ferati F., Mustafa M.K., Abazaj F.* Heavy Metal Contamination and Accumulation in Soil and Plant from Mining Area of Mitrovica, Kosovo // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2021. Vol. 107. Iss. 3. P. 537-543. DOI: 10.1007/s00128-021-03223-6

26. *Fei Zang, Shengli Wang, Zhongren Nan et al.* Accumulation, spatio-temporal distribution, and risk assessment of heavy metals in the soil-corn system around a polymetallic mining area from the Loess Plateau, northwest China // Geoderma. 2017. Vol. 305. P. 188-196. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.06.008

27. *Xiao Qing, Zong Yutong, Lu Shenggao.* Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, Northeast China // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2015. Vol. 120. P. 377-385. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.06.019

28. *Неведров Н.П.* Профильное распределение и миграция тяжелых металлов в почвах Курской агломерации (модельные опыты) // Юг России: экология, развитие. 2020. Т. 15. № 1. С. 60-68. DOI: 10.18470/1992-1098-2020-1-60-68

29. *Yuebing Sun, Qixing Zhou, Xiaokui Xie, Rui Liu.* Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China // Journal of Hazardous Materials. 2010. Vol. 174. Iss. 1-3. P. 455-462. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.074

30. *Long Zhao, Yafei Xu, Hong Hou et al.* Source identification and health risk assessment of metals in urban soils around the Tanggu chemical industrial district, Tianjin, China // Science of The Total Environment. 2014. Vol. 468-469. P. 654-662. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.094

31. *Акламбетова К.М.* Экологические последствия разработок месторождений полезных ископаемых и их влияние на окружающую среду // Актуальные проблемы здоровья человека и формирование среды обитания: Материалы международной научно-практической конференции. 22 мая 2002, Караганда, Россия. Караганда: Изд-во КарГУ, 2002. С. 23-27.

32. *Fujun Niu, Zeyong Gao, Zhanju Lin et al.* Vegetation influence on the soil hydrological regime in permafrost regions of the Qinghai – Tibet Plaeau, China // Geoderma. 2019. Vol. 354. № 113892. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.113892

33. *Prach K., Karešová P., Jírová A. et al.* Do not neglect surroundings in restoration of disturbed sites // Restoration Ecology. 2015. Vol. 23. Iss. 3. P. 310-314. DOI: 10.1111/rec.12189

34. *Михальчук Н.В.* Подвижные формы тяжелых металлов и микроэлементов в почвах карбонатного ряда юго-запада Беларуси // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2017. № 3. С. 90-97.

35. *Гололобова А.Г.* Подвижные формы тяжелых металлов и микроэлементов в почвах криолитозоны в условиях техногенеза // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 12 (102). Часть 2. С. 49-54. DOI: 10.23670/IRJ.2020.102.12.043

36. *Таргульян В.О., Горячкин С.В., Караваева Н.А. и др.* Память почв: Почва как память биосферно-геосферно-антропогенных взаимодействий. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 692 с.

37. *Русанова Г.В., Шахтарова О.В.* Структурная организация и профильная дифференциация веществ в автоморфных почвах юго-востока Большеземельской тундры // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. № 3 (19). С. 18-32.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

38. *Горев Н.И., Герасимчук А.В., Проценко Е.В., Толстов А.В.* Тектонические аспекты строения Вилюйско-Мархинской зоны, их использование при прогнозировании кимберлитовых полей // Наука и образование. 2011. № 3. С. 5-10.

39. *Ладонин Д.В.* Соединения тяжелых металлов в почвах – проблемы и методы изучения // Почвоведение. 2002. № 6. С. 682-692.

40. *Сысо А.И.* Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2007. 227 с.

41. *Осинцева Е.В., Агишева С.Т., Горбунова Е.М. и др.* Система стандартных образцов научного методического центра Государственной службы стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов ФГУП «УНИИМ» // Стандартные образцы. 2015. № 2. С. 31-55.

42. *Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.

43. *Легостаева Я.Б., Ксенофонтова М.И., Дягилева А.Г.* Эколого-геохимический мониторинг почвенного покрова в зоне воздействия Нюрбинского ГОКа // Горный журнал. 2014. № 4. С. 117-121.

44. *Gololobova A.G., Legostaeva Ya.B.* Heavy metals in cryozems of Western Yakutia // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2019. Vol. 19. № 3.2. P. 239-246. DOI: 10.5593/sgem2019/3.2/S13.032

45. Полевой определитель почв России. М.: Почвенный институт им. В.В.Докучаева, 2008. 182 с.

46. *Дягилева А.Г.* Устойчивость к химическому загрязнению криоземов Западной Якутии. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Улан-Удэ: Институт общей и экспериментальной биологии Сибирского отделения РАН, 2015. 23 с.

47. *Ягнышев Б.С., Ягнышева Т.А., Зинчук М.Н., Легостаева Я.Б.* Экология Западной Якутии (геохимия геосистем: состояние и проблемы). Якутск: Изд-во Якутского научного центра Сибирского отделения РАН, 2005. 432 с.

48. *Legostaeva Ya.B., Gololobova A.G.* Long-term geochemical monitoring of the soil cover in the impact zone of diamond mining enterprises: a case study in the Nakyn kimberlite field, Russia // Environmental Monitoring and Assessment. 2021. Vol. 193. Iss. 6. № 337. DOI: 10.1007/s10661-021-09087-x

49. *Амосов П.В., Бакланов А.А., Маслобоев В.А.* Результаты оценки загрязнения атмосферы при пылении хвостохранилища (на базе трехмерного моделирования) // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 6. С. 87-94.

50. *Хованская М.А., Косинова И.И.* Влияние горнодобывающей и перерабатывающей деятельности на почвы Айхальского района (Саха-Якутия) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2010. № 1. С. 282-285.

51. *Легостаева Я.Б., Гололобова А.Г.* Особенности распределения микроэлементов в почвах фоновых и импактных зон на участках алмазодобычи на Северо-Западе сибирской платформы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 9. С. 142-153. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3364

***Авторы*: Я.Б.Легостаева,** *канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник*, *https://orcid.org/0000-0002-1556-9182* (*Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, Якутск, Россия*), **А.Г.Гололобова,** *канд. биол. наук, старший научный сотрудник*, *nuta0687@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0813-5404* (*Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, Якутск, Россия*), **В.Ф.Попов,** *доцент*, *https://orcid.org/0000-0001-9854-2825* (*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова, Якутск, Россия*), **В.С.Макаров,** *канд. биол. наук, старший научный сотрудник*, *https://orcid.org/0000-0002-4781-9027* (*Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера Северо-Восточного федерального университета им. М.К.Аммосова, Якутск*, *Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0