

ФИТОРЕМЕДИАЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КИПРЕЯ УЗКОЛИСТНОГО (CHAMAENERION ANGUSTIFOLIUM) В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

М.А. Пашкевич¹, Е.В. Казанина¹, Д.О. Нагорнов¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: evakazanina1234@gmail.com

Аннотация: Разработка методов фиторемедиации загрязненных территорий на основе аборигенных видов растений является одной из наиболее актуальных современных научно-практических задач. Проведенные мониторинговые исследования почвенного покрова Норильского промышленного района выявили превышение концентраций меди, никеля, свинца, стронция, хрома и цинка над фоновыми уровнями. В качестве фиторемедианта предложен аборигенный вид – кипрей узколистный (*Chamaenerion angustifolium*). Исследована его фиторемедиационная эффективность для восстановления почв Крайнего Севера, загрязненных тяжелыми металлами. Отбор проб выполнен на двенадцати площадках, включая селитебные, промышленные и рекреационные зоны города Норильска. Установлено, что вид способен аккумулировать ряд представленных металлов. Уровень их накопления варьирует в зависимости от формы элемента и точки отбора пробы. Коэффициенты биологического поглощения по подвижным формам превышают единицу, что свидетельствует об активной экстракции биологически доступной фракции, тогда как по валовому содержанию значение менее единицы, что указывает на стратегию растения-исключателя. Не выявлено признаков фитотоксичности (хлороз, некроз, угнетение роста и морфологические аномалии); растения демонстрировали нормальное развитие благодаря наличию физиологических барьеров. Результаты обосновывают перспективность использования кипрея узколистного для фиторемедиации техногенно загрязненных почв в арктических зонах на примере Норильской промышленной агломерации.

Ключевые слова: фиторемедиация, кипрей узколистный, тяжелые металлы, городские почвы, восстановление экосистемы, Крайний Север, Норильск, техногенное загрязнение почв.

Благодарность: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2024-0005 Новые подходы к проведению экологического мониторинга арктических экосистем, подверженных влиянию объектов минерально-сырьевого комплекса, и разработка технологий их комплексного восстановления).

Для цитирования: Пашкевич М. А., Казанина Е. В., Нагорнов Д. О. Фиторемедиационная эффективность кипрея узколистного (*chamaenerion angustifolium*) в условиях техногенного загрязнения почв Крайнего Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10-1. – С. 109–123. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_109.

Phytoremediation efficiency of *Chamaenerion angustifolium* in technogenically contaminated soils of the Far North

M.A. Pashkevich¹, E.V. Kazanina¹, D.O. Nagornov¹

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russia, e-mail: evakazanina1234@gmail.com

Abstract: The development of phytoremediation methods for contaminated areas based on native plant species is one of the most urgent modern scientific and practical challenges. Monitoring studies of the soil cover in the Norilsk agglomeration have revealed exceedances of copper, nickel, lead, strontium, chromium and zinc concentrations above background levels. *Chamaenerion angustifolium* is proposed as a native phytoremediant. Its phytoremediation efficiency for the restoration of Far North soils contaminated with heavy metals has been investigated. Sampling was carried out at 12 sites, including residential, industrial and recreational zones. It was found that the species accumulates a number of these metals. The level of accumulation varies depending on the element form and the sampling point. The bioaccumulation factors for mobile forms of metals exceed unity, indicating active extraction of the bioavailable fraction, whereas the values for gross content are below unity, pointing to an excluder plant strategy. No signs of phytotoxicity (chlorosis, necrosis, growth inhibition and morphological anomalies) were detected; plants demonstrated normal development due to the presence of physiological barriers. The results substantiate the prospects of using *Chamaenerion angustifolium* for phytoremediation of technogenically contaminated soils in Arctic zones using the Norilsk industrial agglomeration as an example.

Key words: phytoremediation, *Chamaenerion angustifolium*, heavy metals, urban soils, ecosystem restoration, Far North, Norilsk, technogenic soil pollution.

Acknowledgements: The research was carried out within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSRW-2024-0005 «New approaches to environmental monitoring of Arctic ecosystems affected by mineral resource complex facilities and development of technologies for their comprehensive restoration»).

For citation: Pashkevich M. A., Kazanina E. V., Nagornov D. O. Phytoremediation efficiency of *Chamaenerion angustifolium* in technogenically contaminated soils of the Far North. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10-1):109-123. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_109.

Введение

Активное промышленное освоение северных территорий России, начавшееся в XX в. и набравшее интенсивность в последние десятилетия, по сей день продолжает оставаться стратегическим вектором развития страны [1]. Прежде всего, оно обеспечило доступ к колоссальным минерально-сырьевым ресурсам, способствовало формированию промышленных центров и развитию инфраструктуры [2, 3]. При этом исторически

освоение осуществлялось по экстенсивной модели, где экономическая результативность и скорость добычи полезных ископаемых доминировали над принципами экологической безопасности и устойчивого развития [4–6]. В результате природные экосистемы Крайнего Севера, характеризующиеся уязвимостью, низкой скоростью биологических процессов и хрупким балансом, оказались в состоянии хронического техногенного воздействия и истощения [7–9].

Проблема усугубляется кумулятивной природой и долговременным характером негативных последствий промышленной деятельности в северных регионах [9]. В отличие от загрязнения гидросферы и атмосферы, динамика которых в определенной степени регулируется процессами адвекции, седиментации, химической трансформации и разбавления и пр., почвенный покров выполняет функцию основного геохимического барьера и ключевого компонента биосферы, аккумулирующего загрязняющие вещества на долгий срок [10, 11]. Критическое замедление процессов самоочищения почв Крайнего Севера обусловлено комплексом лимитирующих абиотических факторов, включая низкий температурный режим, короткий вегетационный период, слабую микробиологическую активность и явления, связанные с криогенезом [12]. В результате почвы трансформируются в источник вторичного загрязнения, постепенно высвобождая токсичные вещества в окружающую среду.

Среди наиболее опасных и распространенных загрязняющих веществ почв в районах расположения горнодобывающих, металлургических и энергетических комплексов выделяются тяжелые металлы (например, свинец, медь, цинк и иные) [13]. Высокая токсичность, устойчивость к деградации и свойство биологической аккумуляции тяжелых металлов обуславливают не только снижение почвенного плодородия, но и их вовлечение в трофические цепи, что формирует прямую опасность для живых организмов и стабильности арктических биоценозов [14, 15]. Таким образом, очистка почв от загрязнения тяжелыми металлами является насущной экологической задачей в северных регионах. Широко применяемые физико-химические методы ремедиации зачастую экономически невыгодны, сложны для

реализации в условиях криолитозоны и могут причинить дополнительный вред чувствительным экосистемам [16].

В связи с этим фиторемедиация — экологически ориентированная технология, основанная на способности растений-аккумуляторов к экстракции, трансформированию, испарению, фильтрации, деградации или иммобилизации загрязняющих соединений, — привлекает все более пристальное внимание как в мировой, так и в российской практике [17]. Данный метод обладает рядом значительных преимуществ для уязвимых северных экосистем: сравнительно низкая стоимость реализации, ландшафтная приемлемость, сохранение целостности почвенного профиля и способность стимулировать восстановление биологического потенциала нарушенных территорий. Тем не менее, применение фиторемедиации на территориях Крайнего Севера сталкивается с принципиальным экологическим ограничением.

Многие растения, способные эффективно аккумулировать тяжелые металлы, произрастающие в условиях умеренного или тропического климата (например, *Spinacia oleracea* [18], *Sinapis alba* и другие), в общем случае не толерантны к экстремальным факторам Арктики (низкие температуры, бедные почвы, короткий вегетационный период). Использование же интродуцированных видов сопряжено с риском биологической инвазии, способной нарушить местные биоценозы и создать новые экологические угрозы [19]. Следовательно, приоритетной задачей является поиск и изучение аборигенных видов, сочетающих способность к аккумуляции металлов, адаптацию к имеющимся условиям для создания устойчивых фиторемедиационных технологий.

Перспективным объектом для исследований в данной области представляется кипрей узколистный (*Chamaenerion*

angustifolium (L.) — широко распространенный в Северном полушарии многолетний травянистый вид [20]. Обладая стратегией пионерного вида, растение успешно колонизирует нарушенные и техногенно трансформированные местообитания (отвалы, промышленные площадки, обочины) [21]. Высокая экологическая пластичность, интенсивный рост, способность к формированию монодоминантных сообществ обуславливает его потенциальную пригодность для фиторемедиации. Имеющиеся отдельные научные данные также свидетельствуют о толерантности данного вида к присутствию металлов в субстрате и способности к их аккумуляции [22, 23].

Цель данного исследования заключается в оценке способности местного вида — кипрея узколистного — к извлечению и аккумуляции тяжелых металлов (на примере конкретных приоритетных

поллютантов) из техногенно загрязненных почв.

Методы

Почвенные пробы и образцы кипрея узколистного (надземная и подземная фитомасса) были отобраны в рамках полевых исследований на 12 пробных площадках, расположенных в г. Норильске (рис. 1), красным контуром отмечены крупные промышленные источники загрязнения и роза ветров. Процедура выбора пробных площадок, отбора и последующей подготовки проб к анализу выполнялась в соответствии с требованиями государственного стандарта ГОСТ 17.4.4.02-2017. На территории города были намечены точки отбора проб, характеристика которых представлена в табл. 1.

Объединенные пробы почвы массой от 1 кг формировали из точечных отбо-



Рис. 1. Пространственное размещение пробных площадок в районе исследования (г. Норильск, Россия) [составлено авторами на картографической основе <https://www.google.com/maps>]

Fig. 1. Placement of sampling points in the study area (Norilsk, Russia). Compiled by the authors on a cartographic basis <https://www.google.com/maps>

Таблица 1

Характеристика и координаты пробных площадок [составлено авторами]
Characteristics and coordinates of the sampling points [Compiled by authors]

№	Место отбора пробы	Широта, ° N	Долгота, ° E
1	Селитебная территория вблизи Медного завода	69,355363	88,166033
2	Территория складирования металлолома, гаражный кооператив	69,367632	88,179718
3	Территория складирования металлолома, железнодорожный путь	69,413640	88,284145
4	Территория р. Купец, прилегающая к хвостохранилищу	69,372797	88,057735
5	Селитебная территория (детская площадка)	69,338964	88,215697
6	Рекреационная зона (туристическая база)	69,378840	88,335001
7	Открытый спортивный комплекс	69,345259	88,218563
8	Селитебная территория: «зеленый остров»	69,356001	88,196398
9	Коммунально-складская зона	69,349069	88,229339
10	Граница коммунально-складской зоны	69,341610	88,242464
11	Тундровая зона	69,368415	88,278351
12	Селитебная территория: «зеленый остров»	69,363566	88,195468

ров, выполненных методом конверта. С каждой площадки по данной методике изымали пять точечных проб минимальной массой 200 г, которые в дальнейшем сводили в один совокупных образцов. Отбор и анализ проб проводился в трех повторностях. Забор материала осуществлялся с помощью пластикового совка с горизонтов 0—20 см.

Для определения химических веществ почвенные пробы были равномерно распределены на бумаге, крупные комки были размельчены фарфоровым пестиком, иные включения (камни, растительность, насекомые) были удалены. Из совокупных проб путем квартования изымалась представительная часть. Последующая обработка образца состояла в высушивании до воздушно-сухого состояния, механическом измельчении в фарфоровой ступке и фракционировании посредством просеивания через сито с размером ячеек 0,1 мм и 1 мм.

Для предварительного скрининга и качественного определения элементного состава проб почв применен рент-

генофлуоресцентный анализ (согласно ГОСТ 33850-2016). В двенадцати пробах обнаружены 16 элементов. По результатам был подобран перечень приоритетных тяжелых металлов (хром, никель, медь, стронций, свинец и цинк) для последующего точного количественного определения.

Определение влажности для пересчета содержания на абсолютно-сухое состояние в пробах определялось методом термогравиметрического анализа (ГОСТ 28268-89) с использованием прибора Leco TGA-701. Для извлечения подвижных форм был приготовлен ацетатно-аммонийный буферный раствор с водородным показателем, равным 4,8.

Подготовка растительных образцов кипрея узколистного к анализу включала несколько этапов. Пробы растений предварительно были тщательно промыты дистиллированной водой для удаления адсорбированных частиц почвы и атмосферных осадений. Это позволило предотвратить внешнее загрязнение проб и анализировать исключительно

металлы, аккумулярованные растительными тканями. После промывки образцы кипрея узколистного были равномерно разложены на фильтровальной бумаге и высушены до воздушно-сухого состояния в прохладном проветриваемом помещении, защищенном от солнечного света. Высушенный материал измельчали на лабораторной мельнице, оснащенной ситом (диаметр 1 мм). Из полученного порошка отбирали аналитические навески массой 0,1 г, которые подвергали мокрому озолению. Для этого навеску помещали в сосуды, добавляли 1 см³ дистиллированной воды, 2 см³ концентрированной азотной кислоты и 2 см³ перекиси водорода, затем помещали их в систему HotBlock для завершения разложения в течение 2 ч. Полученный после разложения раствор фильтровали, переносили в полиэтиленовые мерные колбы объемом 20 см³ и доводили до метки дистиллированной водой.

Количественное определение валового содержания и подвижных форм металлов в образцах проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре ICP-AES-9000. Анализ был выполнен в соответствии с методикой М-МВИ-80-2008 (Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии). Для исключения систематической погрешности, связанной с чистотой реактивов и оборудованием, в каждой аналитической серии учитывались холостые пробы, приготовленные из тех же реактивов по идентичному протоколу.

На основании полученных данных о концентрациях элементов в почве рассчитывался коэффициент контрастности по формуле

$$K_{\text{пдк}}^{\text{э}} = C^{\text{э}} / \text{ОДК(фон)} \quad (1)$$

где *ОДК(фон)* — ориентировочно допустимая концентрация или фоновая концентрация элемента в почве, мг/кг; *C^э* — содержание элемента в почве, мг/кг.

Для образцов кипрея узколистного, собранных на пробных площадках, определяли коэффициенты биологического поглощения (*BAF*). Расчет выполнялся по формуле

$$BAF = C_p / C_r, \quad (2)$$

где *C_p* — содержание элемента в биомассе растения, мг/кг; *C_r* — содержание элемента в почве (валовое содержание, концентрация подвижных форм тяжелых металлов), мг/кг.

Результаты и их обсуждение

В ходе исследования было установлено превышение в почве как ориентировочно допустимых концентраций (*ОДК*) валового содержания, так и предельно допустимых концентраций (*ПДК*) подвижных форм ряда тяжелых металлов (табл. 2). Данная тенденция отмечается для всех анализируемых элементов. Наибольшая контрастность загрязнения по валовым формам наблюдается для никеля и меди, а также для хрома (по фоновым концентрациям) (рис. 2), массовая доля подвижных форм демонстрирует максимальное превышение *ПДК* и фоновых показателей преимущественно по меди и никелю. Таким образом, подтверждена гипотеза о том, что кипрей узколистный толерантен к высоким концентрациям тяжелых металлов и способен аккумулятировать подвижные формы без проявления признаков фитотоксичности.

По результатам количественного анализа можно сделать вывод о том, что наибольший коэффициент контрастности концентрации тяжелых металлов по валовому содержанию — в местах отбора проб № 5, 2, 9. Подобное распределение объясняется прямым поступлением соединений с металлами от тех-

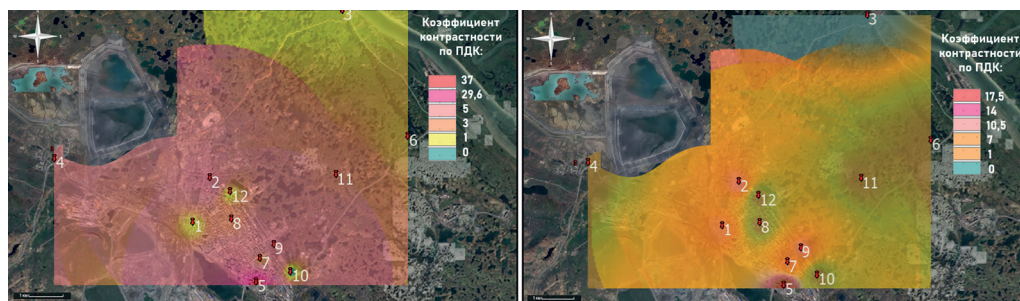


Рис. 2. Карты загрязнения почвенного слоя Ni (слева) и Cu (справа) по валовому содержанию относительно ПДК [составлено авторами]

Fig. 2. Map of contamination of the Ni (left) and Cu (right) soil layer (gross form) relative to the MPC. Compiled by the authors

ногенных объектов (точки 2, 9) и вторичным переносом загрязненных частиц в зону рекреации (локальное загрязнение в точке 5). Максимальные значения коэффициентов контрастности для подвижных форм исследуемых элементов

отмечены в точках 4 (территория р. Купец, прилегающая к хвостохранилищу) и 9 (промышленная зона). Совокупность полученных данных свидетельствует о комплексном характере загрязнения почвенного покрова в районе исследова-

Таблица 2

Средние концентрации определенных элементов

в исследованных почвенных пробах [составлено авторами]

Average concentrations of certain elements in the studied soil samples [Compiled by authors]

Характеристика	Sr	Cu	Ni	Cr	Pb	Zn
	Содержание металлов (ppm, мг/кг): валовая/подвижная формы					
1 проба	224/39*	289/126*	104/9,5*	520/0,33*	<0,05	46/6,6*
2 проба	206/36	1198/260	818/46	855/1,2	23/1,1	94/17
3 проба	199/47	95/4,4	101/3,5	363/1,8	14/ <0,05	61/35
4 проба	157/40	1040/397	446/154	526/0,92	141/6,2	45/6,9
5 проба	178/37	2821/81	3002/84	552/0,22	95/2,2	276/37
6 проба	97/54	320/28	230/33	406/1,6	<0,05	35/5,0
7 проба	190/25	436/63	220/13	509/0,6	<0,05	142/25
8 проба	135/52	645/96	247/27	446/1,4	<0,05	76/12
9 проба	183/28	1315/310	703/89	474/2,0	61/3,8	113/18
10 проба	179/18	167/12	17/2,7	428/0,44	<0,05	44/7,1
11 проба	126/43	507/40	369/48	501/1,5	19/1,0	45/5,2
12 проба	159/60	335/37	157/11	350/0,87	<0,05	34/9,2
ОДК/ПДК	не нормируется	132/3	80/4	не нормируется	130/6	220/23
Фоновые концентрации	180–300/ 10,5–25,5	20–47/ 1,4–3,5	17–58/ 0,8–6,7	70–200/ 6,0	9–42/ 0,05–6,8	45–172/ 1,1–23,0

* Погрешность измерений $\pm 30\%$.

Таблица 3

Концентрация тяжелых металлов в биомассе кипрея узколистного**[составлено авторами]****Concentrations of heavy metals in the biomass of *Chamaenerion angustifolium*****[Compiled by authors]**

Характеристика	Sr	Cu	Ni	Cr	Pb	Zn
	Содержание металлов (ppm, мг/кг)					
1 проба	24	198	43	6,7	<0,05	29
2 проба	30	124	37	5,5	11	50
3 проба	61	16	29	3,1	10	35
4 проба	79	324	100	7,5	31	71
5 проба	48	31	35	6,8	14	40
6 проба	39	71	36	0,85	<0,05	56
7 проба	45	100	50	10	<0,05	47
8 проба	58	88	37	3,9	<0,05	76
9 проба	27	102	47	10	24	42
10 проба	47	51	21	8,5	<0,05	81
11 проба	74	108	61	5,0	10	31
12 проба	64	163	37	8,0	<0,05	52
Погрешность измерений $\pm 30\%$.						

ния, что обусловлено длительной историей промышленной деятельности.

Степень загрязнения оценена относительно гигиенических нормативов (ПДК, ОДК) на основании действующих санитарных правил СанПиН 1.2.3685-21 (применительно к почвам с водородным показателем (KCl) более 5,5).

В качестве фоновых уровней валового содержания элементов использован мировой диапазон кларковых значений [24]; для подвижных форм за фоновые приняты концентрации, характерные для различных типов почв [25, 26].

Основные загрязняющие компоненты почвы были выявлены в тканях растений во всех 12 точках отбора (за исключением свинца (Pb)). Концентрации тяжелых металлов, аккумулированных в биомассе кипрея узколистного, представлены в табл. 3. Уровень их накопления варьирует в зависимости от компонента и расположения пробной площад-

ки, демонстрируя, в целом, корреляцию с уровнем их содержания в почвенном покрове. Ведущая роль в общем накоплении элементов принадлежит меди, цинку, а также стронцию и никелю. Максимальные среди всех исследованных проб суммарные содержания тяжелых металлов в растениях зафиксированы в точке отбора проб № 4. Выявление исследуемых элементов в образцах растений подтверждает, что кипрей узколистный обладает свойством их аккумуляции из сложной по составу загрязненной почвенной среды.

Также для количественной оценки интенсивности перехода элементов из почвы в растение был рассчитан коэффициент биологической аккумуляции — *BAF* (рис. 3). *BAF* является ключевым показателем, характеризующим фиторе медиационный потенциал вида и его роль в образовании биогеохимических барьеров. Анализ *BAF* выявил принци-

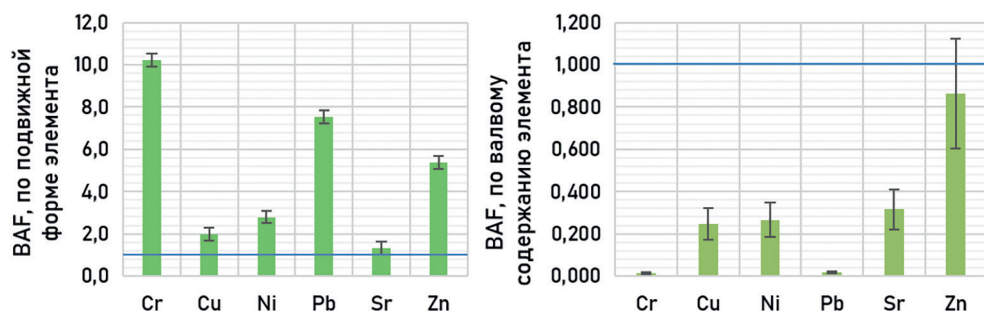


Рис. 3. Коэффициент биологической аккумуляции по подвижной форме (слева) и по валовому содержанию (справа) тяжелых металлов кипреем узколистым [составлено авторами]

Fig. 3. Bioaccumulation factors for mobile fraction and gross content of heavy metals by *Chamaenerion angustifolium* [Compiled by authors]

пиальные различия в стратегии накопления микроэлементов кипреем узколистым в зависимости от формы их нахождения в почве.

При расчете *BAF* относительно подвижных форм значения всех исследуемых элементов в растительных пробах превысили единицу. Данный факт свидетельствует о высокой интенсивности поглощения наиболее мобильных форм металлов из почвенной среды, что и определяет их миграционную способность и потенциальную опасность для биоты.

Для следующих химических элементов (хром, свинец, цинк) показатели аккумуляции были наибольшими, что свидетельствует о высоком уровне их накопления и говорит об активации перемещения этих элементов внутри растения, а также об отсутствии явных физиологических ограничений для транслокации биологически доступных ионов данных элементов в биомассу.

Коэффициент биологической аккумуляции, рассчитанный по валовому содержанию, для всей группы компонентов не превысил единицы. При этом наиболее высокие показатели были зарегистрированы для цинка ($BAF = 0,9$) и стронция ($BAF = 0,3$), что коррелирует с их физиологической мобильностью в растительных тканях. Величины *BAF* для

никеля и меди составили 0,27 и 0,25 соответственно. Минимальные показатели биологического поглощения кипреем узколистым отмечены у свинца (0,16) и хрома (0,013), это характерно для травянистых растений, поскольку данные элементы прочно связываются в корнях и слабо траслоцируются в побеги. Низкая аккумуляция свинца, несмотря на высокое валовое содержание, может объясняться локализацией металла в клеточных стенках корней и его низкой подвижностью в растительных тканях.

Интерпретация полученных результатов указывает на ряд важных закономерностей, раскрываемых контрастом между высокими показателями *BAF* по подвижным формам и низкими величинами, рассчитанными по валовому содержанию тяжелых металлов.

Незначительные показатели *BAF* по валовым формам позволяют предположить, что кипрей узколистый представляет собой растение-исключитель. Данная стратегия предполагает наличие физиологических барьеров, ограничивающих общее поступление токсичных веществ в растение, что представляет собой механизм защиты от летального накопления элементов в тканях [27]. При этом высокие значения *BAF*, рассчитанные для подвижных форм (например, хром или свинец), на фоне их

минимальных валовых коэффициентов биологической аккумуляции свидетельствуют о селективности поглощения. Несмотря на значительное общее содержание исследуемых тяжелых металлов в почве, большая часть этих элементов прочно связана в инертных минеральных формах и недоступна для растений. Именно биологически доступная фракция, представляющая непосредственную опасность для живых организмов и устойчивости экосистем, поглощается растением с высокой эффективностью.

По результатам визуальной оценки выявлено отсутствие у кипрея узколистного на всех исследованных площадках, включая наиболее загрязненные, внешних признаков фитотоксичности, таких как хлороз, некроз, угнетение роста или морфологические аномалии. Ввиду отсутствия фоновых участков в районе исследования количественная оценка индекса толерантности невозможна, однако визуальное сравнение с морфометрическими характеристиками растений позволяет заключить, что видимых отклонений не зафиксировано. Размеры (высота 60–140 см) и форма листьев (длина 5–9 см, ширина 1–2 см), стеблей, корней (до 1,5 м) соответствовали норме [28]. Данный факт может указывать на высокую физиологическую толерантность вида к комплексному воздействию исследуемых металлов, что является необходимым условием для рассмотрения данного вида в качестве растения для фиторемедиационных технологий.

Вместе с тем данное исследование имеет ряд ограничений. Отбор проб проведен однократно, что не позволяет оценить сезонную динамику накопления металлов. Полученные результаты справедливы для почв Норильского промышленного района, их перенос на другие арктические территории при всей перспективности требует дополнительных исследований.

Можно сформулировать следующую рекомендацию по применению кипрея узколистного в целях фиторемедиации — это возможность его высадки даже при высоком уровне техногенного загрязнения металлами. С учетом особенности районов Крайнего Севера, где наблюдается энергетический дефицит, стратегия исключения и иммобилизации позволяет кипрею узколиственному минимизировать затраты на детоксикацию, что позволит ему выживать даже на сильнозагрязненных почвах [29]. Использование предложенного вида будет эффективно на техногенно загрязненных почвах, прилегающих в первую очередь к хвостохранилищам, где были выявлены максимальные коэффициенты контрастности загрязнения.

К перспективному пути развития данного направления исследования можно отнести изучение долгосрочной динамики снижения подвижных форм металлов, а также определение граничных условий, то есть механизмов миграции тяжелых металлов в надземную биомассу с разделением растения на подземную и наземную части.

Заключение

Анализ результатов проведенной работы показал, что в почвенных горизонтах Норильского промышленного района содержатся высокие концентрации таких элементов, как медь, хром, никель, свинец, стронций и цинк, которые существенно превышают фоновые значения и установленные нормативы, что свидетельствует о наличии загрязнения, которое сформировалось из-за длительного воздействия горно-обогатительного комбината. В результате этого воздействия был нарушен баланс в хрупких арктических экосистемах, что с учетом низкой скорости естественного самоочищения почв потребует существенных затрат на восстановление и реабилитацию.

Кипрей узколистый, обладающий ключевыми адаптивными характеристиками (например, экологическая пластичность, интенсивный рост, значительная биомасса), проявляет толерантность к экстремальным климатическим факторам, включая низкие температуры, характерные для арктических и бореальных регионов. Наличие данных свойств формирует комплексную предпосылку для использования кипрея узколистного в качестве перспективного вида при разработке фиторемедиационных технологий в условиях Крайнего Севера.

Выявлено, что в условиях высокого уровня загрязнения почв у образцов кипрея узколистного отсутствовали статистически значимые морфологические отличия от растений, выращенных в фоновых условиях. Фиксация нормальных показателей роста и развития прямо указывает на пригодность вида для формирования устойчивого растительного покрова на загрязненных участках, что является одним из основных условий для фиторемедиации.

Ключевым результатом в исследовании являются количественные данные, характеризующие аккумуляционную способность кипрея узколистного. Анализ коэффициентов биологической аккумуляции, рассчитанных для подвижных форм элементов, выявил их высокие значения, демонстрирующие способность вида активно извлекать наиболее биологически доступные фракции металлов из почв, которые представляют опасность из-за своей миграционной активности и легкого включения в трофические сети. При этом значения коэффициента биологической аккумуляции

по валовому содержанию исследуемых элементов оказались существенно ниже единицы, что указывает на наличие у растений физиологических барьеров и механизмов иммобилизации, которые предотвращают избыточное накопление токсичных веществ в надземной биомассе.

На основе полученных результатов сделан вывод о высокой практической применимости кипрея узколистного для восстановления территорий, загрязненных тяжелыми металлами, в районе расположения горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, вблизи хвостохранилищ, в местах складирования отходов и на прилегающих селитебных территориях. Установленная устойчивость вида к исследуемым элементам, его способность развиваться в экстремальной среде и специфическое взаимодействие с поллютантами обосновывают включение данного вида в программы фиторемедиации техногенных территорий, в частности, в г. Норильске.

Высадка семенами в начале вегетационного периода без предварительного снижения содержания металлов обеспечивает фитостабилизацию подвижных форм и снижение их миграционной активности.

Снижение миграционной способности и токсичности тяжелых металлов путем их иммобилизации в корневой зоне и в тканях растения является энергетически более выгодной и адаптивной для суровых арктических условий, что делает *Chamaenerion angustifolium* перспективным кандидатом для создания устойчивых восстановительных технологий на Крайнем Севере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Череповицын А. Е., Стрельченко К. А. Перспективы восстановления и стратегического развития слюдяной отрасли Российской Федерации: арктический фокус // Север и рынок: формирование экономического порядка. — 2025. — № 3. — С. 53–68. DOI: 10.37614/2220-802X.3.2025.89.004.

2. Череповицын А. Е., Цветков П. С., Евсеева О. О. Критический анализ методических подходов к оценке устойчивости арктических нефтегазовых проектов // Записки Горного института. — 2021. — Т. 249. — С. 463–478. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.15.
3. Григорьев М. Н. Локализация минерально-сырьевых центров нефти и газа как объектов управления развитием ресурсной базы Арктической зоны // Геология нефти и газа. — 2024. — № 3. — С. 65–79. DOI: 10.47148/0016-7894-2024-3-65-79.
4. Дружинин П. В. Влияние развития экономики четырех северных национальных округов на окружающую среду в конце XX — начале XXI века // Вестник Сургутского государственного педагогического университета. — 2024. — № 6 (93). — С. 86–93. DOI: 10.69571/SSPU.2024.93.6.010.
5. Чукаева М. А., Петров Д. С., Малыгин Н. А. Использование белокрыльника болотного в условиях Севера для фиторемедиации промышленных сточных вод от металлов на примере АО «Карельский окатыш» // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15. — № 3. — С. 116–126. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-116-126.
6. Юркевич Н. В., Ельцов И. Н., Гуреев В. Н., Мазов Н. А., Юркевич Н. В., Еделев А. В. 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.
7. Харько П. А., Данилов А. С. Оценка эффективности нейтрализации и очистки кислых вод от металлов золой при использовании альтернативного топлива из коммунальных отходов // Записки Горного института. — 2025. — Т. 274. — С. 167–176. № 16463. <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16463/16270>.
8. Zhukovskiy Y. L., Tsvetkov P., Buldysko A., Malkova Y., Stoianova A., Koshenkova A. Scenario modeling of sustainable development of energy supply in the Arctic // Resources. 2021, vol. 10, no. 12, article 124. DOI: 10.3390/resources10120124.
9. Чукаева М. А., Пухальский Я. В., Лоскутов С. И., Сидорова В. Р., Воробаева Е. В., Матвеева В. А. Оценка изменения фитоэкстракции тяжелых металлов бархатцами прямостоячими (*Tagetes erecta*) из загрязненных почв Норильска при использовании гуминовых добавок // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14. — № 1. — С. 90–102. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-90-102.
10. Zhou J., Li Y., Zhao X., Yin T. Research on the impact of atmospheric environment self-purification capacity on fog-haze pollution // Atmosphere. 2025, vol. 16, no. 318. pp. 1–18. DOI: 10.3390/atmos16030318.
11. Чукаева М. А., Сапелко Т. В. Оценка экологического состояния водных экосистем по изучению донных отложений озер // Записки Горного института. — 2025. — Т. 271. — С. 53–62. № 16225. <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16225/16212>.
12. Zhang Q., Zhang X., Lara M. J., Li Z., Xiao J., Zhao K., Hu T. Impacts of abiotic and biotic factors on tundra productivity near Utqiagvik, Alaska // Environmental Research Letters. 2023, vol. 18, no. 9, 094070. DOI: 10.1088/1748-9326/acf7d6.
13. Васильчук Ю. К. Норильская промышленная эколого-геологическая система, ее геокриологические особенности и техногенное воздействие на нее // Арктика и Антарктика. — 2025. — № 4. — С. 50–88. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.4.75042.
14. Wang X., Dai Z., Lin J., Zhao H., Yu H., Ma B., Hu L., Shi J., Chen X., Liu M., Ke X., Yu Y., Dahlgren R. A., Xu J. Heavy metal contamination collapses trophic interactions in the soil microbial food web via bottom-up regulation // Soil Biology and Biochemistry. 2023, vol. 184, article 109058. DOI: 10.1016/j.soilbio.2023.109058.
15. Пашкевич М. А., Коротаева А. Э., Матвеева В. А. Экспериментальное моделирование системы болотных биогеоценозов для повышения эффективности очистки карьерных вод // Записки Горного института. — 2023. — Т. 263. — С. 785–794. <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16180/16155>.
16. Strizhenok A. V., Korelskiy D. S., Choi Y. Assessment of the efficiency of using organic waste from the brewing industry for bioremediation of oil-contaminated soils // Journal of Ecological Engineering. 2021, vol. 22, no. 4, pp. 66–77. DOI: 10.12911/22998993/133966.
17. Acharya A., Bellaloui N., Pilipovic A., Perez E., Maddox-Mandolini M., De La Fuente H. Current assessment and future perspectives on phytoremediation of heavy metals // Plants. 2025, vol. 14, no. 18, article 2847. DOI: 10.3390/plants14182847.

18. Maher S., Fazal A., Khan S., Soomro S., Naz Channa F., Essa M., Anwar A., Kareem A., Imran M., Mina G., Khawaja S., Alanazi M., Al Mutairi M. Comparative assessment of *Spinacia oleracea* and *Brassica juncea* for efficient phytoremediation of heavy metal contaminated soils // *International Journal of Phytoremediation*. 2025, pp. 1 – 11. DOI: 10.1080/15226514.2025.2586661.
19. Поклонов В. А., Остроумов С. А., Аникина Е. В., Садчиков А. П., Глебов В. В., Ерофеева В. В. Элодея канадская: интродукция, фиторемедиация и контроль распространения // *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. — 2024. — Т. 21. — № 1. — С. 24 – 32. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-1-24-32.
20. Бояринцев Д. И., Кузьминов И. В., Брютова К. В., Русакова О. А. Стандартизация сырья, полученного из надземных органов кипрея узколистного (*Chamaenerion angustifolium* L.) // *Химия растительного сырья*. — 2024. — № 3. — С. 177 – 187. DOI: 10.14258/jcprm.20240312495.
21. Zharkova D. A., Kuyantseva N. B., Mumber A. G., Veselkin D. V. Changes in the diversity of the herb-shrub layer of pine forests caused by severe pollution and fire disturbances in the Southern Urals // *Biology Bulletin*. 2024, vol. 51, no. 2, pp. 208 – 217. DOI: 10.1134/S1062359024611480.
22. Корнилков С. В., Антонинова Н. Ю., Собенин А. В., Усманова В. А., Усманов А. И. Об основных положениях методики проектирования мероприятий, локализирующих миграцию тяжелых металлов в почвах и техногенных грунтах // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. — 2024. — Т. 166. — № 6. — С. 85 – 94. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-85-94.
23. Шапошникова Л. М., Раскоша О. В., Рачкова Н. Г. Фиторемедиационный потенциал иван-чая узколистного и канареечника тростниковидного в условиях полиэлементного загрязнения // *Теоретическая и прикладная экология*. — 2023. — № 1. — С. 162 – 169. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-1-162-169.
24. Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. — М.: Изд-во АН СССР, 1957. — 200 с.
25. Ильин В. Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. — Новосибирск: Наука, 1991. — 150 с.
26. Sverchkov I., Gvozdetzkaya M. Quantitative determination of sulfate sulfur in soils and sediments using the S-K α and S-K β X-ray spectra and PLS regression // *Spectrochimica Acta. Part B. Atomic Spectroscopy*. 2024, vol. 218, article 106992. DOI: 10.1016/j.sab.2024.106992.
27. Винтоняк В. А., Попова И. С. Особенности аккумуляции никеля в органах растений-фиторемедиантов // *Научно-агрономический журнал*. — 2025. — № 3 (130). — С. 25 – 31. DOI: 10.34736/FNC.2025.130.3.003.25-31.
28. Найда Н. М. Рост, развитие и анатомическая структура вегетативных органов иван-чая узколистного // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. — 2016. — № 45. — С. 11 – 17. <https://cyberleninka.ru/article/n/rost-razvitie-i-anatomicheskaya-struktura-vegetativnyh-organov-ivan-chaya-uzkolistnogo>.
29. Дмитриева Д. М., Чанышева А. Ф. Вклад добывающих компаний в устойчивое развитие минерально-сырьевой базы Арктического региона: новый подход к оценке и взаимодействию ключевых акторов // *Север и рынок: формирование экономического порядка*. — 2024. — № 2. — С. 71 – 87. DOI: 10.37614/2220-802X.2.2024.84.006. **ПРАБ**

REFERENCES

1. Cherepovitsyn A. E., Strel'chenko K. A. Prospects for the revitalization and strategic development of the Russian mica industry: A focus on the Arctic. *The North and the Market: Forming the Economic Order*. 2025, no. 3, pp. 53 – 68. [In Russ]. DOI: 10.37614/2220-802X.3.2025.89.004.
2. Cherepovitsyn A. E., Tsvetkov P. S., Evseeva O. O. Critical analysis of methodological approaches to assessing sustainability of arctic oil and gas projects. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 249, pp. 463 – 478. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.15.
3. Grigor'ev M. N. Localization of oil and gas resource centres – objects of management of the Arctic zone resource base development. *Russian Oil and Gas Geology*. 2024, no. 3, pp. 65 – 79. [In Russ]. DOI: 10.47148/0016-7894-2024-3-65-79.
4. Druzhinin P. V. The impact of the economic development of the four northern national districts on the environment in the late XX – early XXI century. *Surgut state pedagogical university bulletin*. 2024, no. 6 (93), pp. 86 – 93. [In Russ]. DOI: 10.69571/SSPU.2024.93.6.010.

5. Chukaeva M. A., Petrov D. S., Malygin N. A. The use of the *Calla Palustris* for phytoremediation of industrial wastewater from metals in the conditions of the North on the example of JSC «Karelskiy Okatysh». *Arctic: Ecology and Economy*. 2025, vol. 15, no. 3, pp. 116–126. [In Russ]. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-116-126.
6. Yurkevich N. V., El'cov I. N., Gureev V. N., Mazov N. A., Yurkevich N. V., Edelev A. V. Technogenic effect on the environment in the Russian Arctic by the example of the Norilsk industrial area. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021, vol. 332, no. 12, pp. 230–249. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2021/12/3207.
7. Kharko P. A., Danilov A. S. Evaluation of the effectiveness of neutralization and purification of acidic waters from metals with ash when using alternative fuels from municipal waste. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 274, pp. 167–176, no. 16463. [In Russ]. <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16463/16270>.
8. Zhukovskiy Y. L., Tsvetkov P., Buldysko A., Malkova Y., Stoianova A., Koshenkova A. Scenario modeling of sustainable development of energy supply in the Arctic. *Resources*. 2021, vol. 10, no. 12, article 124. DOI: 10.3390/resources10120124.
9. Chukaeva M. A., Puhalsky Y. V., Loskutov S. I., Sidorova V. R., Voropaeva E. V., Matveeva V. A. Assessment of changes in the heavy-metal phytoextraction by *tagetes erecta* from contaminated soils of Norilsk using humic additives. *Arctic: Ecology and Economy*. 2024, vol. 14, no. 1, pp. 90–102. [In Russ]. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-90-102.
10. Zhou J., Li Y., Zhao X., Yin T. Research on the impact of atmospheric environment self-purification capacity on fog-haze pollution. *Atmosphere*. 2025, vol. 16, no. 318. pp. 1–18. DOI: 10.3390/atmos16030318.
11. Чукаева М. А., Сапелко Т. В. Оценка экологического состояния водных экосистем по изучению донных отложений озер. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 271, pp. 53–62, no. 16225. [In Russ]. <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16225/16212>.
12. Zhang Q., Zhang X., Lara M. J., Li Z., Xiao J., Zhao K., Hu T. Impacts of abiotic and biotic factors on tundra productivity near Utqiagvik, Alaska. *Environmental Research Letters*. 2023, vol. 18, no. 9, 094070. DOI: 10.1088/1748-9326/acf7d6.
13. BVasil'chuk Yu. K. Norilsk industrial ecological-geological system, its geocryological features, and anthropogenic impact on it. *Arctic and Antarctica*. 2025, no. 4, pp. 50–88. [In Russ]. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.4.75042.
14. Wang X., Dai Z., Lin J., Zhao H., Yu H., Ma B., Hu L., Shi J., Chen X., Liu M., Ke X., Yu Y., Dahlgren R. A., Xu J. Heavy metal contamination collapses trophic interactions in the soil microbial food web via bottom-up regulation. *Soil Biology and Biochemistry*. 2023, vol. 184, article 109058. DOI: 10.1016/j.soilbio.2023.109058.
15. Pashkevich M. A., Korotaeva A. E., Matveeva V. A. Experimental simulation of a system of swamp biogeocenoses to improve the efficiency of quarry water treatment. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 263, pp. 785–794. [In Russ]. <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16180/16155>.
16. Strizhenok A. V., Korelskiy D. S., Choi Y. Assessment of the efficiency of using organic waste from the brewing industry for bioremediation of oil-contaminated soils. *Journal of Ecological Engineering*. 2021, vol. 22, no. 4, pp. 66–77. DOI: 10.12911/22998993/133966.
17. Acharya A., Bellaloui N., Pilipovic A., Perez E., Maddox-Mandolini M., De La Fuente H. Current assessment and future perspectives on phytoremediation of heavy metals. *Plants*. 2025, vol. 14, no. 18, article 2847. DOI: 10.3390/plants14182847.
18. Maher S., Fazal A., Khan S., Soomro S., Naz Channa F., Essa M., Anwar A., Kareem A., Imran M., Mina G., Khawaja S., Alanazi M., Al Mutairi M. Comparative assessment of *Spinacia oleracea* and *Brassica juncea* for efficient phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *International Journal of Phytoremediation*. 2025, pp. 1–11. DOI: 10.1080/15226514.2025.2586661.
19. Poklonov V. A., Ostroumov S. A., Anikina E. V., Sadchikov A. P., Glebov V. V., Erofeeva V. V. *Elodea canadensis*: introduction, phytoremediation and spread control. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2024, vol. 21, no. 1, pp. 24–32. [In Russ]. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-1-24-32.
20. Boyarintsev D. I., Kuz'minov I. V., Bryutova K. V., Rusakova O. A. Standardization of raw materials obtained from aerial organs of natural fire-broad (*Chamaenerion angustifolium* L.). *Chemistry of plant raw material*. 2024, no. 3, pp. 177–187. [In Russ]. DOI: 10.14258/jcprm.20240312495.

21. Zharkova D. A., Kuyantseva N. B., Mumber A. G., Veselkin D. V. Changes in the diversity of the herb-shrub layer of pine forests caused by severe pollution and fire disturbances in the Southern Urals. *Biology Bulletin*. 2024, vol. 51, no. 2, pp. 208 – 217. DOI: 10.1134/S1062359024611480.

22. Kornilkov S. V., Antoninova N. Yu., Sobenin A. V., Usmanova V. A., Usmanov A. I. About the basic provisions of the methods for designing measures that localize the migration of heavy metals in soils and technogenic soils. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2024, vol. 166, no. 6, pp. 85 – 94. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-85-94.

23. Shaposhnikova L. M., Raskosha O. V., Rachkova N. G. Phytoremediation potential of willow herb and reed canary grass under conditions of polyelemental pollution. *Theoretical and Applied Ecology*. 2023, no. 1, pp. 162 – 169. [In Russ]. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-1-162-169.

24. Vinogradov A. P. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh khimicheskikh elementov v pochvakh* [Geochemistry of rare and trace chemical elements in soils], Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1957, 200 p.

25. Il'in V. B. *Tyazhelye metally v sisteme pochva – rastenie* [Heavy metals in the soil-plant system], Novosibirsk, Nauka, 1991, 150 p.

26. Sverchkov I., Gvozdetskaya M. Quantitative determination of sulfate sulfur in soils and sediments using the S-K α and S-K β X-ray spectra and PLS regression. *Spectrochimica Acta. Part B. Atomic Spectroscopy*. 2024, vol. 218, article 106992. DOI: 10.1016/j.sab.2024.106992.

27. Vintonjak V. A., Popova I. S. Features of nickel accumulation in phytoremediation plant organs. *Scientific Agronomy Journal*. 2025, no. 3 (130), pp. 25 – 31. [In Russ]. DOI: 10.34736/FNC.2025.130.3.003.25-31.

28. Najda N. M. Growth, development and anatomical structure of vegetative organs of narrow-leaved willow tea. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016, no. 45, pp. 11 – 17. [In Russ]. <https://cyberleninka.ru/article/n/rost-razvitiye-i-anatomicheskaya-struktura-vegetativnyh-organov-ivan-chaya-uzkolistnogo>.

29. Dmitrieva D. M., Chanysheva A. F. Contribution of mining companies to the sustainable development of the mineral resource base of the Arctic region: A new approach to ranking key actors and assessing their interaction. *The North and the Market: Forming the Economic Order*. 2024, no. 2, pp. 71 – 87. [In Russ]. DOI: 10.37614/2220-802X.2.2024.84.006.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пашкевич Мария Анатольевна¹ — д-р техн. наук, профессор,
e-mail: mpash@spmi.ru, ORCID ID: 0000-0001-7020-8219,

Казанина Ева Васильевна¹ — стажер-исследователь,
e-mail: evakazanina1234@gmail.com,

Нагорнов Дмитрий Олегович¹ — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: Nagornov_DO@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9932-8836,

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

Для контактов: Казанина Е.В., e-mail: evakazanina1234@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.A. Pashkevich¹, Dr, Sci, (Eng.). Professor,

e-mail: mpash@spmi.ru, ORCID ID: 0000-0001-7020-8219,

E.V. Kazanina¹, Intern Researcher, e-mail: evakazanina1234@gmail.com,

D.O. Nagornov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: Nagornov_DO@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0002-9932-8836,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: E.V. Kazanina, e-mail: evakazanina1234@gmail.com.

Получена редакцией 17.06.2026; получена после рецензии 20.07.2026; принята к печати 20.09.2026.

Received by the editors 17.06.2026; received after the review 20.07.2026; accepted for printing 20.09.2026.