DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-90-102
УДК 502/504: 631.416.9; 631.871

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ФИТОЭКСТРАКЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ БАРХАТЦАМИ ПРЯМОСТОЯЧИМИ (*TAGETES ERECTA*) ИЗ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ НОРИЛЬСКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГУМИНОВЫХ ДОБАВОК

М. А. Чукаева[1], Я. В. Пухальский[2], С. И. Лоскутов[2], В. Р. Сидорова[1], Е. В. Воропаева[1], В. А. Матвеева[1]
[1] ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (Санкт-Петербург, Россия)
[2] ГАОУ ВО ЛО «Ленинградский государственный университет имени А. С. Пушкина» (Санкт-Петербург, Россия)

Статья поступила в редакцию 6 октября 2023 г.

Для цитирования
Чукаева М. А., Пухальский Я. В., Лоскутов С. И. и др. 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.

Проведена оценка изменения фиторемедиационного потенциала бархатцев прямостоящих при использовании стрессопротекторных добавок в виде гуминовых кислот на примере извлечения тяжелых металлов из сильнозагрязненных почв Норильска. Установлено, что применение 0,025% гуминовых кислот оказало влияние на рост биомассы и снижение суммарного накопления тяжелых металлов в ней. Выявлена отрицательная корреляционная взаимосвязь между данными показателями, причем на корнях она выражена сильнее, чем на побегах. Для использования растений в фиторемедиации необходимо повышать дозу внесения гуминовых кислот до достижения комбинированного эффекта. Результаты исследования могут быть использованы при очистке загрязненных тяжелыми металлами почв в промышленных районах Арктической зоны.

Ключевые слова: *тяжелые металлы, городские почвы, фиторемедиация, Tagetes erecta, гуминовые кислоты, Норильск.*

Введение

Благодаря стратегическим запасам российская Арктика входит в сферу особых геополитических и национальных интересов России. Особенность природы этой территории заключается в чрезвычайной чувствительности экосистемы как к естественным, так и к антропогенным воздействиям, а также в низкой способности самовосстановления [1]. Известно, что для Норильского промышленного региона характерны аномальные значения содержания тяжелых металлов в окружающей среде. Еще до начала активного освоения Средней Сибири приоритетными загрязнителями здесь считали медь Cu, цинк Zn, кобальт Co и никель Ni [1; 2]. Более токсичным для произрастающей здесь растительности, особенно для высших растений, считается Ni. Ni наряду с Cu и Co относится ко второму классу веществ по степени опасности для почвы [3], но при этом относится к микроэлементам, необходимым для нормального развития живых организмов [4]. С активным освоением региона в результате индустриализации

© Чукаева М. А., Пухальский Я. В., Лоскутов С. И., Сидорова В. Р., Воропаева Е. В., Матвеева В. А., 2024

30-х годов прошлого века и строительством предприятий цветной металлургии вблизи Норильска ситуация в районе усугубилась. Вместе с выбросами с предприятий (преимущественно в виде пыли и аэрозольных частиц) на большие площади стали дополнительно поступать токсиканты, среди которых превалировали тяжелые металлы и соединения серы [10]. В результате произошло расширение границ техногенно нарушенных территорий. Очаги наибольшего загрязнения присущи 20—50-километровому радиусу от источника загрязнения. Здесь оседает порядка 20% поллютантов. Остальные 80% разносятся воздушными массами на 200-километровую зону от Норильска [6]. В связи с субмикронным размером аэрозольных частиц считается, что их количество и скорость осаждения неизменны по мере удаления от источника выбросов. Однако необходимо учитывать сезонно-временные вариации, присущие субарктическому климату региона [7]. Благодаря наличию многолетней мерзлоты и слабо выраженной водной миграции эти токсиканты прочно закрепляются в верхнем органогенном горизонте типичных для данного региона почв (торфяно-криоземов, грануземов и литоземов). Концентрация поллютантов в импактной зоне может достигать 200 мг/кг и выше [8; 9], что переводит ареалы их накопления в отдел хемоземы в классификационном стволе антропогенно нарушенных почв. В итоге за счет увеличения площади загрязнения территорий в период с 1940 по 1990 гг. на расстоянии 50—80 км от Норильска наблюдалась 100%-ная гибель древесно-кустарниковой растительности [10]. Были выделены три зоны нарушенного фитоценоза, расположенные на юге, юго-востоке и северо-востоке области [10; 11]. Постоянные промышленные выбросы не дают растительным покровам перейти в стадию восстановления, и часть нарушенных экосистем находится на необратимых стадиях вырождения [12]. Мертвая растительная биомасса становится здесь сорбционным, седиментационным и механическим барьером с высокой концентрацией тяжелых металлов [13]. Численность (титр) микроорганизмов-деструкторов органического вещества падает намного ниже в сравнении с незагрязненными участками, а их функциональная активность (метаболизм), связанная с биоразложением, замедляется в шесть раз [14; 15]. Все это влечет за собой усиление процессов эрозии и снижения плодородия и общего здоровья почвенной экосистемы [16—18].

За основу нормирования степени загрязнения почв российской Арктики принята пятиуровневая шкала [19]. Интегральная оценка строится на ранжировании тяжелых металлов по степени опасности для почв [3], уровню превышения определенных эталонов и гигиенических концентраций [19].

Очистку загрязненных территорий и охрану окружающей среды в зоне промышленного освоения Арктики коренные малочисленные народы Севера относят к числу приоритетных задач [20]. В рамках действующего с 17 февраля 2012 г. документа «Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации до 2030 года», утвержденного Правительством РФ, в стране функционирует национальный проект «Экология», который предусматривает комплекс мероприятий по снижению эмиссии загрязняющих веществ в атмосферный воздух в крупных промышленных центрах, включая Норильск. Компания ПАО ГМК «Норникель» показывает положительную динамику в рамках реализации государственных планов экологизации региона и последовательно увеличивает расходы на охрану окружающей среды [21]. В 2018 г. на Талнахской фабрике был запущен проект, предполагающий к 2025 г. снизить выбросы серы в атмосферу на 90%. Важно решать вопрос очистки уже загрязненных территорий в городской черте и на окраинах, вблизи автомагистралей Норильска. В большинстве случаев для их санации применяют химические реагенты либо физически удаляют верхний загрязненный слой почв для последующего биовосстановления (ландфарминг) или полной замены другим. Зачастую стоимость применения подобных методов оказывается неоправданно завышенной. Поэтому в последнее время во многих развитых странах для рекультивации почв *in situ* все чаще используют фиторемедиацию — технологию рекультивации нарушенных земель с помощью специально подобранных растений-гиперакумуляторов. Первоначально этот метод нашел применение в очистке нефтезагрязненных почв [22]. Такой подход особенно актуален для ситуаций, связанных с разливом нефтепродуктов в Арктической зоне, например, при аварии с разливом дизельного топлива близ Норильска в мае 2020 г. [23]. Сейчас технология широко применяется и для очистки почв, загрязненных тяжелыми металлами.

Для успешной реализации этой технологии на городских почвах, не способных к самозарастанию, необходимо проводить поиск и интродукцию в среду устойчивых видов растений — фиторемедиаторов тяжелых металлов [24; 25]. В отличие от растений-гипераккумуляторов (используемых в технологиях оздоровления почв сельскохозяйственных угодий от опасных загрязнителей), применение которых для очистки урбанизированных территорий не всегда технически оправданно и чаще всего экономически невыгодно, для агроурбаноземов поиск более эффективно вести среди цветочно-декоративных растений-фиторемедиаторов, используемых в озеленении при создании мавританских газонов или газонов смешанного типа [26—29]. Выполняя важную экологическую функцию, они удачно вписываются в концепцию «зеленого урбанизма» при создании городов будущего. Среди потенциальных кандидатов для озеленения различных территорий здесь можно выделить растения, относящиеся к роду бархатцев (*Tagetes*). За счет большого потенциала устойчивости к воздей-

ствию разных токсикантов культура может быстро расти, развивая крепкую корневую систему, которая помогает им выживать в загрязненной почвенной среде [30—37]. Показано, что среди видов, принадлежащих к роду *Tagetes*, по проценту биоремедиации тяжелых металлов из загрязненных почв бархатцы прямостоящие (*T. erecta*) превосходят бархатцы отклоненные (*T. patula*) за счет более высокого выхода биомассы.

Наиболее часто для активации роста и повышения устойчивости растений к воздействию тяжелых металлов применяют гуминовые кислоты — сложные гетерогенные смеси устойчивых к биодеструкции высокомолекулярных темноокрашенных соединений природного происхождения, образующихся при разложении растительных и животных остатков под действием микроорганизмов и абиотических факторов среды в условиях недостатка кислорода [36]. Биопротекторная функция этих органических макромолекул обусловлена их способностью связывать тяжелые металлы в среде в стабильные комплексы [38]. Иммобилизация экотоксикантов происходит главным образом благодаря наличию в их строении карбоксильных и фенольных групп [39—40]. При контакте происходит сорбция с образованием нерастворимых солей (гуматов) [41]. Максимальное осаждение тяжелых металлов на растворе гуминовых кислот происходит при pH = 4—7, при этом они стабилизируют кислотность [40; 42]. Из-за полидисперсности и стохастичности состава гуминовых кислот точно вычислить термодинамические константы равновесия при взаимодействии с ионами тяжелых металлов невозможно. Поэтому для расчета используют эффективные константы.

Целью исследования была сравнительная оценка экопротекторной и детоксицирующей способностей гуминовых кислот в отношении повышения адаптационного и фиторемедиационного потенциала *T. erecta*, культивируемых на сильно загрязненных тяжелыми металлами почвах с целью их постепенной детоксикации. В задачи работы входило изучение изменения биометрических показателей и стехиометричности в распределении поллютантов и микроэлементов в биомассе надземных и подземных органов растений под влиянием добавок в субстрат гуминовых кислот.

Материалы и методы

Для проведения опыта на территории Норильского промышленного региона было установлено 12 пробных площадок в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-83. С учетом неравномерного загрязнения почв тяжелыми металлами и основного направления ветра (юго-восточный 31%) пробные площадки были намечены в зоне воздействия различных техногенных объектов, расположенных на северо-запад от Норильска по координатной сетке с неравномерными расстояниями между линиями (рис. 1). Характеристика точек отбора приведена в табл. 1.

Отбор проб почв осуществлялся в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02—2017. На каждой пробной площадке методом конверта было отобрано пять точечных проб массой 200—300 г, из которых формировалась объединенная проба массой 1—1,5 кг. Пробы отбирались пластмассовым совком с глубины 0—20 см.

Пробоподготовка почв для химического анализа проводилась в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02—2017. Из каждой объединенной пробы выделялась представительная часть методом квартования, которая затем высушивалась до воздушно-сухого состояния, измельчалась в ступке и просеивалась через сито с диаметром ячеек 1 мм. Определение влажности почв выполнялось на термогравианализаторе Leco TGA-701 в соответствии с ГОСТ 28268-89. Определение валовых и подвижных форм проводилось в соответствии с М-МВИ-80-2008 на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой на ICPE-9000 (Shimadzu, Япония). Разложение проб для определения валового содержания элементов выполнялось в микроволновой системе Multiwave 3000 Anton Paar со смесью соляной, азотной, плавиковой и борной кислот. Подвижные формы извлекались ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH = 4,8.

Для вегетационного эксперимента пробы почв охлаждались и хранились при температуре +4°C. Растительным объектом для исследований послужил сорт бархатцев прямостоящих Инка II Mix (Syngenta). Растения выращивали в течение 21 сут [41]. Временной интервал для опыта был также выбран исходя из работы [42], где было показано, что аккумуляция токсиканта в вегетационной массе имматурных растений не сильно отличался от его накопления у виргинильных. В связи с этим было сделано предположение, что в условиях короткого теплого летнего периода в условиях Норильска [43] более рационально вести учет системного выноса токсикантов из загрязненных почв, не дожидаясь цветения растений, путем нескольких циклов их посева/среза за сезон, на ювенильной фазе онтогенеза.

Семена сеяли в пластиковые кассеты с 54 ячейками, заполненные увлаженной до 60% полной полевой влагоемкости почвой. Кассеты помещали в закрытый климатический гроубокс с вентиляцией и интенсивной светокультурой. Температуру воздуха внутри рабочей зоны бокса поддерживали на уровне 27°C днем и 14°C ночью, относительную влажность — 37% и 85% соответственно. Фотопериод имел продолжительность 12 ч, а средний поток фотосинтетической радиации с высоты засвета 1 м в среднем равнялся 14 500 лк [44]. В качестве источника инсоляции служила 400-ваттная ДНАТ-лампа, спектр облучения которой был скорректирован с помощью 100-ваттной фитопанели.

Вносимые в почву биодобавки в виде гуминовых кислот на отдельном варианте для каждой точки отбора, получали из верхового торфа со степенью

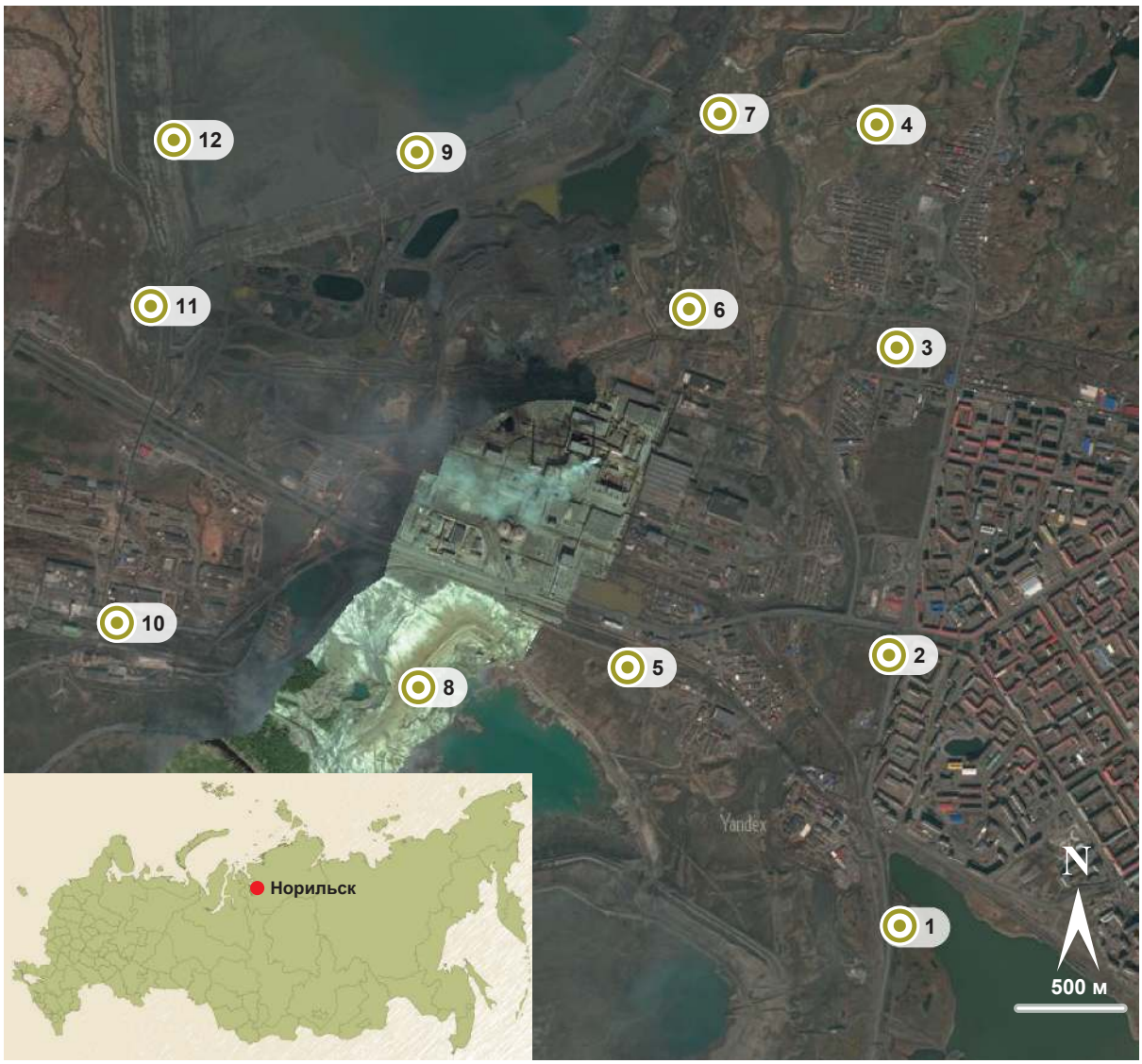


Рис. 1. Распределение точек отбора проб в Норильском промышленном регионе. Составлено авторами на картографической основе https://yandex.ru/maps
Fig. 1. Distribution of sampling points in the Norilsk industrial region. Compiled by the authors on a cartographic basis https://yandex.ru/maps

Таблица 1. Характеристика пробных площадок с координатами ГИС
Table 1. Characteristics of sample sites with GIS coordinates

№	Место отбора	Широта	Долгота
1	Граница законсервированного хвостохранилища Медного завода	69,345252	88,169119
2	Граница жилой зоны Норильска	69,355967	88,167849
3	Граница отвала Медного завода	69,368040	88,168672
4	Отвал Медного завода	69,376853	88,166437
5	Территория пляжа действующего хвостового хозяйства	69,355425	88,138596
6	Рекультивированный отвал Медного завода	69,369536	88,145513
7	Граница пляжа действующего хвостового хозяйства	69,377231	88,148927
8	Территория пляжа законсервированного хвостохранилища	69,354672	88,115352
9	Территория пляжа действующего хвостового хозяйства	69,375715	88,115209
10	Территория промышленной зоны Медного завода	69,357230	88,081642
11	Отвал завода передела никелевых руд	69,369694	88,085496
12	Граница пляжа действующего хвостового хозяйства	69,376239	88,088021

Таблица 2. Показатели средних значений элементного профиля в отобранных почвенных пробах
Table 2. Indicators of average values of the elemental profile in selected soil samples

Показатель	Cr	Cu	Ni	Sr	Ti	V	Zn
	Содержание (ppm) металлов: валовая/подвижная формы						
ОДК*/ПДК**	6/н/н	132/3	80/4,0	н/н	н/н	80	220/23
Условный фон***	70–200/6,0	20–47/ 1,4–3,5	17–58/ 0,8–6,7	180–300/ 10,5–25,5	513-9800/–	100–120/–	45–172/ 1,1–23,0
1	1800/15	2800/2757	3800/1555	260/158	9600/20	260/6,3	160/67
2	560/2,6	670/630	380/226	190/186	8400/6,2	280/4,4	100/29
3	2300/3,6	500/499	1000/544	190/71	8200/5,4	240/3,6	110/40
4	2200/5,3	400/383	1000/915	210/86	7300/5,6	220/3,6	100/38
5	1900/1,7	1300/1263	1200/1066	180/84	8300/5,4	250/3,5	110/33
6	350/3,7	1700/302	1400/1349	340/336	5200/6,1	190/3,8	160/24
7	170/5,9	1000/788	1700/1640	160/156	5800/6,6	360/3,9	150/27
8	1600/1,7	1200/1175	1100/970	180/73	7700/5,1	220/3,5	100/30
9	900/5,1	700/191	1400/543	180/162	7300/7,7	200/8,0	92/32
10	1400/16	3400/3351	3300/1752	220/153	8500/19	210/5,6	150/83
11	490/8,7	1200/849	1400/1383	220/185	4900/5,8	150/4,1	100/56
12	1400/3,9	1800/1748	1900/1836	180/165	6700/7,5	200/4,5	120/65

* Значения ПДК приняты в соответствии с ГН 2.1.7.2041-06 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве».
** Значения ОДК приняты в соответствии с ГН 2.1.7.2511-09 «Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве» pHKCl > 5,5; н/н — показатель не нормируется.
*** Значения условного фона по валовым содержаниям металлов приняты равными диапазону кларков по миру [48; 49]; по подвижным формам — содержанию подвижных форм металлов в разных типах почв СНГ [50].

разложения 40—45% путем щелочной экстракции водным раствором, содержащим гидроксид калия и пирофосфат калия [45]. Рабочая концентрация гуминовых кислот для использования в опыте составила 0,025%, исходя из минимально рекомендованных доз применения данных соединений в естественных условиях [45].

По окончании опыта полученную зеленую биомассу растений срезали, промывали в дистиллированной воде, высушивали и взвешивали. Далее побеги вместе с листьями и корни в отдельности измельчали до состояния порошка в агатовой ступке. Отбирали навески по 0,1 г и проводили мокрое озоление с использованием концентрированной азотной кислоты (2 мл) и перекиси водорода (2 мл) в системе разложения проб Digiblock ED36S (LabTech, Италия) в течение 4 ч при температуре 170°C. После остывания полученные суспензии количественно переносили в мерные полиэтиленовые сосуды и доводили до метки 25 мл деионизированной водой и оставляли на сутки для осаждения взвешенных частиц. Для элементного анализа отбирали верхний супернатант. Для всех образцов велись две параллельные пробы, а также готовились холостые растворы с использованием тех же самых реактивов. Растворы анализировались методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на ICPE-9000 (Shimadzu, Япония) [46].

Полученные данные обрабатывали с помощью статистической системы R (версия 4.1.0, https://cran.r-project.org/bin/windows/base/) для Windows [44]. Для визуализации данных и выявления сходства профилей таксономического и микроэлементного состава по вариантам опыта был проведен кластерный анализ с построением тепловой карты на основе матрицы корреляционных расстояний.

Результаты и обсуждение

Химический анализ отобранных почв (табл. 2) показал превышение предельно допустимых и ориентировочно допустимых концентраций (ПДК и ОДК)

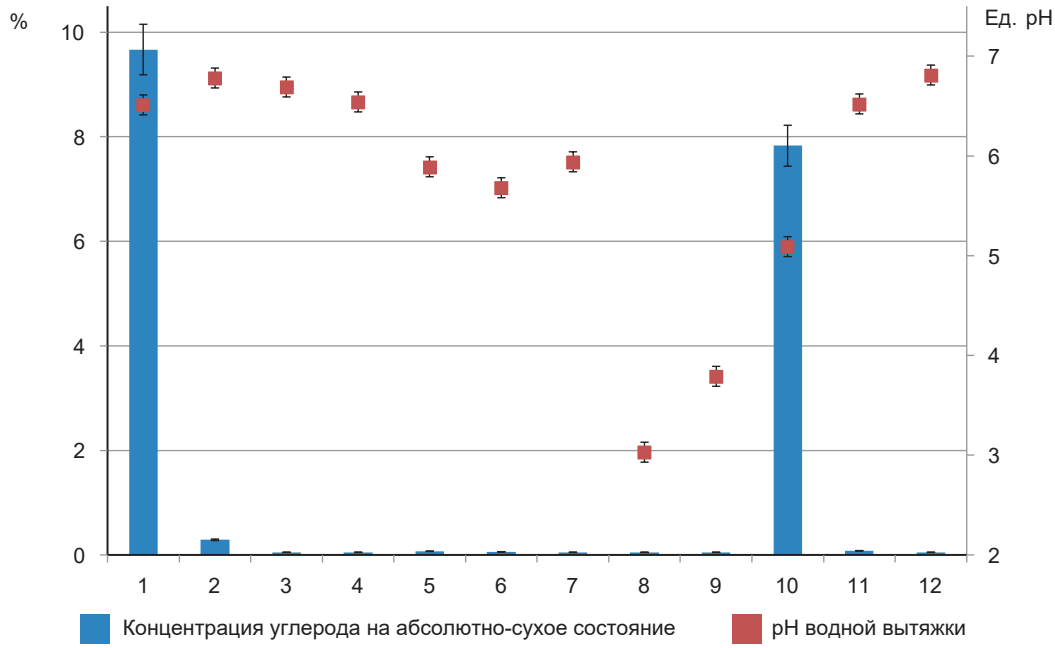


Рис. 2. Показатели кислотности и органического углерода у отобранных почвенных проб. Составлено авторами
Fig. 2. Indicators of acidity and organic carbon in selected soil samples. Compiled by authors

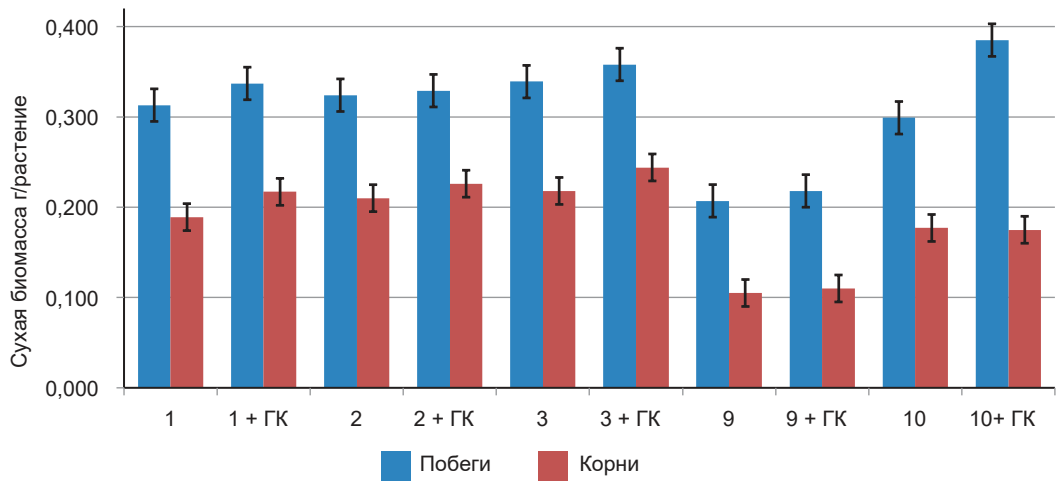


Рис. 3. Сухая биомасса надземной и подземной частей растений *Tagetes erecta* в конце опыта. Составлено авторами
Fig. 3. Dry biomass of aboveground and underground parts of *Tagetes erecta* plants at the end of the experiment. Compiled by authors

по всем элементам, среди которых наиболее значительные по Cr, Cu и Ni. По Sr и Ti, для которых нормативы не установлены, существенных превышений условного фона не отмечено. При этом наибольший процент подвижных форм элементов, потенциально доступных для растений, отмечен для Cu и Ni. По этим же элементам наблюдаются наиболее значительные превышения условно фоновых значений.

Только две пробы имели высокие показатели $C_{орг}$ (рис. 2). Вероятно, это связано с тем, что обе точки опробования располагались в непосредственной близости от железной дороги, по которой транспортируется уголь в вагонах открытого типа. В результате аэротехногенного переноса угольная пыль попадает в почву и обогащает ее углеродом в недоступной для растений форме. Повышение содержания органики в точке № 1 также может быть связано с промывным типом участка, расположенного вблизи озера Долгое.

Часть из отобранных проб (№ 6, 7, 11 и 12) отличалась кислой или слабокислой реакцией среды. Обусловлено это выпадением кислотных осадков, что свойственно для данного региона. Поскольку известно, что бархатцы плохо переносят кислотность субстрата ниже 5,8, последние пробы было решено исключить из опыта и не проводить дополнительное известкование, чтобы не изменить фон от влияния добавок в виде гуминовых кислот.

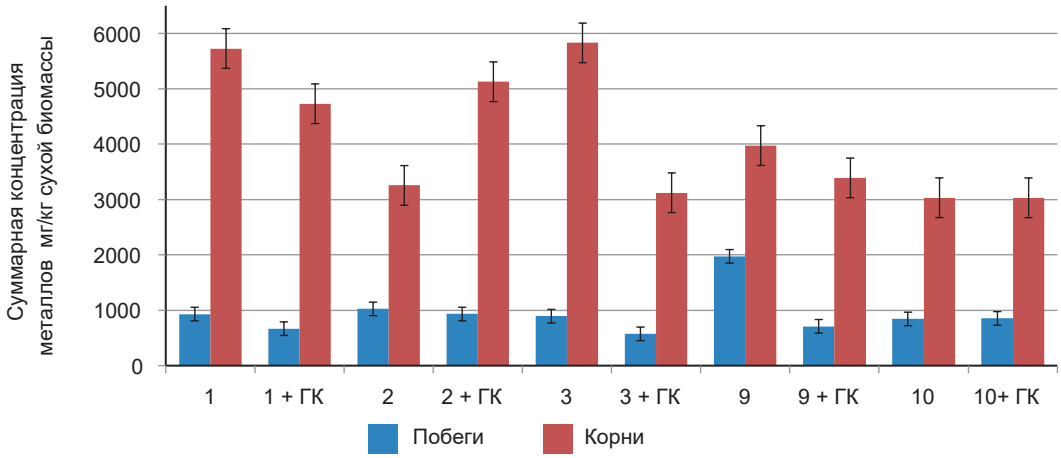


Рис. 4. Суммарное выражение накопления тяжелых металлов в побегах и корнях растений *Tagetes erecta* по вариантам опыта. Составлено авторами
Fig. 4. Total expression of the accumulation of heavy metals in shoots and roots of *Tagetes erecta* plants according to experimental variants. Compiled by authors

Несмотря на оптимальные значения pH, было отмечено отсутствие проростков на вариантах № 4, 5 и 8. Вероятно, это связано с тяжелым механическим составом образцов почвы, взятых с данных точек, содержащих включения глинистых частиц. Здесь отмечались плохая воздухопроницаемость и частый застой воды в ячейках кассет, из-за чего проростки быстро погибали. На оставшихся пробах, несмотря на полиметаллический стресс, растения показали хорошую энергию прорастания (рис. 3).

Как видно из рис. 3, добавка гуминовых кислот способствовала лучшей адаптации и небольшой прибавке в полученной биомассе. Максимальное увеличение биомассы побегов было отмечено на пробе № 10 и составило 29,0%. Действуя как физиологически активное соединение, обладающее гормоноподобными свойствами, гуминовые кислоты увеличивают проницаемость клеточных мембран (плазмалемм), оказывая тем самым положительное влияние на поглощение питательных элементов. Кроме того, гуминовые кислоты провоцируют само растение выделять в ризосферу повышенные дозы корневых выделений, представленных в том числе и органическими кислотами, которые также способствуют увеличению концентрации элемента у поверхности раздела почва — корень.

Интродукция в среду гуминовых кислот также способствовала снижению суммарного накопления в растениях тяжелых металлов (рис. 4). Наиболее значительно это проявилось в варианте № 9. Снижение аккумуляции токсикантов в побегах здесь составило 64,0%. Причем в общей суммарной доле снижение здесь наблюдалось сразу по всем тяжелым металлам. В корневой системе это было более заметно в вариантах № 1 и 3, где снижение составило 17,4% и 46,4% соответственно. Отмечен и эффект повышения закрепления поллютанта в основной буферной зоне растения в варианте № 2. Повышение концентрации тяжелых металлов здесь составило 57,5%.

Оценка корреляции между суммарным накоплением тяжелых металлов в побегах и корнях растений и их биомассой показала отрицательную взаимосвязь. Причем на корнях она была более выражена, чем на побегах (–0,72 и –0,64).

Кластерный анализ распределения всех прочих тяжелых металлов в обоих органах растений по вариантам показал, что никель и медь сформировали свой гомогенный ряд (рис. 5). Близость расположения указывает на проявление определенных взаимодействий между данными элементами — антагонизма или синергизма.

Здесь необходимо учитывать, при каких именно условиях проявляются данные взаимодействия, поскольку при увеличении концентрации одного элемента явления синергизма могут перейти в антагонистические, а при снижении — напротив, еще усилиться. Так, при изучении бинарной смеси Cu-Ni на примере роста и развития проростков *Alisma plantago-aquatica* L. в водной среде независимое действие при низких концентрациях сменялось антагонистическим при высоких, что, вероятно, связано с конкуренцией по ряду показателей между никелем и медью [51]. На примере анализа экспрессии генов у различных по толерантности к ионам Ni и Cu генотипов белой березы сделано предположение, что устойчивость растений к тяжелым металлам контролируется одиночными рецессивными генами [52]. Причем у более адаптивных видов дифференциальная регуляция генов выражена сильнее. Что касается опосредованного влияния показателей кислотности среды на эффекты взаимодействия с тяжелыми металлами, то данные здесь также противоречивы. С одной стороны, подвижность тяжелых металлов увеличивается в кислых почвах, с другой — на примере аккумуляции

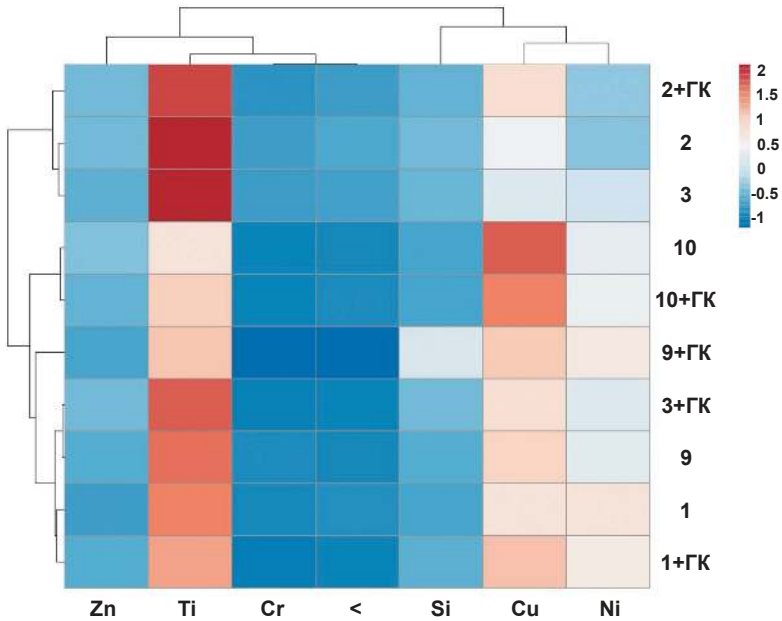
Ni и Cu люцерной было показано, что растения демонстрировали одинаковую степень роста и накопления токсикантов при трех значениях pH (4,5, 5,8 и 7,1) [53].

Выводы

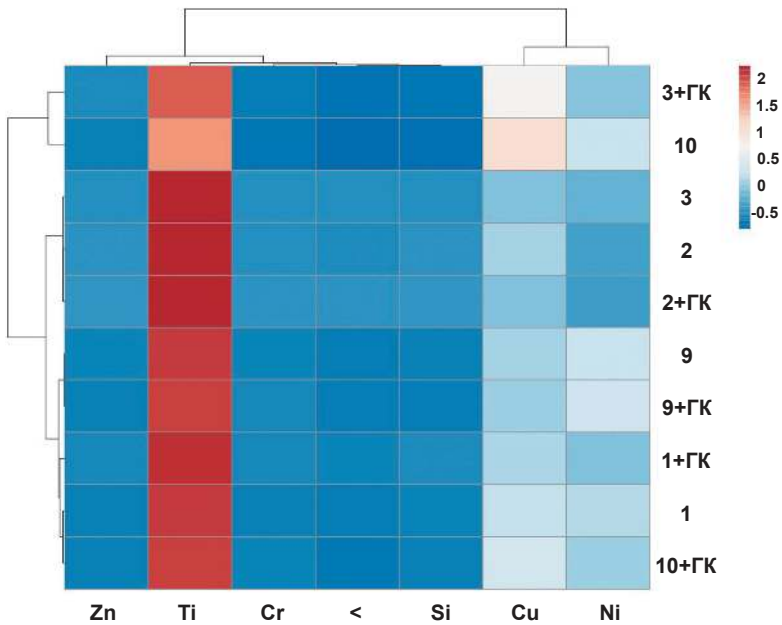
1. Установлено, что бархатцы прямостоячие *Tagetes erecta* обладают высоким адаптационным и фиторемедиационным потенциалом и могут успешно применяться для очистки земель, загрязненных тяжелыми металлами, в городах и промышленных центрах российской Арктики.

2. Выявлено, что применение слабой дозы гуминовых кислот приводит к повышению адаптационного потенциала бархатцев прямостоячих, выраженного в увеличении биомассы растений, выращенных на сильнозагрязненных почвах, отобранных вблизи Норильска, уже на ювенильной фазе. При этом отмечено, что их фиторемедиационный потенциал, а именно фитоэкстракция тяжелых металлов, снижается незначительно. Вероятно, за счет образования хелатных комплексов данная малая доза гуминовых кислот проявила себя в большей степени в отношении улучшения габитуса растений. В дальнейшем цикле роста эффект разбавления токсиканта может постепенно нивелироваться в результате постепенного нарастания биомассы растений, увеличения транслокации и выноса ею токсикантов их среды.

3. Рассмотренную в исследованиях концентрацию гуминовых кислот также необходимо постепенно повышать для установления нужного значения, сглаживающего кислотность среды за счет эффекта по типу известкования, для достижения необходимого двойственного эффекта, связанного как с улучшением роста и развития культур бархатцев при выращивании на сильнозагрязненных почвах арктического региона, так и с увеличением их фиторемедиационного потенциала. Также можно комбинировать внесение гуминовых кислот с использованием другого регулятора роста растений — салициловой кислоты [54].



а



б

Рис. 5. Тепловая карта кластерного распределения тяжелых металлов в побегах (*а*) и корнях (*б*) растений *Tagetes erecta* по вариантам опыта. Темный цвет указывает на более высокую, светлый — на более низкую концентрацию каждого элемента
Fig. 5. Heat map of cluster distribution of HMs in shoots (*a*) and roots (*б*) of *Tagetes erecta* plants according to experimental variants. Dark color indicates higher, lighter one — lower concentration of each element

4. Кроме того, для обогащения данных суспензий необходимо искать среди макро- и микроэлементов те, которые при определенных обстоятельствах могут быть антагонистами тяжелых металлов. Так, на примере пустошей Кольского полуострова, расположенных вблизи мед-

но-никелевого комбината, показана эффективность рекультивации техногенно нарушенных земель за счет использования добавок в виде карбонатов и/или силикатов кальция и магния при выращивании злаков [55].

5. Как и в случае рекультивации и консервации земель, вопросами, связанными с внедрением технологии фиторемедиации, должна заниматься Федеральная служба по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор) совместно с комитетами по благоустройству городов.

Финансирование

Исследования выполнены в рамках госзадания «Фундаментальные междисциплинарные исследования недр Земли и процессов комплексного освоения георесурсов. Шифр FSRRW-2023-0002».

Литература/References

1. *Пономарева Т. В., Трефилова О. В., Богородская А. В., Шапченкова О. А.* Эколого-функциональная оценка состояния почв в зоне аэротехногенного воздействия Норильского промышленного комплекса // Сиб. экол. журн. — 2014. — Т. 21, № 6. — С. 987—996.

Ponomareva T. V., Trefilova O. V., Bogorodskaya A. V., Shapchenkova O. A. Ecological and functional assessment of the state of soils in the zone of aerotechnogenic influence of the Norilsk industrial complex. Siberian Ecological J., 2014, vol. 21, no. 6. pp. 987—996. (In Russian).

2. *Ponomarenko M. R., Kutepov Y. I.* Mining complexity assessment to substantiate deformation monitoring at open pit mines. J. of Mining Science, 2021, vol. 57 (6), pp. 986—994.

3. *Колесников С. И., Казеев К. Ш., Вальков В. Ф., Пономарева С. В.* Ранжирование химических элементов по их экологической опасности для почвы // Докл. Рос. акад. сельскохоз. наук. — 2010. — Т. 1. — С. 27—29.

Kolesnikov S. I., Kazeev K. Sh., Valkov V. F., Ponomareva S. V. Ranking of chemical elements according to their environmental hazard for the soil. Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences, 2010, vol. 1, pp. 27—29. (In Russian).

4. *Shahzad B., Tanveer M., Rehman A., Cheema S. A., Fahad S., Rehman S., Sharma A.* Nickel Whether Toxic or Essential for Plants and Environment — A Review. Plant Physiol. Biochem., 2018, vol. 132, pp. 641—651.

5. *Sarapulova G. I.* Geochemical approach in assessing the technogenic impact on soils. J. of Mining Inst., 2020, vol. 243, pp. 388—395.

6. *Юркевич Н. В., Ельцов И. Н., Гуреев В. Н. и др.* Техногенное воздействие на окружающую среду в российской Арктике на примере Норильского промышленного района // Изв. Томского политехн. ун-та. Сер. «Инжиниринг георесурсов», 2021, vol. 332, no. 12, pp. 230—249.

Yurkevich Nik. V., Eltsov I. N., Gureev V. N., Mazov N. A., Yurkevich Nat. V., Edelev A. V. Technogenic impact on the environment in the Russian Arctic using the example of the Norilsk industrial region. News of Tomsk Polytechnic University. Ser. “Georesources Engineering”, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 230—249. (In Russian).

7. *Belova M., Iakovleva E., Popov A.* Mining and environmental monitoring at open-pit mineral deposits. J. of Ecological Engineering, 2019, vol. 20 (5), pp. 172—178.

8. *Евдокимова М. В., Глазунов Г. П., Яковлев А. С. и др.* Оценка экологического состояния земель, загрязненных комплексом тяжелых металлов, в окрестностях города Норильска за период с 2004 по 2019 г. по материалам NDVI MODIS с сервера вега-science // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2021. — Т. 18, № 4. — С. 149—165.

Evdokimova M. V., Glazunov G. P., Yakovlev A. S., Plekhanova I. O., Aimaletdinov R. A., Shestakova M. V. Assessment of the ecological state of lands contaminated with a complex of heavy metals in the vicinity of the city of Norilsk for the period from 2004 to 2019 based on NDVI MODIS materials from the vega-science server. Modern problems of remote sensing of the Earth from space, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 149—165. (In Russian).

9. *Kutepova N. A., Moseykin V. V., Kondakova V. N., Pospehov G. B., Straupnik I. A.* Specificity of properties of coal processing waste regarding their storage. Mining Informational and Analytical Bull., 2022, vol. 12. pp. 77—93.

10. *Вараксин Г. С., Кузнецова Г. В.* Особенности биологической рекультивации в Норильском промышленном районе // Сиб. лес. журн. — 2016. — № 2. — С. 92—101.

Varaksin G. S., Kuznetsova G. V. Features of biological reclamation in the Norilsk industrial region. Siberian Forest J., 2016, no. 2, pp. 92—101. (In Russian).

11. *Zhulidov A. V., Robarts R. D., Pavlov D. F., Kämäri J., Gurtovaya T. Y., Meriläinen J. J., Pospelov I. N.* Long-term changes of heavy metal and sulphur concentrations in ecosystems of the Taymyr Peninsula (Russian Federation) North of the Norilsk Industrial Complex. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, vol. 181 (1—4), pp. 539—553.

12. *Телятников М. Ю., Пристяжнюк С. А.* Антропогенное влияние предприятий Норильского промышленного района на растительный покров тундры и лесотундры // Сиб. экол. журн. — 2014. — № 6. — С. 903—922.

Telyatnikov M. Yu., Pristyazhnyuk S. A. Anthropogenic influence of enterprises of the Norilsk industrial region on the vegetation cover of the tundra and forest-tundra. Siberian Ecological J., 2014, no. 6, pp. 903—922. (In Russian).

13. *Piirainen V. Y., Mikhaylov A. V., Barinkova A. A.* The concept of modern ecosystem for the ural aluminum smelter. Tsvetnye Metally, 2022, vol. 7, pp. 39—45.

14. *Богородская А. В., Пономарева Т. В., Шапченкова О. А., Шишикин А. С.* Оценка состояния микробных комплексов почв лесотундровой зоны в условиях аэротехногенного загрязнения // Почвоведение. — 2012. — № 5. — С. 582—593.
Bogorodskaya A. V., Ponomareva T. V., Shapchenkova O. A., Shishikin A. S. Assessment of the state of microbial complexes of soils in the forest-tundra zone under conditions of aerotechnogenic pollution. Soil Science, 2012, no. 5, pp. 582—593. (In Russian).
15. *Ведрова Э. Ф., Мухортова Л. В.* Биогеохимическая оценка лесных экосистем в зоне влияния Норильского промышленного комплекса // Сиб. экол. журн. — 2014. — № 6. — С. 933—944.
Vedrova E. F., Mukhortova L. V. Biogeochemical evaluation of forest ecosystems in the area affected by Norilsk industrial complex. Contemporary Problems of Ecology, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 669—678.
16. *Kachor O. L., Sarapulov G. I., Bogdanov A. V.* Investigation of the possibility of immobilization of mobile forms of arsenic in technogenic soils. J. of Mining Institute, 2019, vol. 239, pp. 596—602.
17. *Smirnov Y. D., Suchkov D. V., Danilov A. S., Goryunova T. V.* Artificial soils for restoration of disturbed land productivity. Eurasian Mining, 2021, vol. 36 (2), pp. 92—96.
18. *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. J. of Ecological Engineering, 2021, vol. 22 (4), pp. 66—77.
19. *Яковлев А. С., Плеханова И. О., Кудряшов С. В., Аймалетдинов Р. А.* Оценка и нормирование экологического состояния почв в зоне деятельности предприятий металлургической компании «Норильский никель» // Почвоведение. — 2008. — № 6. — С. 737—750.
Yakovlev A. S., Plekhanova I. O., Kudryashov S. V., Aimaletdinov R. A. Assessment and regulation of the ecological state of soils in the area of activity of the enterprises of the metallurgical company “Norilsk Nickel”. Pochvovedenie, 2008, no. 6, pp. 737—750. (In Russian).
20. *Потравная Е. В.* Взаимодействие бизнеса и коренных народов Севера: чего ждет население после аварии в Норильске? // ЭКО. — 2021. — № 7. — С. 19—39.
Potravnaya E. V. Interaction between Business and Indigenous Peoples of the North: What does the Population Expect after the Norilsk Accident? ECO, 2021, no. 7, pp. 19—39. (In Russian).
21. *Цукерман В. А., Иванов С. В.* Экологическая политика ресурсных корпораций при промышленном освоении месторождений минерального сырья Арктической зоны Российской Федерации // Гор. информ.-аналит. бюлл. — 2020. — № 10. — С. 56—66.
Tsukerman V. A., Ivanov S. V. Environmental policy of resource corporations during the industrial development of mineral deposits in the Arctic zone of the Russian Federation. Mining Information and Analytical Bull., 2020, no. 10, pp. 56—66. (In Russian).
22. *Апулу О., Потравный И., Сухорукова И.* Методы обоснования и выбора технологий рекультивации загрязненных нефтью земель // Экология и пром-сть России. — 2021. — Т. 25, № 6. — С. 38—43.
Apulu O., Potravny I., Sukhorukova I. Methods of Justification and Selection of Technologies for Remediation of Oil-contaminated Land. Ecology and Industry of Russia, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 38—43. (In Russian).
23. *Самсонова И. В., Потравный И. М., Павлова М. Б., Семенова Л. А.* Оценка убытков, причиненных коренным малочисленным народам Севера в Таймырском Долгано-Ненецком районе Красноярского края вследствие разлива дизельного топлива на ТЭЦ-3 в Норильске // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 2. — С. 254—265.
Samsonova I. V., Potravny I. M., Pavlova M. B., *Semyonova L. A.* Assessment of losses caused to the indigenous peoples of the North in the Taimyr Dolgano-Nenets District of the Krasnoyarsk Territory due to the diesel spill at TPP-3 in Norilsk. Arctic: Ecology and Economy, 2021, vol. 11, no. 2, pp. 254—265. (In Russian).
24. *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. J. of Mining Inst., 2023, pp. 1—10.
25. *Vasilyeva M., Kovshov S., Zambrano J., Zhemchuzhnikov M.* Effect of magnetic fields and fertilizers on grass and onion growth on technogenic soils. J. of Water and Land Development, 2021, vol. 49, pp. 55—62.
26. *Nakbanpote W., Meesungnoen O., Prasad M. N. V.* Potential of Ornamental Plants for Phytoremediation of Heavy Metals and Income Generation. Bioremediation and Bioeconomy, 2016, pp. 179—217.
27. *Liu J., Xin X., Zhou Q.* Phytoremediation of contaminated soils using ornamental plants. Environmental Reviews, 2018, vol. 26 (1), pp. 43—54.
28. *Khan A. H. A., Kiyani A., Mirza C. R., Butt T. A., Barros R., Ali B., Iqbal M., Yousaf S.* Ornamental plants for the phytoremediation of heavy metals: Present knowledge and future perspectives. Environ Res., 2021, vol. 195, pp. 117—130.
29. *Rocha C. S., Rocha D. C., Kochi L. Y.* Phytoremediation by ornamental plants: a beautiful and ecological alternative. Environ Sci Pollut Res, 2022, vol. 29, pp. 3336—3354.
30. *Bosiacki M.* Phytoextraction of cadmium and lead by selected cultivars of *Tagetes electa* L. Pt. II. Content of Cd and Pb in plants. Acta Sci. Pol. Hortoru, 2009, vol. 8, pp. 15—26.
31. *Liu Y. T., Chen Z. S., Hong C. Y.* Cadmium-induced physiological response and antioxidant enzyme changes in the novel cadmium accumulator, *Tagetes patula.* J. of Hazardous Materials, 2011, vol. 189 (3), pp. 724—731.
32. *Singh S. K., Biswojit B.* Bioavailability of Heavy Metals (Cd, Cr, Ni, Pb) to French Marigold (*Tagetes*

patula) in relation to Soil properties. Trends Tech Sci Res, 2018, vol. 1 (5), pp. 555—572.
33. *Miao Q., Yan J.* Comparison of three ornamental plants for phytoextraction potential of chromium removal from tannery sludge. J. of Material Cycles and Waste Management, 2013, vol. 15, pp. 98—105.
34. *Milusheva D. I., Iakimova E. T., Atanassova B. Y.* Growth performance of marigold (*Tagetes patula* L.) at conditions of soil contamination with Cd, Al and Zn. J. of Mountain Agriculture on the Balkans, 2016, vol. 19 (1), pp. 227—245.
35. *Kumar P., Pandey A. K., Vijai K., Pathak S.* Siddique Anaytullah. Phytoextraction of Lead, Chromium, Cadmium, and Nickel by Tagetes Plant Grown at Hazardous Waste site. Annals of Biology, 2018, vol. 34 (3), pp. 287—289.
36. *Ahmad I., Saquibi R. U., Qasim M., Saleem M., Khan A. S., Yaseen M.* Humic acid and cultivar effects on growth, yield, vase life, and corm characteristics of Gladiolus. Chılean J. of Agrıcultural Research, 2013, vol. 73 (4), pp. 339—344.
37. *Minisha T. M., Shah I. K., Varghese G. K., Kaushal R. K.* Application of Aztec Marigold (*Tagetes erecta* L.) for phytoremediation of heavy metal polluted lateritic soil. Environmental Chemistry and Ecotoxicology, 2020, vol. 3, pp. 1—21.
38. *Janos P., Vavrova J., Herzogova L., Pilarova V.* Effects of inorganic and organic amendments on the mobility (leachability) of heavy metals in contaminated soil: A sequential extraction study. Geoderma, 2010, vol. 159, pp. 335—341.
39. *Cacco G., Dell Agnolla G.* Plantgrowth regulator activity of soluble humic substances. Can. J. Soil Sci., 1984, vol. 64, pp. 25—28.
40. *Yang T., Hodson M. E.* Investigating the use of synthetic humic-like acid as a soil washing treatment for metal contaminated soil. Sci. Total Environ., 2019, vol. 647, pp. 290—300.
41. *Kerndorff H., Schnitzer M.* Sorptionof metals on humic acid. Geochimica et Cosmo-chimica Acta, 1980, vol. 44, pp. 1701—1708.
42. *Дмитриева Е. Д., Сюндюкова К. В., Леонтьева М. М., Глебов Н. Н.* Влияние pH среды на связывание ионов тяжелых металлов гуминовыми веществами и гиматомелановыми кислотами торфов // Ученые зап. Казан. ун-та. Сер. «Естеств. Науки». — 2017. — Т. 159, № 4. — С. 575—588.
Dmitrieva E. D., Syundyukova K. V., Leontyeva M. M., Glebov N. N. Influence of environmental pH on the binding of heavy metal ions by humic substances and hymatomelanic acids of peats. Scientific notes of Kazan University. Ser. “Natural Sciences”, 2017, vol. 159, no. 4, pp. 575—588. (In Russian).
43. *Севастьянов Д. В., Исаченко Т. Е., Гук Е. Н.* Норильский регион: от природной специфики к практике освоения // Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. — Сер. 7. «Геология. География». — 2014. — № 3. — С. 82—94.
Sevastyanov D. V., Isachenko T. E., Guk E. N. Norilsk region: from natural specifics to development practice. Bull. of St. Petersburg Univ. Ser. 7 “Geology. Geography”, 2014, no. 3, pp. 82—94. (In Russian).
44. *Kopsell D., Belisle C., Lowery H., Whitlock C., Sams C. E.* Genotype and lighting environment impact petal tissue pigmentation in Tagetes tenuifolia. Acta Horticulturae, 2016, vol. 113, pp. 103—110.
45. *Swift R.* Organic matter characterization. D. L. Sparks et al. (eds). Methods of soil analysis. Pt. 3. Chemical methods. Soil Science Society of America, 1996, pp. 1018—1020.
46. *Kacar B., Inal A.* Plant analysis, Nobel Yayin no. 1241. Fen Bilimleri, 2008, vol. 6.
47. *Weinberg S., Harel D., Abramowitz S.* Statistics Using R: An Integrative Approach. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2020, p. 692.
48. *Виноградов А. П.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. — М.: Изд-во АН СССР, 1957. — 200 с.
Vinogradov A. P. Geochemistry of rare and trace chemical elements in soils. Moscow, Publish. House of the USSR Academy of Sciences, 1957, 200 p. (In Russian).
49. *Добровольский В. В.* Основы биогеохимии. — М.: ACADEMIA, 2003. — 397 с.
Dobrovolsky V. V. Fundamentals of biogeochemistry. Moscow, ACADEMIA, 2003, 397 p. (In Russian).
50. *Ильин В. Б.* Тяжелые металлы в системе почва-растение. — Новосибирск: Наука, 1991. — 150 с.
Ilyin V. B. Heavy metals in the soil-plant system. Novosibirsk, Nauka, 1991, 150 p. (In Russian).
51. *Krylova E. G., Garin E. V.* The effect of the combined action of nickel and copper ions on the initial stages of ontogenesis of *Alisma plantago-aquatica*. Regulatory Mechanisms in Biosystems, 2020, vol. 11 (3), pp. 367—371.
52. *Theriault G., Nkongolo K.* Nickel and Copper Toxicity and Plant Response Mechanisms in White Birch (*Betula papyrifera*). Bull. of Environmental Contamination and Toxicology, 2016, vol. 97 (2), pp. 171—176.
53. *Peralta-Videa J. R., Gardea-Torresdey J. L., Gomez E., Tiemann K. J., Parsons J. G., Carrillo G.* Effect of mixed cadmium, copper, nickel and zinc at different pHs upon alfalfa growth and heavy metal uptake. Environmental Pollution, 2002, vol. 119 (3), pp. 291—301.
54. *Shalaby T. A., El-Newiry N. A., El-Tarawy M., El-Mahrouk M. E., Shala A. Y., El-Beltagi H. S., Rezk A. A., Ramadan K. M. A., Shehata W. F., El-Ramady H.* Biochemical and Physiological Response of Marigold (*Tagetes erecta* L.) to Foliar Application of Salicylic Acid and Potassium Humate in Different Soil Growth Media. Gesunde Pflanzen, 2022, pp. 1—14.
55. *Slukovskaya M. V., Kremenetskaya I. P., Ivanova L. A., Vasilieva T. N.* Remediation in conditions of anoperating copper-nickel plant: results of perennial experiment. Non-ferrous Metals, 2017, vol. 2, pp. 20—26.

Информация об авторах

Чукаева Мария Алексеевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории МЭО, НЦ «Экосистема», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (199106, Россия, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2), e-mail: chukaeva_ma@pers.spmi.ru.

Пухальский Ян Викторович, научный сотрудник Научно-образовательного центра (НОЦ) инновационного растениеводства «Зимний сад», Ленинградский государственный университет им. А. С. Пушкина (196605, Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, Петербургское шоссе, д. 10), e-mail: puhalskyyan@gmail.com.

Лоскутов Святослав Иванович, кандидат сельскохозяйственных наук, директор НОЦ инновационного растениеводства «Зимний сад», Ленинградский государственный университет им. А. С. Пушкина (196605, Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, Петербургское шоссе, д. 10), e-mail: lislosk@mail.ru.

Сидорова Валерия Романовна, магистрант кафедры геоэкологии, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (199106, Россия, Санкт- Петербург, 21-я линия В. О., д. 2), e-mail: st-valleria@mail.ru.

Воропаева Елена Владимировна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры естествознания и географии, Ленинградский государственный университет им. А. С. Пушкина (196605, Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, Петербургское шоссе, д. 10), e-mail: lena.voropaeva.1973@mail.ru.

Матвеева Вера Анатольевна, кандидат технических наук, директор НЦ «Экосистема», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (199106, Россия, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2), e-mail: Matveeva_VA2@pers.spmi.ru.

ASSESSMENT OF CHANGES IN THE HEAVY-METAL PHYTOEXTRACTION BY *TAGETES ERECTA* FROM CONTAMINATED SOILS OF NORILSK USING HUMIC ADDITIVES

Chukaeva, M. A.[1], Puhalsky, J. V.[2], Loskutov, S. I.[2], Sidorova, V. R.[1], Voropaeva, E. V.1, Matveeva, V. A.[1]

[1] Saint Petersburg Mining University (St. Petersburg, Russian Federation)

[2] Pushkin Leningrad State University (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on October 6, 2023

For citing

Chukaeva M. A., Puhalsky J. 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. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-90-102. (In Russian).

Abstract

The article evaluates the changes in the phytoremediation potential of Tagetes Erecta when using stress-protective additives in the form of humic acids on the example of heavy metal extraction from heavy contaminated soils in Norilsk. The researchers reveal that the application of 0.025% humic acids influences the growth of

biomass and reduces the total accumulation of heavy metals in it. They also find out a negative correlation between these indicators, more pronounced on roots than on shoots. To use plants in phytoremediation it is necessary to increase the humic acid dose until the combined effect is achieved. The results of the study can be used to clean up soils contaminated with heavy metals in industrial areas of the Arctic zone.

Keywords: *heavy metals, urban soils, phytoremediation, Tagetes erecta, humic acids, Norilsk.*

Funding
The research was carried out within the framework of the state assignment: "Fundamental interdisciplinary research of the Earth interior and processes of integrated development of georesources. Code FSRRW-2023-0002".

Information about the authors

Chukaeva, Maria Alekseevna, PhD of Engineering, Senior Researcher of Scientific Center "Ecosystem", Saint Petersburg Mining University (2, 21st Line, St. Petersburg, Russia, 199106), e-mail: chukaeva_ma@pers.spmi.ru.

Pukhalsky, Yan Viktorovich, Researcher of Research and Development Center for Innovative Plant Growing "Winter Garden", Leningrad State University named after A. S. Pushkin (10, Petersburg highway, Russia, St. Petersburg, Pushkin, 196605), e-mail: puhalskyyan@gmail.com.

Loskutov, Svyatoslav Ivanovich, PhD of Agriculture, Director of Research and Development Center for Innovative Plant Growing "Winter Garden", Leningrad State University named after A. S. Pushkin (19, Petersburg highway, St. Petersburg, Pushkin, Russia, 6605), e-mail: lislosk@mail.ru.

Voropaeva, Elena Vladimirovna, PhD of Agriculture, Associate Professor of the Department of Natural Science and Geography, Leningrad State University named after A. S. Pushkin (10, Petersburg highway, Russia, St. Petersburg, Pushkin, 196605), e-mail: lena.voropaeva.1973@mail.ru.

Sidorova, Valeria Romanovna, Undergraduate of the Department of Geo-Ecology, Saint Petersburg Mining University (2, 21st Line, St. Petersburg, Russia, 199106), e-mail: liatolani@mail.ru; st-valleria@mail.ru.

Matveeva, Vera Anatolyevna, PhD of Engineering, Director of the Scientific Center "Ecosystem", Saint Petersburg Mining University (2, 21st Line, St. Petersburg, Russia, 199106), e-mail: matveeva_va2@pers.spmi.ru.

© Chukaeva M. A., Puhalsky J. V., Loskutov S. I., Sidorova V. R., Voropaeva E. V., Matveeva V. A., 2024