

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ФИТОРЕМЕДИАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

POSSIBILITIES OF APPLICATION OF THE PHYTOREMEDIATION METHOD ON THE EXAMPLE OF POLLUTED SOILS OF ST. PETERSBURG

**E. Voropaeva
O. Shepeleva
N. Lovetskaya**

Summary. In the framework of the study, the contamination of soils with heavy metals was assessed, their concentrations were determined, and potential hyperaccumulator plants capable of absorbing toxic substances from the soil were studied. Excessive HM content was shown at several sampling points. An experiment was conducted with the cultivation of ornamental plants *Tagetes erecta L.* on soils sampled near the Shuvalovsky quarry in St. Petersburg. The ability of *Tagetes erecta L.* to accumulate heavy metals was shown, which makes them promising candidates for use in the phytoremediation method of contaminated soils.

Keywords: soil contamination, heavy metals, hyperaccumulator plants, *Tagetes erecta L.*

Воропаева Елена Владимировна

*к.с/х.н., доцент, Ленинградский Государственный
Университет им. А.С. Пушкина
lena.voropaeva.1973@mail.ru*

Шепелева Ольга Петровна

*к.с/х.н., доцент, Ленинградский Государственный
Университет им. А.С. Пушкина
shepelevaop@mail.ru*

Ловецкая Нина Дмитриевна

*магистр, Санкт-Петербургский
государственный университет
lovetskaja@mail.ru*

Аннотация. В рамках исследования оценено загрязнение почв тяжелыми металлами, определены их концентрации, а также изучены потенциальные растения-гипераккумуляторы, способные поглощать токсичные вещества из почвы. Показано превышение содержания ТМ в нескольких точках отбора образцов. Проведен эксперимент с выращиванием декоративных растений *Tagetes erecta L.* на почвах, отобранных вблизи Шуваловского карьера города Санкт-Петербурга. Показана способность *Tagetes erecta L.* к накоплению тяжелых металлов, что делает их перспективными кандидатами для использования в методе фиторемедиации загрязненных почв.

Ключевые слова: загрязнение почв, тяжелые металлы, растения-гипераккумуляторы, *Tagetes erecta L.*

В современном мире состояние почв является одной из наиболее важных экологических проблем, с которой сталкивается человечество. Почвы играют ключевую роль в поддержании жизни на планете, так как обеспечивают необходимые питательные вещества для растений, которые в свою очередь служат источником пищи для людей, животных и других организмов. Однако, в результате неустойчивого ведения хозяйственной деятельности, промышленного развития, неудовлетворительного управления отходами и других факторов, почвенные ресурсы подвергаются серьезному загрязнению.

В настоящее время почвы в основном загрязнены широким спектром различных поллютантов, включая тяжелые металлы, органические соединения, пестициды, радиоактивные элементы и другие вредные вещества. Среди приоритетных загрязнителей именно городских почв выделяют цинк, свинец, медь, а также никель, кобальт и кадмий. Также в урбанозомах встречаются алюминий и мышьяк [1]. Данные металлоиды не относятся к типичным представителям тяжелых металлов, но их токсические эффекты на растения рассматривают наряду с действием последних.

Загрязнение почв имеет серьезные последствия для экосистем и человеческого здоровья. Отравление почвенных ресурсов может привести к ухудшению качества почвенной продукции, уменьшению урожайности сельскохозяйственных культур, а также к негативным последствиям для здоровья людей, животных и растений. Кроме того, загрязненные почвы могут вызывать загрязнение водоемов и атмосферы, что приводит к распространению загрязнителей на большие расстояния и угрозе жизни на Земле.

В условиях стремительного роста урбанизации и промышленного развития экологическая устойчивость и качество почвенного покрова становятся критически важными для сохранения здоровой окружающей среды. Шуваловский карьер, расположенный в Приморском районе Санкт-Петербурга, является примером территории, подвергшейся значительному антропогенному воздействию, включая загрязнение тяжелыми металлами и нефтепродуктами. Эти загрязнители представляют серьезную угрозу не только для экосистемы карьера, но и для здоровья жителей прилегающих районов. В связи с этим возникает необходимость разработки и внедрения эффективных методов очистки почв.

Фиторемедиация — метод использования растений для удаления, переноса и детоксикации загрязняющих веществ из почвы и воды, представляет собой перспективное решение для восстановления загрязнённых территорий. Этот метод основан на способности некоторых растений к гипераккумуляции токсичных веществ, что позволяет им эффективно очищать почву, не нанося вреда окружающей среде. На протяжении многих лет территории вблизи Шуваловского карьера застраивались большими жилыми кварталами: на его берегу располагается жилой комплекс Шуваловский, в котором проживает порядка 15 тысяч человек. Помимо этого, по территории карьера протекает река Каменка, несущая свои воды далее в Юнтоловский заказник, являющийся важной экологической зоной, где сохраняются разнообразные виды животных и растений.

В данной работе рассматривается такое направление рекультивации почв, как биоремедиация, а именно фиторемедиация. Согласно ГОСТ Р 57079-2016: «биоремедиация (bioremediation): комплекс методов очистки вод, грунтов и атмосферы с использованием метаболического потенциала биологических объектов — растений, грибов, насекомых, червей, микроорганизмов» [2].

В современных условиях биоремедиация почв становится все более актуальной из-за нарастающих проблем загрязнения окружающей среды, вызванных деятельностью человека. Важно отметить, что в отличие от физико-химических методов очистки почв, которые часто приводят к разрушению естественных экосистем и негативно воздействуют на биоразнообразие, биоремедиация способствует восстановлению природных функций почвы и восстановлению биологического равновесия.

В большинстве случаев для очистки городских территорий используют традиционные интенсивные методы, основанные на применении химических реагентов, либо физическом удалении верхнего загрязненного слоя для последующего биовосстановления (ландфарминг) или полной его замене. При их применении разрушается почвенный покров, и нарушаются биологические процессы в почве. А также, зачастую стоимость применения подобных методов оказывается неоправданно завышенной.

Альтернативным методом очистки среды, является применение фиторемедиации, то есть использование зеленых растений для удаления органических и неорганических загрязнителей из почвы и воды, которая имеет низкую стоимость и не наносит вреда окружающей среде. Считается, что стоимость данного метода является низкой и составляет в среднем около 25 USD [3]. Однако у метода имеются и ограничения. Биомасса растений, содержащая повышенные концентрации тяжелых металлов, является источником повторного загрязнения, поэтому должна удаляться и утилизироваться.

Идея фиторемедиации базируется на свойствах определенных видов растений, способных выдерживать высокие уровни загрязнения почвы и воды. Эти растения, называемые гипераккумуляторами, активно абсорбируют токсины через свои корни и затем концентрируют их в своих тканях. В процессе фиторемедиации, гипераккумуляторы играют ключевую роль, выступая в качестве естественных фильтров и очистителей.

Имеется обширная литературная база о ряде растений, отвечающих требованиям, применимым к растениям-гипераккумуляторам, а также проводятся исследования по использованию новых растений в качестве фиторемедиантов. Гораздо менее изучены декоративные растения, способные извлекать из почвы тяжелые металлы. Среди потенциальных кандидатов для детоксикации почв выделяют растения бархатцы отклоненные (*Tagetes patula*). Наряду с другим представителем из рода Бархатцы — *Tagetes erecta*, они также обладают большим потенциалом для использования в технологии фитостабилизации почв, загрязненных ТМ [4,5].

Тяжелые металлы, такие как свинец, кадмий, ртуть, хром и медь, могут накапливаться в почве в результате различных антропогенных воздействий. Источником распространения ТМ на территории карьера могут являться захоронения техногенных конструкций от аэродрома, а также большие скопления транспорта на Парашютной улице, являющейся особо востребованной у населения города, как автомагистраль ведущая в Курортный район СПб и в целом за черту города. Так же имеется загрязнение территории авиационным керосином, на месте границы предприятия ОДК «Климов» и северо-западного берега карьера.

Для анализа почвы вблизи береговой линии Шуваловского карьера были проведены взятия проб почвенных образцов.

Почвы были отобраны по ГОСТ Р 58595-2019 [6] в 7-ми точках на берегу карьера (табл. 1) таким образом, чтобы были исследованы наиболее загрязненные участки, а также места отдыха людей, у родника и т.д.

Согласно данным сравнительного анализа почвенных проб по содержанию кислоторастворимых форм ТМ (табл. 2), стоит отметить превышение средних количеств ТМ в нескольких точках отбора. Превышение ПДК по меди имеется в почвенных образцах №1 и 2, по никелю в №5, по хрому по всем образцам.

Анализ производился на атомно-эмиссионном спектрометре в лаборатории на базе кафедры геоэкологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Таблица 1.

Местоположение и координаты точек отбора проб почвы на территории карьера

№	Местоположения точек отбора проб	Координаты		рН водной вытяжки	Гранулометрический состав
		Широта (N)	Долгота (E)		
1	Верх ШК около Каменки, старые здания аэродрома	60.042955	30.265836	6,23	Песок
2	Берег реки Каменка перед Шуваловским карьером	60.044025	30.262256	6,50	Супесь
3	Берег Карьера, место отдыха жителей ближайших ЖК	60.044931	30.254025	6,30	Песок
4	Берег ШК, Керосиновая линза, граница территории ОДК Климов	60.044962	30.243317	5,22	Тяжелый суглинок
5	Берег Каменки ниже по течению, обочина Парашютной улицы	60.043303	30.238894	7,00	Легкий суглинок
6	Берег ШК, граница территории спортивного комплекса «Шуваловский Лед»	60.042560	30.24926	6,00	Песок
7	Берег ШК, родник	60.041312	30.265117	6,90	Песок

Таблица 2.

Содержание тяжелых металлов в образцах почвы, мг/кг

№	Pb	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr
	ПДК=6,0	ПДК=3,0	ПДК=20,0	ПДК=1,1	ПДК=4,0	ПДК=0,05
1	2,1	5,9	16,7	0,1	3,42	1,48
2	0,4	5,0	3,5	< 0,1	2,84	0,92
3	0,7	1,6	2,2	< 0,1	2,56	0,32
4	0,6	1,3	2,7	< 0,1	2,40	0,58
5	4,1	1,9	15,8	0,85	5,06	1,74
6	0,5	1,5	2,9	< 0,1	3,22	0,48
7	0,3	1,1	1,3	< 0,1	2,47	0,52

Бархатцы прямостоячие (*Tagetes erecta* L.) являются фиторемедиантами тяжелых металлов и нефтепродуктов [7] а также имеют обширную наземную биомассу и совместимы с повенно-климатическими условиями региона.

Эксперимент с выращиванием бархатцев на семи отобранных образцах почвы вблизи карьера был проведен в 2023–2024 гг. в научно-образовательном центре инновационного растениеводства «Зимний сад» ГАОУ ВО ЛО «ЛГУ им. А.С. Пушкина» (г. Санкт-Петербург).

В ходе вегетационного опыта растения выращивали в почве, содержащей различное количество поллютантов, в качестве контроля брали нейтрализованный верховой торф (проба №8).

Семена растений сеяли в пластиковые кассеты с 10 ячейками, заполненные почвой. Кассеты помещали в закрытый климатический гроубокс (150x150x150 см) с вентиляцией и интенсивной светокультурой. Температура

воздуха внутри рабочей зоны бокса поддерживалась на уровне 25–27°C днем и 12–14°C ночью. Фотопериод имел продолжительность 12 ч, а средний поток фотосинтетической радиации (ФАР) с высоты подвеса светильников в один метр, в среднем равнялся 250 мкмоль м-2с-1 или 14500 Лк. В качестве источника инсоляции служила 400 Вт ДНАТ-лампа, спектр облучения которой был скорректирован с помощью 100 Вт LED-фитопанели.

Во время эксперимента в течение 30 дней проводились замеры роста растений. Для *Tagetes erecta* в контрольном варианте средняя высота растений составила 59 см, в то время как в точках отбора образцов она варьировалась от 15.5 см до 40 см.

В рамках вегетационного эксперимента был проведен последующий элементный анализ Бархатцев прямостоячих (*Tagetes erecta* L.). Образцы биомассы анализировались методом атомно-эмиссионной спектроскопии на приборе ICPE-9000 (Shimadzu, Япония). Результаты показали значительное накопление элементов в биомассе растений, выращенных на загрязненных почвах (табл. 3).

Полученные данные свидетельствуют о накоплении растениями следующих элементов: Ca, Mg, Na, Al, Fe, Ba, Mn, Zn, Sr, Ti, Cu, Cr, Ni. Высокие концентрации таких элементов, как Fe, Mn, Al, Cr и Ni, указывают на способность растений к накоплению токсичных элементов из загрязненных почв. Контрольные пробы показали значительно более низкие концентрации токсичных элементов, что объясняется использованием нейтрализованного верхового торфа, который не содержит загрязняющих веществ.

Проведенные исследования продемонстрировали высокую эффективность использования декоративных растений для очистки загрязнённых территорий. Эксперименты подтвердили способность *Tagetes erecta* L. к накоплению тяжелых металлов и нефтепродуктов, что делает их перспективными кандидатами для использования в методе фиторемедиации загрязненных почв.

Таблица 3.

Данные элементного анализа биомассы *Tagetes erecta* L.

Элемент, mg/kg	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	Контр.
Ca	40715,0	21891,0	26015,1	16477,0	25961,1	28873,7	27020,3	18866,5
Mg	5275,4	5867,0	2917,6	4626,6	4233,9	4056,4	6182,2	2354,1
K	29059,8	31462,8	38815,6	17121,2	35902,0	34863,4	29941,8	43824,5
Na	158,4	1301,1	186,2	437,8	753,6	753,5	945,0	171,1
Al	415,3	202,8	194,2	1187,0	359,7	1052,2	538,5	95,1
Fe	702,42	393,40	322,03	1580,00	556,35	973,21	840,26	246,37
Ba	546,30	135,86	74,48	438,00	91,93	336,86	134,45	5,00
Mn	79,91	595,75	146,73	6807,00	175,43	153,58	207,85	303,37
Zn	79,20	147,73	100,65	118,48	105,94	59,90	118,31	63,71
Sr	74,79	75,47	76,57	54,24	68,95	124,40	104,65	23,06
Ti	252,14	63,73	22,10	90,61	59,29	118,26	70,93	8,13
Cu	29,49	21,75	18,52	26,36	14,42	23,96	21,22	7,04
Cr	0,58	0,51	0,39	3,20	0,90	0,40	0,36	0,06
Ni	1,13	4,16	1,37	7,90	1,46	3,23	2,81	0,52

Таким образом, результаты данного исследования предоставляют ценные данные для дальнейшего развития фиторемедиационных технологий и их успешного применения в практике экологической реабилитации загрязнённых почв. Внедрение фиторемедиации в про-

ект по благоустройству Шуваловского карьера будет способствовать не только восстановлению экологического баланса, но и улучшению качества жизни жителей прилегающих районов, создавая благоприятную и здоровую среду для проживания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т.А. Трифонова, И.Н. Курочкин, Ю.Н. Курбатов, Тяжёлые металлы в почвах различных функциональных зон урбанизированных территорий: оценка содержания и экологического риска // Теоретическая и прикладная экология. 2023 № 2 / Theoretical and Applied Ecology. 2023 No. 2. С.38–46.
2. ГОСТ Р 57079-2016 Биотехнологии. Классификация биотехнологической продукции. Москва, 2016, с. 5.
3. Mohammad Reza Boorboori, Lenka Lackoová Biochar. An effective factor in improving phytoremediation of metal(iod)s in polluted sites // Frontiers in Environmental Science. Vol. 30. 2023. P. 1–13.
4. Chaturvedi N., Ahmed M.J., Dhal N.K. Effects of iron ore tailings on growth and physiological activities of *Tagetes patula* L. // Journal of Soils and Sediments. 2013;14(4):721–730. DOI: 10.1007/s11368-013-0777-0.
5. Ловецкая Н.Д., Воропаева Е.В. Фитоэкстракция тяжелых металлов бархатцами отклоненными (*tagetes patula*) под влиянием гуминовых кислот // XLVIII Всероссийская конференция обучающихся «Обретенное поколение». М: «Интеграция», 2021, с.135–136.
6. ГОСТ Р 58595-2019. Национальный стандарт. Почвы. Отбор проб. Москва, 2019.
7. Гальченко С.В., Мажайский Ю.А., Гусева Т.М., Чердакова А.С. Фиторемедиация городских почв, загрязненных тяжелыми металлами, декоративными цветочными культурами. Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. 2015, № 4(49).
8. Пухальский Я.В. Фитосанация урбаноземов цветочно-декоративными культурами: Учебно-методическое издание / ГАОУ ВО ЛО Ленинградский государственный университет имени А. С. Пушкина, Пушкин, 2022. 38 с.
9. Zhou G., Guo J., Yang J. Effect of fertilizers on Cd accumulation and subcellular distribution of two cosmos species (*Cosmos sulphureus* and *Cosmos bipinnata*). // International Journal of Phytoremediation. Vol. 30. 2018. P. 930–938.
10. Aftab N., Saleem K., Hussain J., *Cosmos sulphureus* Cav. is more tolerant to lead than copper and chromium in hydroponics system // International journal of Environmental Science and Technology 18(1) Vol. 18, October 2020. P 2325–2334.
11. Писаренко Е.Н. Использование подсолнечника в качестве ремедианта загрязнённых почв // Теоретическая и прикладная экология №2. Киров: Камертон, 2009. с. 47–49.
12. Постников Д.А. Фитомелиорация и фиторемедиация почв сельскохозяйственного назначения с различной степенью окультуренности и экологической нагрузки. автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора с.х. наук. Брянск: Центр ФГОУ ВПО МГАУ, 2009. 268 с.

© Воропаева Елена Владимировна (lena.voropaeva.1973@mail.ru); Шепелева Ольга Петровна (shepelevaop@mail.ru);

Ловецкая Нина Дмитриевна (lovetskaja@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»