

УДК 614.77:549.2:631.415.7

**ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ ГИПЕРАККУМУЛЯТОРАМИ
УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ****Дарья Александровна Достовалова¹, Александр Захарович Глухов¹,
Николай Сергеевич Подгородецкий²**¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Донецкий ботанический сад»,

283023, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Ильича, 110

² Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования

«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,

286123, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2

E-mail: dasha.dostovalova1997@mail.ru

В статье представлены результаты сравнительного анализа химического состава ультрадисперсных частиц субстрата озелененного породного отвала шахты 5/6 имени Димитрова (г. Донецк, ДНР) до и после посадки тест-гипераккумулятора загрязнителей рапса озимого. Наблюдается активное поглощение рапсом озимым всех исследуемых элементов (снижение концентрации от 1,5 до 300 раз). Это обосновывает применение рапса озимого как гипераккумулятора ультрадисперсных загрязнителей с дальнейшим сбором побегов, переработкой и сепарацией из биомассы редких и полезных металлов, и их дальнейшим применением в промышленных целях. Установлено, что наноразмерные загрязнители обладают высоким ингибирующим эффектом и активно поглощаются рапсом озимым. Наиболее высоким фиторемедиационным потенциалом рапс обладает по отношению к кремнию, алюминию, ванадию, сере. Доказано, что содержание ультрадисперсных загрязнителей в субстрате не оказывает влияния на всхожесть и энергию прорастания семян тест-гипераккумулятора. Ускорению и улучшению роста растений может способствовать внесение гумидных удобрений. Для максимальной утилизации полезных металлов из породных отвалов при помощи растений необходимы дополнительные исследования по выявлению ультрадисперсных частиц, нетоксичных в высоких дозах, а также растений, устойчивых к высоким концентрациям ультрадисперсных загрязнителей.

Ключевые слова: рапс озимый; технозем; ландшафтное техногенное новообразование

Введение

Стремительное развитие промышленности и изменение климата ведет ко все возрастающему поступлению нано- и микрочастиц в окружающую среду и затрагивает их влияние на живые системы, в том числе человека. На первый план выходят исследования путей поступления и накопления наночастиц в живых системах, их токсичности и, в целом, биологической безопасности. Растения являются наиболее чувствительными индикаторами к воздействию ультрадисперсных загрязнителей и их эффективными поглотителями. Причины биологической активности наночастиц и их экологические эффекты к настоящему времени мало изучены, есть потребность в совокупных исследованиях, установлении основных тест-объектов, прогнозировании возможных отдаленных токсических эффектов [1-5].

В Донбассе, как и на территории Ростовской, Московской, Тульской областей основными типами техноземов являются ландшафтные техногенные новообразования, среди которых ключевую роль занимают шахтные породные отвалы – складированные объемы отходов добычи угля, которые оказывают комплексное негативное воздействие на окружающую среду. Основными факторами этого воздействия являются: изъятие больших площадей земель сельскохозяйственного пользования, выброс загрязнителей (в том числе ультрадисперсных) в атмосферный воздух, смыв и поступление токсичных

сточных вод в прилегающих верхних горизонтах почв и растительной биоте.

Почва считается наиболее вероятным длительным накопителем загрязняющих веществ в ультрадисперсной форме, с течением времени содержание их в почвах будет только возрастать. Поглощение ультрадисперсных загрязнителей почвой может неблагоприятно сказываться на состоянии почвенной биоты и растений как её компонентов, нарушая течение нормальных физиологических и биохимических процессов. Попадание наночастиц в любой компонент почвенного биоценоза путём передачи по пищевой цепи представляет серьёзный риск для здоровья человека и животных. [6, 7].

Озимый рапс (*Brassica napus* L.) является неприхотливым масличным сидератом, имеет развитую корневую систему, позволяющую эффективно извлекать загрязнители из почвы, теоретически, в первую очередь ультрадисперсных размерностей. В процессе извлечения загрязнителей происходит также ускорение процессов почвообразования, аэрации и дренажа почвы либо технозема, подвергаемого фиторемедиации. Благодаря быстрому росту рапс создает густую растительную массу, которая подавляет сорняки и предохраняет почву от эрозии и пересыхания. После заделки биомассы рапса в почву она обогащается органикой и азотом [8-10].

Целью исследования является тестирование рапса озимого в фиторемедиации модельного шахтного породного отвала как гипераккумулятора ультрадисперсных загрязнителей.

Объекты и методы исследований

В 2024 и 2025 гг. были произведены двукратные отборы проб породного субстрата (по Методическим указаниям по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства Министерства сельского хозяйства РФ) на модельном озелененном породном отвале ДНР ш. 5/6 имени Димитрова, находящемся в черте г. Донецка, ДНР.



Рис. 1 Результаты посадки рапса озимого на плато и склонах породного отвала

Отвал на данный момент является плоским, потухшим, озелененным без имеющихся очагов горения. Возраст отвала – 58 лет с окончания эксплуатации. Порода на отвале слабовыветренная, состоит из обломков породы разных размеров. Содержание фракции менее 1 мм от 11 до 27%. Отвал находится в стадии окисления и массового поселения растений.

В ходе исследования применялись обзорный, аналитический, натурный, экспериментальный, расчетный и статистический методы.

Посадка семян *Brassica napus* L. на породном отвале шахты 5/6 имени Димитрова (г. Донецк, ДНР) произведена в октябре 2024 г. на плато отвала, северном и южном склонах. Первые всходы появились через 6 дней на плато отвала. Появление всходов рапса на склонах наблюдалось через 3 недели (рис. 1).



Рис. 2 Проростки рапса озимого в породе отвала в лабораторных условиях

Также был произведен посев семян *Brassica napus* L. в породу отвала шахты 5/6 им. Димитрова (северный и южный склон) без внесения удобрений в лабораторных условиях (примерно по 300 шт семян в образец каждого из склонов). На последний день замеров прирост составил 12,5 см (южный склон) и 13 см (северный склон), соответственно 170 и 168 проростков (56,7% и 56% от общего количества) (рис. 2).

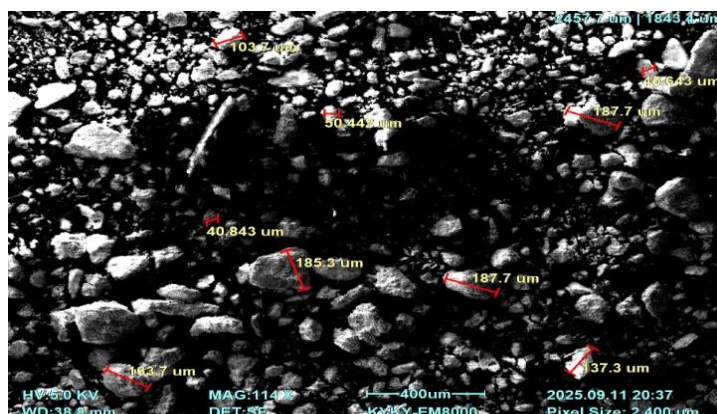


Рис. 3 Микроснимок с размерами частиц субстрата отвала шахты 5/6 имени Димитрова

В ходе эксперимента, проведенного в отделении анализа наноструктур инженерингового центра «Политехник» Донецкого национального технического

университета, в котором были задействованы следующие приборы: система напыления углерода C156TE (установка напыления углерода с турбомолекулярным насосом для пробоподготовки исследований методами электронной микроскопии), WIN SEM A7000 сканирующий электронный микроскоп, были получены снимки с размерами частиц субстрата отвала (увеличение в 400 раз) (рис. 3), соответственно которым выявлено наличие микроразмерных частиц в составе. Наноразмерных частиц не выявлено.

Статистические результаты получены с использованием программы Statistica.

Результаты исследования

В таблице приведены результаты содержания элементов в микроразмерных частицах (отдельной частице) в субстрате исследуемого породного отвала до и после посадки рапса озимого (элементы, значение которых >0).

Таблица

Содержание элементов в микроразмерных частицах субстрата отвала до и после посадки рапса озимого, %

Химический состав субстрата отвала	Si	Al	Br	Mg	Ca	K	Cs	V	S
До посадки рапса озимого	44,45	14,60	12,10	1,81	11,95	8,26	0,28	2,67	2,96
После посадки рапса озимого	10,34	5,92	8,39	0,68	1,50	0,55	0,10	0,18	0,01

В ходе статистической обработки результатов исследований установлено, что для субстрата отвала до посадки рапса процентное содержание элементов в среднем составляет 0,003 (стандартное отклонение составляет 0,0012), после посадки рапса 0,004 (стандартное отклонение составляет 0,0015). Разность между двумя средними значениями этих двух зависимых групп составляет 0,02 (стандартное отклонение – 0,025). Значение t-критерия Стьюдента составляет 4,90. Различия в процентном содержании элементов в субстрате до и после посадки рапса статистически достоверны на высоком уровне значимости ($p = 0,90$).

Наблюдается активное поглощение *Brassica napus* L. всех исследуемых элементов (снижение концентрации кремния в 4,4 раза, алюминия – в 2,5 раза, брома – в 1,44 раза, ванадия – в 14,8 раз, серы – в 296 раз). Это обосновывает применение рапса озимого как гипераккумулятора ультрадисперсных загрязнителей с дальнейшим сбором побегов, переработкой и сепарацией из биомассы редких и полезных металлов, и их дальнейшим применением в промышленных целях.

Выводы

В ходе исследования установлено, что наноразмерные загрязнители обладают высоким ингибирующим эффектом и активно поглощаются рапсом озимым. Наиболее высоким фиторемедиационным потенциалом рапс обладает по отношению к кремнию, алюминию, ванадию, сере. Доказано, что содержание ультрадисперсных загрязнителей в субстрате не оказывает влияния на всхожесть и энергию прорастания семян тест-гипераккумулятора. Ускорению и улучшению роста растений может способствовать внесение гумидных удобрений.

В натуральных условиях (на породном отвале) рекомендуется защитить посевы рапса озимого от вредителей, которыми могут выступать блошки, рапсовый пилильщик, рапсовый цветоед, тля, капустная моль. Для защиты от блошек и рапсового пилильщика рекомендуется использовать контактно-кишечные инсектициды

на основе перитроидов (обработать семена перед посевом); для предотвращения распространения тли, гусеницы капустной моли, капустницы и хлопковой совки — контактно-системные инсектициды (обработать побеги при достижении ими длины 10-12 мм); для контроля рапсового цветоеда — системный инсектицид «Пленум» с действующим веществом — пиметрозином (обработать за 5-10 дней до распускания первых бутонов). Препарат высокоэффективен в широком диапазоне температур, безопасен для опылителей, имеет короткий период ожидания и обеспечивает длительное (10-14 дней) защитное действие. Важно чередовать разрешённые для применения в посевах рапса препараты с разными действующими веществами, чтобы избежать появления устойчивых популяций вредителей.

Для максимальной утилизации полезных металлов из породных отвалов при помощи растений необходимы дополнительные исследования по выявлению ультрадисперсных частиц, нетоксичных в высоких дозах, а также растений, устойчивых к высоким концентрациям ультрадисперсных загрязнителей.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственных заданий ФГБНУ Донецкий ботанический сад по темам «Классификация почвенно-растительного покрова с помощью методов дистанционного зондирования Земли» (Регистрационный № 124101500495-0) и «Комплексное изучение биоресурсного потенциала растений мировой флоры для содействия экологической стабилизации и устойчивого развития» (Регистрационный № 126020616725-0).

Список литературы

1. Буренина А.А. Оценка воздействия высокодисперсных материалов на структурно-функциональные параметры растений на разных этапах развития // Диссер. на соиск. степ. канд. биол. наук, Томск. – 2019. – 176 с.
2. Гладкова М.М., Терехова В.А. Инженерные наноматериалы в почве: источники поступления и пути миграции // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2013. – № 3. – С. 34.
3. Цицуашвили В.С., Минкина Т.М., Невидомская Д.Г., Раджпут В.Д., Манджиева С.С., Сушкова С.Н. и соавт. Воздействие наночастиц меди на растения и почвенные микроорганизмы (обзор литературы) // Вестник аграрной науки Дона. – 2017. – № 3. – С. 93-100.
4. Короткова А.М., Кван О.В., Быкова Л.А., Кудрявцева О.С., Виденеева Т.С., Вишняков А.И. Сравнительный анализ морфофизиологических особенностей проростков *Triticum vulgare* после воздействия наночастиц металлов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2018. – № 80(3). – С. 190. DOI: <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-3-190-195>.
5. Лукомец В.М., Зеленцов С.В., Кривошлыков К.М. Перспективы и резервы расширения производства масличных культур в Российской Федерации // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. – 2015. – Вып. 4 (164). – С. 81-102.
6. Панова Г.Г., Шилова О.А., Николаев А.М., Коваленко А.С., Удалова О.Р., Аникина Л.М., Журавлева А.С., Хомяков Ю.В., Вертебный В.Е., Дубовицкая В.И. О влиянии наночастиц оксида железа на растения в вегетативный период развития // Агрофизика. – 2019. – № 3. – С. 40-50. DOI: 10.25695/AGRPH.2019.03.07.
7. Чурилов Г.И., Обидина И.В., Чурилов Д.Г., Полищук С.Д. Влияние размера и концентрации наночастиц металлов на их биологическую активность // Современная наука: актуальные вопросы теории и практики. Серия «Естественные и технические

науки». – 2020. – № 3. – С. 62-69.

8. *Asma Haj Sghaier, Ákos Tarnawa, Hussein Khaeim, Gergo Péter Kovács, Csaba Gyuricza and Zoltán Kende* The Effects of Temperature and Water on the Seed Germination and Seedling Development of Rapeseed (*Brassica napus* L.) // *Plants*. – 2022. – Vol. 11. – 18 p. DOI: 10.3390/plants11212819.

9. *Kaya A.R. Coşkun N.* Effect of organic fertilizer forms and doses on the seed germination and seedling development of rapeseed (*Brassica napus* L.) // *Applied ecology and environmental research*. – 2020. – Vol.18 (5). – 16 p. DOI:10.15666/aer/1805_68136828.

10. *Feizi H., Moghaddam P., Shahtahmassebi N., Fotovat A.* Impact of bulk and nanosized titanium dioxide (TiO₂) on wheat seed germination and seedling growth. – 2012. – Vol. 146. – No. 1. – P. 101-106. DOI:10.1007/s12011-011-9222-7.

Статья поступила в редакцию 25.01.2026 г.

Dostovalova D.A., Glukhov A.Z., Podgorodetsky N.S. Phytoremediation of rock dumps by hyperaccumulators of ultrafine pollutants // *Bull. of the State Nikita Botan. Gard.* – 2026. – № 158. – P. 7-12

The article presents the results of a comparative analysis of the chemical composition of ultrafine particles of the substrate of the greened rock dump of the Dimitrov mine 5/6 (Donetsk, DPR) before and after planting a test hyperaccumulator of winter rapeseed pollutants. There is an active absorption of all studied elements by rapeseed in winter (a decrease in concentration from 1.5 to 300 times). This justifies the use of winter rapeseed as a hyperaccumulator of ultrafine pollutants with further collection of shoots, processing and separation of rare and useful metals from biomass and their further use for industrial purposes. It has been established that nanoscale pollutants have a high inhibitory effect and are actively absorbed by winter rape. Rapeseed has the highest phytoremediation potential in relation to silicon, aluminum, vanadium, and sulfur. It is proved that the content of ultrafine pollutants in the substrate does not affect the germination and germination energy of the seeds of the hyperaccumulator test. The introduction of humic fertilizers can help accelerate and improve plant growth. For maximum utilization of useful metals from rock dumps using plants, additional research is needed to identify ultrafine particles that are non-toxic in high doses, as well as plants resistant to high concentrations of ultrafine pollutants.

Key words: *winter rapeseed; technozem; landscape technogenic neoplasm*