

УДК 635.9: 574:582.579.2

## ФИТОИНДИКАЦИЯ МЕТАЛЛОВ В ПОРОДНЫХ ОТВАЛАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Дарья Александровна Достовалова<sup>1</sup>, Александр Захарович Глухов<sup>1</sup>,  
Николай Сергеевич Подгородецкий<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Донецкий ботанический сад»,  
Российская Федерация, Донецкая Народная Республика,  
г. Донецк, 283023, пр. Ильича, 110

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования  
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, 286123,  
г.о. Макеевский, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2  
E-mail: mailbox@donnasa.ru, donetsk-sad@mail.ru, dasha.dostovalova1997@mail.ru

В работе исследованы возможности использования *Brassica napus* L. (рапса озимого) для фитоиндикации металлов в породных отвалах угольных шахт. В качестве модельного выбран озелененный породный отвал ДНР ш. 5/6 им. Димитрова, находящийся в черте г. Донецка. В ходе исследования применялись обзорный, аналитический, натурный и экспериментальный методы. *Brassica napus* L. снизил концентрацию от 0,2 до 0,4 дПДК по кадмию, от 0,4 до 0,5 дПДК по меди, в 2 раза по никелю, в 2 раза по кобальту, на 0,1 дПДК по свинцу, от 0,6 до 2 дПДК по цинку, от 21,8 до 2,2 дПДК по железу. Теоретически его можно использовать для рекультивации шахтных породных отвалов Донбасса. Чтобы минимизировать недостатки *Brassica napus* L., следует правильно подбирать для него почву, учитывать севооборот и обязательно проводить мероприятия по восстановлению плодородия после его выращивания. При соблюдении этих условий рапс будет эффективным сидератом, обогащающим почву питательными веществами.

**Ключевые слова:** фитоиндикация; коэффициент биологического поглощения; *Brassica napus* L.; породный отвал

### Введение

В настоящее время в работах, посвященных проблемам загрязнения окружающей среды и экологического мониторинга, к группе тяжелых металлов (далее – ТМ) относят более 40 элементов периодической системы Д.И. Менделеева с массой более 50 атомных единиц [1-6]. При этом немаловажную роль в их распределении по категориям играют также показатели, как высокая токсичность для живых объектов, способность к биоаккумуляции и биомагнификации. По классификации к тяжелым следует относить металлы с плотностью более 8 г/см<sup>3</sup>. В то же время авторы отделяют от ТМ благородные и редкие металлы, соответственно, выделяя лишь Pb, Cu, Zn, Ni, Cd, Co, Fe, Mn.

Загрязнение почв металлами – серьезная проблема крупных городов. Поступление металлов в почвенный покров определяет их миграцию в грунтовые воды и доступность для растений. Изучение металлов в системе «почва-растение» позволяет оценить их накопление в растениях и отдельных органах, установить роль растений в самоочищающей способности урбоэкосистем.

Донбасс является антропогенно видоизмененным регионом, большая часть территорий которого представлена трансформированными типами почв – урбаноземами, техноземами, реплантоземами. Большие площади занимают также угольные отвалы горнодобывающих предприятий.

По данным Министерства угля и энергетики ДНР на территории Республики

насчитывается около 800 породных отвалов, часть из которых расположены на административных территориях городов Донецк (144), Макеевка (118), Шахтерск (69) и Торез (67). Техногенная нагрузка в Донбассе в 5-10 раз выше средней. Общая площадь техногенных объектов на территории некоторых городов области достигает 10% и более от их площади.

Озимый рапс (*Brassica napus* L.) является неприхотливой технической масличной культурой, которая является активным поглотителем веществ и микроэлементов из почвы и способна прорасти на почвах, загрязненных тяжелыми металлами, а также засоленных почвах [7-12]. Это растение относится к сидератам, то есть почвопокровным, быстро набирающим зеленую массу культурам, которые, будучи заделанными в грунт, способны заменить навоз, помет, другие удобрения.

Рапс имеет мощную и глубокую корневую систему, способную достигать 1,5-2 метров в глубину. Это позволяет ему извлекать питательные вещества и минералы из нижних слоев почвы, обогащая ими верхний плодородный слой. Кроме того, глубокие корни рапса улучшают аэрацию и дренаж почвы. Благодаря быстрому росту рапс создает густую растительную массу, которая подавляет сорняки и предохраняет почву от эрозии и пересыхания. Рапс также защищает почву от вредителей благодаря содержащимся в нем эфирным маслам. После заделки биомассы рапса в почву она обогащается органикой и азотом. Рапс является одним из лучших не бобовых источников азота для почвы. Это позволяет выращивать после него практически любые культуры, в том числе бобовые. -

К достоинствам этого растения можно отнести следующие:

- быстрый рост как наземной части – листовой массы, так и подземной – корневой;
- при закапывании в землю, листья быстро перегнивают, отдавая почве большое количество минеральных веществ, что повышает ее плодородие;
- корни способны рыхлить грунт, отпугивать вредных насекомых;
- сплошная масса зелени не дает пробиваться сорнякам;
- скошенное растение может служить питательной мульчей;
- рапс холодостоек, выдерживает весенние заморозки.

*Brassica napus* L. можно выращивать на самых разных хорошо дренированных почвах с pH в интервале 5,5-8,3 и обладает умеренной устойчивостью к их засоленности.

Теоретически существует возможность применения озимого рапса в качестве тест-культуры для фитоиндикации металлов в субстрате породных отвалов угольных шахт.

Целью исследования является исследование возможности использования *Brassica napus* L. (рапса озимого) для фитоиндикации металлов в породных отвалах угольных шахт.

### Объекты и методы исследования

В 2024 г. был произведен отбор 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 им. Димитрова, находящемся в черте г. Донецка (рис. 1).

Отвал на данный момент является плоским, потухшим, озелененным без имеющихся очагов горения. Возраст отвала – 57 лет с окончания эксплуатации. Температура в тени и под кронами деревьев составляет 20-22°C, на местах попадания солнечных лучей – до 30°C (замеры проводились в мае 2024 г.). 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. Данные о валовом содержании металлов в субстрате отвала приведены в таблице 1.

Таблица 1

Валовое содержание металлов в субстрате отвала ш. 5/6 им. Димитрова.

Название отвала	Cd	Cu	Ni	Co	Pb	Zn	Fe	Cr	K	Mg	Na	Mn
ш. 5/6 им. Димитрова	1,7	45,8	43,1	8,6	42,4	164,3	26030,1	19,0	3577,4	3882,6	542,6	388,2

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

Посадка семян *Brassica napus* L. на породном отвале ш. 5/6 им. 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 не наблюдалось.

Также был произведен посев семян *Brassica napus* L. в породу отвала ш. 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).

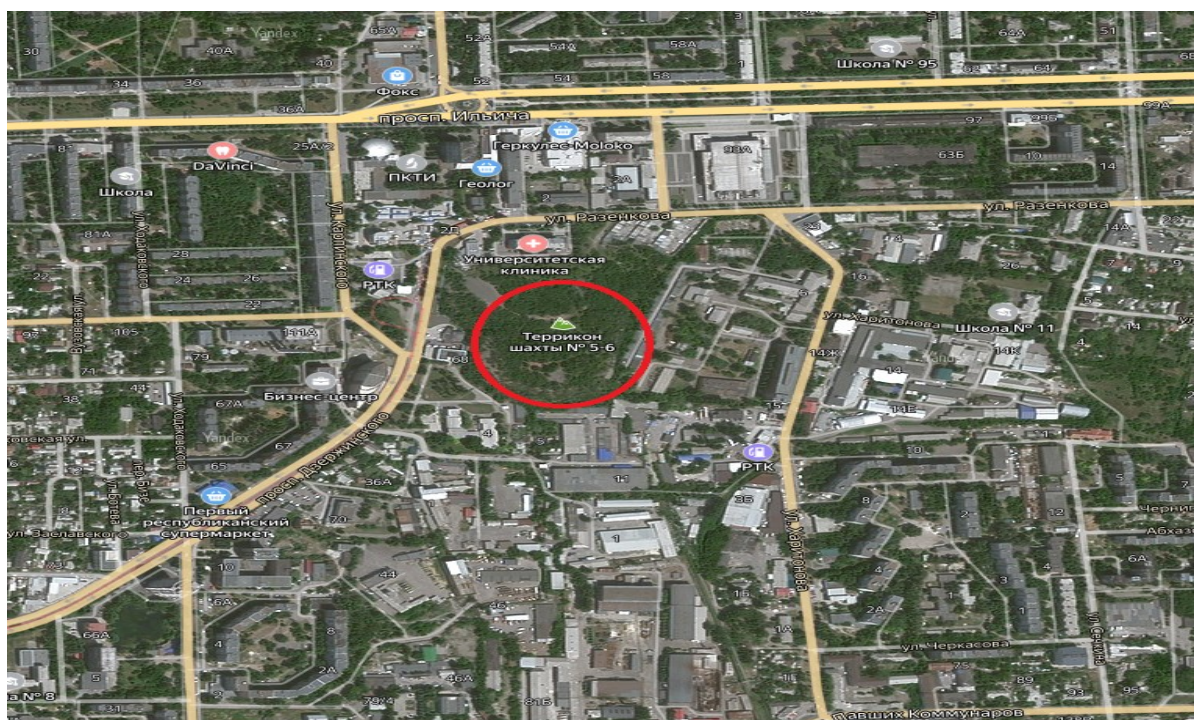


Рис. 1 Картосхема расположения объекта исследований

Был проведен лабораторный анализ проб субстрата и ростков *Brassica napus* L. пламенным атомно-абсорбционным методом на базе Государственного комитета по экологической политике и природным ресурсам при Главе ДНР. Важным показателем биогенной миграции является коэффициент биологического поглощения, предложенный Б.Б. Плыновым [13]. Он характеризует интенсивность поглощения элемента растением и рассчитывается как отношение содержания химического

элемента в золе растения к его содержанию в почве или в горной породе.

Коэффициент биологического поглощения растения (КБП) рассчитывается по формуле:

$$\text{КБП} = \frac{C_p}{C_n} \quad (1)$$

где  $C_p$  —соотношение содержания элемента в надземной части растения, мг/кг;

$C_n$  —валовое содержание элемента в почве, мг/кг.

Значения рассчитаны также в долях предельно- допустимых концентраций (дПДК) (показатель дПДК <1— превышения ПДК не наблюдается, дПДК>1—наблюдается превышение ПДК).

Анализ данных предыдущих экспериментов авторов и расчетов показал, что различные породные отвалы, отличающиеся химическим составом слагающих пород, местом расположения, сроком эксплуатации, размерами и другими параметрами оказали влияние на значения коэффициентов биологического поглощения изучаемых элементов для всех представленных видов древесных растений. Наблюдается тенденция повторяемости элементов, попавших в группу биологического поглощения, как и в группу биологического захвата. Лидирующими и наиболее легко усваиваемыми растениями являются К, Cd, Cu, Zn, Pb, Na. Наибольшие значения вышеперечисленных элементов зафиксированы в растительном материале *A. platanoides* и *J. regia*. Определенным фиторемедиационным потенциалом по отношению к кадмию, меди и свинцу в диапазоне его низких и средних концентраций в почве обладают *R. pseudoacacia* и *A. platanoides*, по отношению к цинку и никелю - *Q. robur* и *A. negundo* (контроль).

### Результаты и обсуждение

Результаты определения содержания валовых металлов в породе отвала, мг / кг породы до и после посадки *Brassica napus* L., представлены в таблицах 2-3.

**Таблица 2**  
Результаты расчетов валового содержания металлов, мг / кг, до посадки *Brassica napus* L.

Склон отвала	Cd	Cu	Ni	Co	Pb	Zn	Fe	Cr	K	Mg	Na	Mn
<b>Северный</b>	1,8 (3,6 д ПДК)	42,2 (0,7 д ПДК)	41,9 (10, 4д ПДК)	16,1 (3,2 д ПДК)	45,1 (1,5 д ПДК)	130,3 (5,6 д ПДК)	30273,1 (201,8 тыс. д ПДК)	15,5 (2,5 д ПДК)	4168,5 (ПДК не уст.)	2670,6 (267,0 тыс. д ПДК)	772,9 (ПДК не уст.)	277,4 (0,3 д ПДК)
<b>Южный</b>	1,6 (3,2 д ПДК)	49,3 (0,89 д ПДК)	44,3 (11,07 д ПДК)	17,0 (3,4 д ПДК)	39,7 (1,3 д ПДК)	198,1 (8,6 д ПДК)	27511,0 (183,4 тыс. д ПДК)	22,4 (3,7 д ПДК)	2986,2 (ПДК не уст.)	5094,5 (509,4 тыс. д ПДК)	312,3 (ПДК не уст.)	498,8 (0,7 д ПДК)

**Таблица 3**  
Результаты расчетов валового содержания металлов мг / кг, после посадки *Brassica napus* L.

Склон отвала	Cd	Cu	Ni	Co	Pb	Zn	Fe	Cr	K	Mg	Na	Mn
<b>Северный</b>	1,7 (3,4 д ПДК)	18,5 (0,3 д ПДК)	23,8 (5,9 д ПДК)	9,3 (1,8 д ПДК)	43,8 (1,4 д ПДК)	111,7 (4,8 д ПДК)	16464,0 (109,7 тыс. д ПДК)	31,5 (5,2 д ПДК)	3457,4 (ПДК не уст.)	1895,3 (189,5 тыс. дПДК)	537,0 (ПДК не уст.)	422,0 (0,6 д ПДК)
<b>Южный</b>	1,5 (2,8 д ПДК)	19,0 (0,3 д ПДК)	20,1 (5,02 д ПДК)	8,1 (1,6 д ПДК)	37,4 (1,2 д ПДК)	153,9 (6,6 д ПДК)	12499,2 (83,3 тыс. д ПДК)	32,2 (5,3 д ПДК)	2018,2 (ПДК не уст.)	4297,5 (429,7 тыс. дПДК)	235,8 (ПДК не уст.)	716,6 (1,02 д ПДК)

Также аналогично был проведен лабораторный анализ надземной части *Brassica napus* L.

Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Соответственно, ряды биологического поглощения элементов *Brassica napus* L. будут иметь вид:

Северный склон: K, Mn, Cd, Na, Cr, Mg, Pb, Zn, Cu, Co, Ni, Fe

Южный склон: Cd, K, Na, Mg, Pb, Cr, Mn, Zn, Fe, Co, Ni, Cu

Таблица 4

Результаты расчетов КБП для *Brassica napus* L.

Склон отвала	Cd	Cu	Ni	Co	Pb	Zn	Fe	Cr	K	Mg	Na	Mn
Северный	1,02	0,34	0,32	0,33	0,80	0,71	0,28	0,98	1,12	0,98	1,0	1,07
Южный	1,10	0,23	0,31	0,31	0,90	0,47	0,31	0,68	1,05	0,92	0,95	0,59

*Brassica napus* L. снизил концентрацию от 0,2 до 0,4 дПДК по кадмию, от 0,4 до 0,5 дПДК по меди, в 2 раза по никелю, в 2 раза по кобальту, на 0,1 дПДК по свинцу, от 0,6 до 2 дПДК по цинку, от 2,1 до 2,2 дПДК по железу.

### Выводы

*Brassica napus* L. является эффективным фитоиндикатором и поглотителем токсикантов из почвы, в том числе и из субстратов антропогенно трансформированных ландшафтов. Приоритетными элементами, хорошо выделяющимися из почвы, являются никель, кобальт, цинк, железо, калий, натрий и магний.

Анализ эмпирических рядов накопления показал, что интенсивнее накапливаются кадмий и цинк, чем медь и свинец. Согласно ГОСТ 17.4.1.02- 83 кадмий, свинец также и цинк относятся к химическим веществам первого класса опасности, поэтому нуждаются в пристальном контроле за содержанием в элементах экосистем.

Проведенное исследование растительных образцов подтвердило высокие кумулятивные особенности *Brassica napus* L. по отношению к ряду исследованных металлов. На основе результатов можно предложить использовать *Brassica napus* L. в качестве чувствительного биоиндикатора по отношению к металлам, что делает растения важным объектом экологического мониторинга в совокупности с исследованиями водных сред, почв и воздуха. Применение растений в качестве чутких биоиндикаторов может оказать большую помощь в мониторинге окружающей среды, так как возможна визуальная оценка загрязнений, предполагающая зонирование по видовому составу, внешнему виду, с применением индикационных индексов, а также химический анализ на содержание различных веществ (в частности металлов).

Кроме использования *Brassica napus* L. в качестве биоиндикатора в экологическом мониторинге следует подчеркнуть возможность их перспективного применения в процессе разведки недр на различные рудопроявления.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ Донецкий ботанический сад по теме «Классификация почвенно-растительного покрова с помощью методов дистанционного зондирования Земли» (Регистрационный № 124101500495-0).

### Список литературы

1. Ветчинникова Л.В., Кузнецова Т.Ю., Титов А.Ф. Особенности накопления тяжелых металлов в листьях древесных растений на урбанизированных территориях в условиях Севера // Труды Карельского научного центра РАН. – 2013. – № 3. – С. 68-73.
2. Зыбалов В.С., Сергеев Н.С., Запезалов М.В. Рациональное использование рапса в сельскохозяйственном производстве // АПК России. – 2019. – Т. 26. – № 2. – С. 544-564.
3. Коротченко И.С., Мучкина Е.Я. Тяжелые металлы в почвенном покрове и древесных растениях урбанизированной территории города Красноярска // Экология урбанизированных территорий. – 2017. – № 2. – С. 6-11.
4. 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.
5. Масленников П.В., Дедков В.П., Куркина и др. Аккумуляция металлов в растениях урбоэкосистем // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. – 2015. – № 7. – С. 57-69.
6. Польшов Б.Б. Избранные труды. – М.: Изд-во Академии наук. – 1956. – 751 с.
7. Хасанова Р.Ф., Семенова И.Н., Суюндуков Я.Т., Рафикова Ю.С. Аккумуляция тяжелых металлов в листьях и коре древесных растений в условиях полиметаллического загрязнения // Естественные и технические науки. – 2017. – № 12 (114). – С. 90-93.
8. Шихова Н.С. Оценка функционального состояния зеленых насаждений и аккумуляции ими тяжелых металлов на городских озелененных территориях различного назначения // Сибирский экологический журнал. – 2019. – Т. 26. – № 5. – С. 612-626.
9. 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.
10. Cowan N., Blair D., Malcolm H., Graham M. A Survey of heavy metal contents of rural and urban roadside dusts: comparisons at low, medium and high traffic sites in Central Scotland // Environmental Science and Pollution. – 2021. – Vol. 28. – P. 7365-7378.
11. Iveta Zentková, Eva Cvengrošová. The utilization of rapeseed for biofuels production in the EU // Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development, Versita, 1. – 2013. – P. 11-14.
12. Jifeng Zhu, Xirong Zhou, Jianxia Jiang, Junying Zhang, Yanli Li, Liyong Yang, Weirong Wang, Meiyan Jiang. Tibet The Seed Germination Characteristics Under Low Temperature and Spring Sowing Study of 8 Rapeseed Varieties // Molecular Plant Breeding. – 2021. – Vol. 12. – No.16. – 7 p.
13. 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.
14. Sahu C., Basti S. Trace metal pollution in the environment: a review // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2021. – Vol. 18. – P. 211-224.

Статья поступила в редакцию 27.03.2025 г.

**Dostovalova D.A., Glukhov A.Z., Podgorodetsky N.S. Phytoindication of metals in coal mine rock dumps** // Bull. of the State Nikita Botan. Gard. – 2025. № 155 - P. 51-57

The paper investigates the possibilities of using *Brassica napus* L. (winter rape) for phytoindication of metals in rock dumps of coal mines. The green rock dump (tunnels 5/6) named after Dimitrov of the DPR was chosen as a model, located within the city of Donetsk. In the course of the study, review, analytical, field and experimental methods were used. *Brassica napus* L. reduced the concentration from 0.2 to 0.4 MAC for cadmium, from 0.4 to 0.5 MAC for copper, by 2 times for nickel, by 2 times for cobalt, by 0.1 MAC for lead, from 0.6 to 2 MAC for zinc, from 21.8 to 2.2 MAC for iron. Theoretically, it can be used for the reclamation of mining rock dumps in Donbass. To minimize the disadvantages of *Brassica napus* L., it is necessary to choose the right soil for it, take into account crop rotation and be sure to take measures to restore fertility after its cultivation. If these conditions are met, rapeseed will be an effective siderate that enriches the soil with nutrients.

**Key words:** *phytoindication; biological absorption coefficient; Brassica napus* L.; *rock dump*