

© С.А. Красовський¹, О.С. Ковров¹, І.І. Клімкіна¹, О. Віхе², Г. Хальмаєр²

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

² Технічний університет «Фрайберзька гірничо академія», Фрайберг, Німеччина

ВПЛИВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ НА РОСТОВІ ПОКАЗНИКИ WALL BARLEY (*HORDEUM MURINUM*) ТА JAPANESE BROME (*BROMUS JAPONICUS*)

© S. Krasovskyi¹, O. Kovrov¹, I. Klimkina¹, O. Wiche², H. Heilmeyer²

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² Technische Universität Bergakademie Freiberg, Germany

THE INFLUENCE OF HEAVY METALS UPON THE GROWTH ON WALL BARLEY (*HORDEUM MURINUM*) AND JAPANESE BROME (*BROMUS JAPONICUS*)

Мета: Визначити вплив важких металів на біометричні показники Wall barley (*Hordeum murinum*) та Japanese brome (*Bromus japonicus*) з подальшою можливістю використання досліджуваних рослин у якості фіторемедіаторів відвалів відходів вуглевидобування.

Методика дослідження полягає у визначенні впливу солей важких металів (Pb, As, Co, Cu, Mn та Zn) із різними концентраціями на ростові показники рослин *H.murinum* та *B.japonicus*. Розрахована міграційна здатність солей важких металів у системі субстрат - розчин фільтрату - рослина. Досліджено акумулятивні властивості та транслокаційний фактор для досліджуваних рослин. Для детальної оцінки концентрацій важких металів у пробах та детального мікроелементного аналізу застосовано метод мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ІЗП-МС).

Результати дослідження: Встановлено, що досліджувані рослини, *H.murinum* та *B.japonicus* мають адаптивну стійкість до важких металів, обидві рослини здатні до накопичення важких металів у кореневій системі та пагонах, і накопичують дані елементи, що дає змогу розглядати дані рослини у якості «рослин піонерів» з подальшою можливістю фіторемедіації відвалів відходів вуглевидобування.

Наукова новизна: Встановлено акумулятивні властивості *H.murinum* та *B.japonicus*, щодо важких металів, які є основним компонентом відвалів відходів вуглевидобування Західного Донбасу. Проаналізована міграційна здатність солей важких металів у системі субстрат – розчин фільтрату – рослина, що дає змогу створити модель міграції хімічних елементів вугільного відвалу при різних абіотичних та біотичних факторах навколишнього середовища. Визначено ростові показники та транслокаційний фактор *H.murinum* та *B.japonicus*, результати дослідження дають змогу у майбутньому використовувати ці рослини для початкового етапу біологічної рекультиваци відвалів.

Практичне значення: Результати дослідження дають змогу розробити ефективний метод біологічного етапу рекультиваци відвалу, шляхом застосування фіторемедіації, за рахунок створення рослинного покриву досліджуваними рослинами *H.murinum* та *B.japonicus*.

Ключові слова: відвал вуглевидобування, важкі метали, «рослини піонери», міграція важких металів, фіторемедіація, транслокаційний фактор, метод мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ІЗП-МС).

Вступ. Вугільна промисловість займає одну із провідних ролей в економічному та енергетичному секторах в країнах що розвиваються. При активному вугільному комплексі, разом із вугіллям на поверхню дістається пуста гірська порода, яка у подальшому накопичується на спеціально відведених територіях – відвалах. Відвали та шламонакопичувачі містять близько 1,3 млрд. т. порід із щорічним поповненням близько 60 млн. т [1]. Вугільні відвали мають негативний вплив на навколишнє середовище: на літосферу – шляхом виведення із експлуатації великої кількості території, які відведенні для накопичення гірської породи, гідросфери – потраплянням важких металів із стоками у поверхневі та підземні води, атмосферу – шляхом викидів пилу, та під час горіння вугільного відвалу.

Відповідно до попередніх досліджень відвали вуглевидобування в більшості містять такі важкі метали, як: Pb, As, Co, Cu, Mn та Zn [2]. Одним із варіантів для вирішення даної проблеми є біологічна рекультивація відвалу, шляхом фітореMediaції. Важливим етапом є перші засадження «рослин піонерів», що в подальшому дає змогу створити сприятливі біологічні умови, для використання рослин вищого класу.

Актуальність досліджень. Забруднення літосфери, гідросфери та атмосфери поблизу території вугільного відвалу, пов'язане з рухомістю та розчинністю важких металів, які містяться у гірській породі, що в подальшому завдає шкоди навколишньому середовищу, здоров'ю людей, рослинам і тваринам. Одним із поширених методів вирішення цієї проблеми є застосування рослин для стабілізації/екстракції важких металів. Зазвичай, це є використання екзотичних видів, які є не типовими для даного кліматичного регіону. В даній роботі було розглянуто можливість використання рослин *H.murinum* та *V.japonicus*, які є типовими рудеральними рослинами для досліджуваного кліматичного регіону, у якості фітореMediaційних рослин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ФітореMediaція вугільних відвалів вимагає використання не вибагливих рослин, які є типовими для даного регіону [3]. Метою фітореMediaції є зменшення екологічного впливу хімічних речовин, які містяться у гірській породі, шляхом знеруковування/екстракції за допомогою кореневої системи [4]. Коренева система змінює фізичні, хімічні та біологічні властивості субстрату, збагачуючи його органічними речовинами рослинного або мікробного походження, включаючи органічні кислоти, цукри, амінокислоти, ліпіди, кумарини, ферменти та вуглеводи [4]. Першочергове завдання методу фітореMediaції є створення рослинного покриву, за рахунок не вибагливих, до фізико-хімічних показників субстрату, рослин [5]. Тому підбір відповідних видів рослин, які можуть рости на забруднених важкими металами субстратів, із низькою концентрацією поживних речовин має важливе значення для фітореMediaції деградованих земель.

Успішне застосування «рослин піонерів» на вугільному відвалі, який мав великий вміст Pb та Zn, було зафіксовано за допомогою рослин *Paspalum distichum* та *Cynodon dactylon* [6]. Високу толерантну здатність рослин *Typha angustifolia*, *Miscanthus sinensis*, *Pennisetum purpureum* та *Sorghum sudanense* до

важких металів було зафіксовано під час дослідів що проходив на відвалі вугле-видобування в Граміні, Китай [7]. *Leucaena leucopcephala* зарекомендувала себе, як стійкою рослиною, яка не вибаглива до фізико-хімічних показників субстрату [8]. Яскравим застосуванням «рослин піонерів», які є типовими для свого регіону показують вчені із Австралії, які за допомогою рослин, які ростуть тільки на тій чи іншій території, створюють першочерговий рослинний покрив [9]. У попередніх дослідженнях було зафіксовано високу колонізаційну здатність рослини *Maireana brevifolia* до проростання на територіях, що вмістять велику концентрацію залізної руди [10]. Після пророщення *Potentilla saundesiana*, на вугільному відвалі, збільшилася концентрація поживних речовин у субстраті, таких як N, P та K [11]. Високу родючість на підкислених та засолених ґрунтах показала *Vetiver zizanioides* [12]. Толерантність до великої концентрації Pb та Zn було зафіксовано в рослині *Setaria viridis* [13].

Формулювання цілей статті: Мета статті полягає у визначенні впливу солей важких металів (Pb, As, Co, Cu, Mn та Zn) із різними концентраціями на ростові показники рослин *H. murinum* та *B. japonicus*, з подальшою можливістю використання цих рослин для біологічної рекультивациі вугільного відвалу.

Матеріали та методи. Wall barley (*Hordeum murinum*) and Japanese brome (*Bromus japonicus*) використовувались як рослини фітоіндикатори, які є типовими рудеральними рослинами, для степового регіону Західного Донбасу. Для експерименту було використано 30 контейнерів для розсади (розмір кожного: висота 10 см, діаметр 9 см), які були заповнені 0,4 кг стерильного піску. Контейнери були розподілені порівну: в 15 з них проростали насіння *H. murinum* в інших 15 *B. japonicus*. В кожен контейнер було висаджено 30 насінини кожного виду рослин, які попередньо були змочені. Ростивий експеримент проходив в спеціальній камері, де підтримувались наступні умови: (20°C, 600 $\mu\text{M}/\text{m}^2$ s PAR) в повністю випадковому порядку. Контейнери щодня змінювали своє місцезнаходження. Перший тиждень рослини поливали розчином Хогланда [14], (по 10 мл щодня), для надання поживних речовин рослинам. Після першого тижня експерименту, рослини були поділені на три ряди з п'ятьма повторностями. Перший ряд де проростали насіння *H. murinum* та *B. japonicus* наступні два тижні поливали дистильованою водою. Другий ряд поливали концентрацією солей важких металів, яка була на рівні 1 ГДК відповідно до загальносанітарних норм [15]. Третій ряд поливали концентрацією солей важких металів, яка була на рівні 10 ГДК. Рівень вологості у субстраті підтримували на рівні 70% під час всього експерименту.

Для створення розчину з солями важких металів, були використанні наступні солі: $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, As_2S_3 , $\text{CoCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, ZnCl_2 . Була розрахована молярна маса кожної солі, що в подальшому дало змогу розрахувати необхідну кількість важкого металу, для отримання його концентрації на рівні 1 та 10 ГДК, на один літер дистильованої води. Рослини поливали даним розчином протягом наступних 14 днів, щодня по 10 мл.

Розчин фільтрату отримували в кінці кожного тижня, шляхом накопичення його в спеціальних водоуловлювачів, які знаходилися під кожним досліджуванним контейнером.

Після закінчення ростового експерименту рослини були відокремлені від субстрату, та розділені між собою (коренева система від пагонів) і обережно промиті в дистильованій воді. Після цього вони були зважені та висушені при температурі 60°C протягом 48 годин.

Для визначення загальної кількості важких металів у субстраті, фільтраті та в рослинах був використаний метод мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ІЗП-МС). Для визначення загальної концентрації важких металів у субстраті, зразки були зібрані та висушені при температурі 105°C протягом доби. Після чого зразки були подрібнені до порошкового стану, завдяки ахатній ступки та товпчачка. Для аналізу субстрату було відібрано по 0,1 г з кожної проби в Тефлонові ємності із додаванням 200 μL дистильованої води, 300 μL нітратної кислоти (65%), 900 μL хлоридної кислоти (36%) та 600 μL фосфатної кислоти (4,9%). Тефлонові ємності були поміщені у мікрохвильову робочу станцію ETHOS.lab (MLS). Зразки нагрівали до 200°C зі швидкістю 10°C·min⁻¹. Після цього зразки були вилучені, коли система досягла кімнатної температури.

Для визначення загальної концентрації важких металів у рослинних зразках, рослини були відокремлені (коренева система від пагонів), висушені при температурі 60°C протягом 48 годин. Для аналізу рослин було відібрано 0,1 г кожного зразку в Тефлонові ємності із додаванням 200 μL дистильованої води, 1900 μL нітратної кислоти (65%) та 600 μL фосфатної кислоти (4,9%). Тефлонові ємності були поміщені у мікрохвильову робочу станцію ETHOS.lab (MLS). Зразки нагрівали до 200°C зі швидкістю 10°C·min⁻¹. Після цього зразки були вилучені, коли система досягла кімнатної температури.

Концентрацію важких металів визначали за допомогою методу мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ІЗП-МС) з додаванням 10 $\mu\text{g/L}$ родію та ренію у якості міжнародних стандартів.

Результати досліджень. Метод мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ІЗП-МС) показав концентрацію досліджуваних важких металів у субстраті та в фільтраті де проростали *H.murinum* та *V.japonicus*, які представлені в табл.1-2.

Таблиця 1

Концентрація важких металів у субстраті та фільтраті з *H.murinum*

	Концентрація важких металів у субстраті з <i>H.murinum</i> , мг/кг						Концентрація важких металів у фільтраті з <i>H.murinum</i> , мг/л					
	Co	As	Cu	Pb	Mn	Zn	Co	As	Cu	Pb	Mn	Zn
C ₁ , (мг/кг, мг/л)	1,2 ±0,1	1,6 ±0,1	2,3 ±0,1	4,6 ±0,1	102,7 ±0,1	0	0,002 ±0,001	0,001 ±0,01	0,001 ±0,001	0	0,009 ±0,001	0,001 ±0,001
C ₂ , (мг/кг, мг/л)	2,3 ±0,1	1 ±0,1	3,8 ±0,1	8,5 ±0,1	128,3 ±0,1	0	0,03 ±0,01	0	0,005 ±0,001	0,003 ±0,001	1,9 ±0,1	0,002 ±0,001
C ₃ , (мг/кг, мг/л)	1,8 ±0,1	2,7 ±0,1	3,8 ±0,1	7,2 ±0,1	228,1 ±0,1	5,1 ±0,1	0,06 ±0,01	0	0,001 ±0,001	0	21,4 ±0,1	0,11 ±0,001

C₁ – концентрація, з досліджуваного об'єкту, що поливався дистильованою водою;
C₂ – концентрація, з досліджуваного об'єкту, що поливався розчином з концентрацією 1 ГДК;
C₃ – концентрація, з досліджуваного об'єкту, що поливався розчином з концентрацією 10 ГДК.

Таблиця 2

Концентрація важких металів у субстраті та фільтраті з *V.japonicus*

	Концентрація важких металів у субстраті з <i>V.japonicus</i> , мг/кг						Концентрація важких металів у фільтраті з <i>V.japonicus</i> , мг/л					
	Co	As	Cu	Pb	Mn	Zn	Co	As	Cu	Pb	Mn	Zn
C ₁ ,(мг/кг,мг/л)	1,1 ±0,1	4,7 ±0,1	2,2 ±0,1	3,3 ±0,1	42,5 ±0,1	0	0,001 ±0,0001	0	0	0	0,02 ±0,001	0,002 ±0,001
C ₂ ,(мг/кг,мг/л)	2 ±0,1	1,7 ±0,1	3,6 ±0,1	7,8 ±0,1	77,8 ±0,1	0	1,3 ±0,01	0	0,002 ±0,001	0,001 ±0,001	1,3 ±0,1	0,002 ±0,001
C ₃ ,(мг/кг,мг/л)	1,4 ±0,1	8,3 ±0,1	5,3 ±0,1	13,4 ±0,1	117,5 ±0,1	25,2 ±0,1	16,7 ±0,01	0	0,003 ±0,001	0,002 ±0,001	16,7 ±0,1	0,2 ±0,01

C₁ – концентрація, з досліджуваного об’єкту, що поливався дистильованою водою; C₂ – концентрація, з досліджуваного об’єкту, що поливався розчином з концентрацією 1 ГДК; C₃ – концентрація, з досліджуваного об’єкту, що поливався розчином з концентрацією 10 ГДК.

Згідно отриманих результатів, можна зробити висновок, що при додаванні важких металів більшість з них залишилась у субстраті, що дає змогу у подальшому робити акцент на рослинах, які стабілізують або екстрагують важкі метали. Дослід показав, що важкі метали не вимиваються разом із водою, таким чином зменшують екологічні ризики на потрапляння забруднених речовин до поверхневих та підземних вод. Найбільшу концентрацію у фільтраті мав Mn, всі інші елементи знаходились у межах ГДК. Щодо накопичення важких металів у субстраті, то була зафіксована така послідовність: Co<Cu<As<Pb<Zn<Mn.

Одним із важливих показників для підбору «рослин піонерів» є їх вегетативні властивості на субстратах, які мають низьку концентрацію поживних речовин. В табл.3 представлені результати ростових показників та біомаси рослин *H.murinum* та *V.japonicus*.

Таблиця 3

Загальна біомаса та росткові показники рослин, вирощених при поливі досліджуваних рослин дистильованою водою та концентраціями розчинів важких металів з 1 та 10 ГДК

	Коренева система, <i>H.murinum</i> : $\frac{\text{г}}{\text{см}}$	Надземна частина, <i>H.murinum</i> $\frac{\text{г}}{\text{см}}$	Коренева система, <i>V.japonicus</i> $\frac{\text{г}}{\text{см}}$	Надземна частина <i>V.japonicus</i> $\frac{\text{г}}{\text{см}}$
C ₁	$\frac{0,8}{15}$	$\frac{1,2}{15}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{2,2}{8}$
C ₂	$\frac{0,7}{4}$	$\frac{0,9}{12}$	$\frac{1,2}{5}$	$\frac{1,3}{9}$
C ₃	$\frac{0,7}{13}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{0,5}{5}$	$\frac{1,4}{9}$

C₁ – рослини, з досліджуваного об’єкту, що поливався дистильованою водою; C₂ – рослини, з досліджуваного об’єкту, що поливався розчином з концентрацією 1 ГДК; C₃ – рослини, з досліджуваного об’єкту, що поливався розчином з концентрацією 10 ГДК.

Проаналізувавши ростові показники досліджуваних рослин, можна зробити висновки, що дані рослини є толерантними до важких металів. Довжина пагонів/кореневої системи та їх біомаса свідчать про те, що різна концентрація важких металів не пригнічує вегетаційні процеси рослин.

Для загального розуміння міграції важких металів у системі «субстрат-фільтрат-рослини» було проаналізовано можливість накопичення важких металів у кореневій системі та пагонах досліджуваних рослин. Отримані результати представлені в табл.4.

Таблиця 4

Концентрація важких металів в кореневій системі та пагонах *H.murinum* та *V.japonicus*

Елемент	С, концентрація в пагонах <i>H.murinum</i> мг/кг			С, концентрація в пагонах <i>V.japonicus</i> мг/кг		
	С, концентрація в кореневій системі <i>H.murinum</i> мг/кг			С, концентрація в кореневій системі <i>V.japonicus</i> мг/кг		
	С ₁	С ₂	С ₃	С ₁	С ₂	С ₃
Co	4,7±0,1	39,3±0,1	23,7±0,1	2,1±0,1	76,1±0,1	77,5±0,1
	12,6±0,1	22,6±0,1	23,9±0,1	3,7±0,1	3,2±0,1	45,6±0,1
As	2,2±0,1	1,6±0,1	0,6±0,1	0,6±0,1	0,8±0,1	1,6±0,1
	2,1±0,1	3,2±0,1	2,5±0,1	1±0,1	0,3±0,1	2,3±0,1
Cu	11,7±0,1	26,5±0,1	20,9±0,1	8,7±0,1	43,2±0,1	37±0,1
	6,4±0,1	22±0,1	40,7±0,1	7,1±0,1	4,5±0,1	25,4±0,1
Pb	2,7±0,1	37±0,1	20,2±0,1	1,4±0,1	110,8±0,1	49,3±0,1
	5,4±0,1	36,7±0,1	37,7±0,1	2,8±0,1	6,5±0,1	7,1±0,1
Mn	414±0,1	1695,4±0,1	4736,7±0,1	208,3±0,1	3182±0,1	15374,7±0,1
	554,1±0,1	483,6±0,1	819±0,1	306,7±0,1	98,1±0,1	4501,7±0,1
Zn	46,4±0,1	66,4±0,1	124,2±0,1	64,7±0,1	130,5±0,1	383,8±0,1
	58,2±0,1	60,8±0,1	121±0,1	63,8±0,1	0,001±0,00001	253±0,1

С₁ – рослини, з досліджуваного об'єкту, що поливався дистильованою водою; С₂ – рослини, з досліджуваного об'єкту, що поливався розчином з концентрацією 1 ГДК; С₃ – рослини, з досліджуваного об'єкту, що поливався розчином з концентрацією 10 ГДК.

Отримані дані свідчать про те що *V.japonicus* має більш акумулюючи властивості ніж *H.murinum*. Під час дослідження концентрація важких металів в кореневій системі *V.japonicus* була зафіксована в діапазоні 0 - 4501,7 мг/кг, коли в той самий час коренева система *H.murinum* мала концентрацію в діапазоні 2,1 - 819 мг/кг. Концентрація в пагонах *V.japonicus* була на рівні 0,6 – 15374,7 мг/кг, коли пагони *H.murinum* накопичували 0,6 – 4736,7 мг/кг. Накопичувана здатність важких металів обидві рослини проявили у наступній послідовності: As<Cu<Pb<Co<Zn<Mn. В свою чергу це дає можливість для порівняння з концентрацією в субстраті, яка була зафіксована в наступній послідовності: Co<Cu<As<Pb<Zn<Mn, тобто кількість елементів, яка стримувалася в субстраті при додаванні важкими металами, відповідає накопиченню цих елементів в ростових системах рослин.

Транслокаційний фактор був розрахований у співвідношенні концентрацій важких металів в пагонах до концентрацій в кореневій системі рослин *H.murinum* та *B.japonicus* за формулою:

$$TF = \frac{C_{\text{П}}}{C_{\text{К}}},$$

де: $C_{\text{П}}$ – концентрація важких металів в пагонах; $C_{\text{К}}$ – концентрація важких металів в кореневій системі.

Отримані результати представлені в табл.5

Таблиця 5

Транслокаційний фактор (ТФ) для *H.murinum* та *B.japonicus*

Елемент	ТФ для <i>H.murinum</i>			ТФ для <i>B.japonicus</i>		
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁	C ₂	C ₃
Co	0,4	1,7	0,9	0,6	23,8	1,7
As	1,4	0,5	0,2	1	2,7	0,7
Cu	1,8	1,2	0,5	1,2	9,6	1,5
Pb	0,5	1	0,5	0,5	17	6,9
Mn	0,8	3,5	5,8	0,7	32,4	3,4
Zn	0,8	1,1	1	1	130500	1,5

C₁-рослини, з досліджуваного об'єкту, що поливався дистильованою водою; C₂- рослини, з досліджуваного об'єкту, що поливався розчином з концентрацією 1 ГДК; C₃- рослини, з досліджуваного об'єкту, що поливався розчином з концентрацією 10 ГДК.

B.japonicus показав більш акумулюючі властивості ніж *H.murinum*. Даний вид рослин виявився стійким для всіх важких металів, що дає в свою чергу розглядати його не тільки як «рослину піонера», а також як фітоекстрактора.

Висновок. Під час експерименту було проаналізовано можливість використання *H.murinum* та *B.japonicus* як «рослин піонерів» для подальшої фітореMediaції вугільних відвалів. Досліджуванні рослини показали чудові ростові показники, після додавання різних концентрацій важких металів, таких як: Pb, As, Co, Cu, Mn та Zn. Дані рослини показали здатність накопичувати ці елементи як в кореневій системі так і пагонах. Транслокаційний фактор показав можливість в подальшому використанні цих рослин для створення рослинного покриву на вугільному відвалі, а також розглядати варіант *B.japonicus* як фітоекстрактора. Майбутні дослідження будуть проводитись у секторі застосування досліджуваних рослин одночасно, для аналізу ефективності змішування культур, а також із застосуванням рослин вищих класів, для підвищення біологічного фактору на відвалі відходів вуглевидобування.

Подяка/ Acknowledge: Представлені результати було виконано в рамках проекту DAAD «EcoMining: розробка інтегрованої програми аспірантів для сталої гірничодобувної та екологічної діяльності» та співпраці між Технічним уні-

верситетом «Фрайберзька Гірнична Академія», Фрайберг Німеччина, та Національним технічним університетом «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна (2019-2022).

Presented research was supported in the frame of the DAAD project “EcoMining: Development of Integrated PhD Program for Sustainable Mining & Environmental Activities ” and cooperation between Technische Universität Bergakademie Freiberg, Germany, and Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine (2019-2022).

Перелік посилань

1. *Видобуток і збагачення вугілля* (n.d.) ДТЕК https://energo.dtek.com/business/coal_industry/
2. Красовський, С.А, Ковров, О.С, & Клімкіна, І.І. (2021). Фіторе mediaція вугільних відвалів Західного Донбасу. *Збірник наукових праць НГУ*, 65, 170-178. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.170>
3. Mendez M.O, Maier R.M.(2008). Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments. *Environmental Science Biotechnology*, 7, 47–59. <https://doi.org/10.1007/s11157-007-9125-4>
4. Bolan N.S, Park J.H, Robinson B, Naidu R, Huh K.Y. (2011) Phytostabilization: a green approach to contaminant containment. In Donald LS, editor: *Advances in agronomy*, vol. 112. Academic Press. pp 145–204. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385538-1.00004-4>
5. Gonzalez M.T, Lopez V.A, Fernandez A.P, Garrido B.R, Cepeda C.T, Mench M, Puschenreiter M, Sabaris C.Q, Garcia F.M, Kidd P.S.(2017). Aided phytostabilisation reduces metal toxicity, improves soil fertility and enhances microbial activity in Cu-rich mine tailings. *Journal of Environmental Management*, 186(2):301–313. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.019>
6. Shu W.S, Xia H.P, Zhang Z.Q, Lan C.Y, Wong M.H. (2006). Use of vetiver and three other grasses for revegetation of Pb/Zn mine tailings: field experiment. *International Journal of Phytoremediation*, 4(1): 47–57. <https://doi.org/10.1080/15226510208500072>
7. Yang., X., & Gao. L. (2001). A study on re-vegetation in mining wasteland of dexing copper mine, China. *Journal of environmental Management*, 21(11), 1932–1940.
8. Zhang, Z.Q., Shu, W.S., Lan, C.Y., & Wong, M.H. (2001). Soil seed bank as an input of seed source in revegetation of lead/zinc mine tailings. *Restoration Ecology*, 9, 378–385. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2001.94007.x>
9. Markey, A.S., & Dillon, D.J. (2008). Flora and vegetation of the banded iron formations of the Yilgarn Craton: central Talling land system. *Conservation Science Western Australia*, 7, 121–149.
10. Wu, S., Liu, Y., Southam, G., Robertson, L., Chiu, T.H., & Cross, A.T.(2019). Geochemical and mineralogical constraints in iron ore tailings limit soil formation for direct phytostabilization. *Geochemical and mineralogical constraints in iron ore tailings limit soil formation for direct phytostabilization. Science of The Total Environment*, 651, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.171>
11. Wang, Y.B., Zhang, L., Zhang, F.M., Zhang, Y.X., & Liu, D.Y. (2006). Distribution of heavy metals forms and its affecting factors in rhizosphere soils of *Hippochaete ramosissimum* in large-scale copper tailings yard. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(1), 76-84.
12. Wong, H.M (2003). Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, 50(6), 775-780. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00232-1](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00232-1)

13. Shu, W.S., Xia, H.P., Zhang, Z.Q., Lan, C.Y., & Wong, M.H. (2002), Use of vetiver and three other grasses for revegetation of Pb/Zn mine tailings: field experiment. *International Journal of Phytoremediation*, 4(1), 47-57.
<https://doi.org/10.1080/15226510208500072>
14. Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. *Circular. California agricultural experiment station*.
15. *Наказ №1595 Про затвердження «Гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті»*. (2020). Міністерство охорони здоров'я України.

ABSTRACT

Purpose. To determine the influence of heavy metals upon the growth on Wall barley (*Hordeum murinum*) and Japanese brome (*Bromus japonicus*) with the possibility of using the plants for phytoremediation of coal waste dumps.

Methodology. The research methodology consist to determine the effect of salts of heavy metals such as (Pb, As, Co, Cu, Mn and Zn) with different concentrations, on the growth rates of plants *H.murinum* and *B.japonicus*. The migration capacity of heavy metal salts in the substrate - filtrate - plant system was calculated. The accumulation of heavy metals in shoots and roots and translocation factor for the studied plants were observed. Element concentrations in substrate, leachate solutions and plant biomass were analyzed by ICP-MS.

Findings. It was found that *H.murinum* and *B.japonicus* were tolerant to heavy metals, both plants were able to accumulate heavy metals in roots and shoots, and accumulate these elements, which allows to consider these plants as "pioneer plants" with the subsequent possibility of phytoremediation of coal waste dumps.

Originality. The accumulative properties of *H.murinum* and *B.japonicus* for heavy metals, which are the main component of the waste dumps of coal mining in the Western Donbass, have been established. The migration ability of heavy metal salts in the system substrate - filtrate solution - plant is analyzed, which allows to create a model of migration of chemical elements of the coal heap under different abiotic and biotic environmental factors. Growth parameters and translocation factor *H.murinum* and *B.japonicus* were determined, the results of the study allow to use these plants in the future for the initial stage of biological reclamation of dumps.

Practical implications. The results of the study allow to develop an effective method of the biological stage of reclamation of the dump, by phytoremediation, by creating vegetation cover by plants *H.murinum* and *B.japonicus*.

Keywords: coal dump, heavy metals, "pioneer plants", migration of heavy metals, phytoremediation, translocation factor, inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS).