

ВМІСТ МАКРОЕЛЕМЕНТІВ І ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ПОРОДНИХ ВІДВАЛАХ І РОСЛИНАХ ЗА ВПЛИВУ МЕЛІОРАНТІВ

Шпак Я.В., Баранов В.І., Терек О.І.

Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Грушевського, 4, 79005, м. Львів
yaroslavcofizros@gmail.com

У статті досліджено вміст рухомих форм макроелементів (Р, К і Са) й важких металів (Pb і Cr) у субстраті породних відвалів Червоноградського гірничопромислового району (ЧГПР) і їх валовий уміст в органах суданської трави *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* (Nees ex Steud.) за впливу меліорантів (кам'яновугільного попелу Добротвірської теплоелектростанції та гумату Калію «ГКВ-45»). Знайдено підвищений уміст рухомих форм Р і К на фоні зниженого вмісту рухомих форм Pb і Cr у субстратах породних відвалів. Також виявлено підвищення валового вмісту Р в органах суданської трави за впливу попелу. У свою чергу, внесення гумату призвело до зниження вмісту рухомих форм Pb і Cr у субстраті породних відвалів, а також до підвищення валового вмісту Р на фоні зниження валового вмісту Pb і Cr в органах суданської трави. Установлено, що застосування кам'яновугільного попелу разом із гуматом калію підвищує вміст макроелементів і знижує вміст важких металів у субстраті породних відвалів Червоноградського гірничопромислового району й рослинах суданської трави ефективніше, ніж застосування тільки одного із цих меліорантів. *Ключові слова*: породні відвали, суданська трава, кам'яновугільний попіл, гумат калію.

Содержание макроэлементов и тяжелых металлов в породных отвалах и растениях под воздействием мелиорантов. Шпак Я.В., Баранов В.И., Терек О.И. В статье исследовано содержание подвижных форм макроэлементов (Р, К и Са) и тяжелых металлов (Pb и Cr) в субстрате породных отвалов Червоноградского горнопромышленного района (ЧГПР) и их валовое содержание в органах суданской травы *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* (Nees ex Steud.) под воздействием мелиорантов (каменноугольного пепла Добротворской теплоэлектростанции и гумата калия «ГКВ-45»). Найдено повышение содержания подвижных форм Р и К на фоне понижения содержания подвижных форм Pb и Cr в субстратах породных отвалов. Также обнаружено повышение валового содержания Р в органах суданской травы под воздействием пепла. В свою очередь, внесение гумата привело к снижению содержания подвижных форм Pb и Cr в субстрате породных отвалов, а также к повышению валового содержания Р на фоне понижения валового содержания Pb и Cr в органах суданской травы. Установлено, что применение каменноугольного пепла вместе с гуматом калия повышает содержание макроэлементов и понижает содержание тяжелых металлов в субстрате породных отвалов Червоноградского горнопромышленного района и растениях суданской травы эффективнее, чем применение только одного из этих мелиорантов. *Ключевые слова*: породные отвалы, суданская трава, каменноугольный пепел, гумат калия.

Effect of ameliorants on the content of macronutrients and heavy metals in waste rock dumps and plants. Shpak Y., Baranov V., Terek O. Studied the effect of ameliorants (coal fly ash of the Dobrotvir TPP and potassium humate "ГКВ-45") on contents of mobile macronutrients (P, K and Ca) and heavy metals (Pb and Cr) in substrate of waste rock dumps from the Chervonohrad coal mining region and their total contents in organs of Sudan grass *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* (Nees ex Steud.). Found the effect of ash on increasing of mobile P and K in contrast of decreasing of mobile Pb and Cr contents in substrates from waste dumps. Also detected increasing of total P content in organs of Sudan grass under the effect of ash. In turn, the application of humate caused decreasing contents of mobile Pb and Cr in substrate of waste rock dumps and increasing of total P content in contrast of reducing total contents of Pb and Cr in organs of Sudan grass. Concluded that application of coal fly ash together with potassium humate increases contents of macronutrients and reduces contents of heavy metals in substrate of waste rock dumps from the Chervonohrad coal mining region and in plants of Sudan grass is more effective than application only one of these ameliorants. *Key words*: waste rock dumps, Sudan grass, coal fly ash, potassium humate.

Постановка проблеми. Відвали пустої породи, яку вилучили після видобутку чи збагачення кам'яного вугілля, негативно впливають на стан екосистем прилеглих територій через виділення газів, пилу і стічних вод із високими концентраціями токсичних хімічних сполук.

Актуальність дослідження. Фітомеліорація хімічно забруднених територій із поступовим ґрунтоутворенням призводить до нейтралізації чи зменшення рухомості токсичних сполук. Однак субстрати

породних відвалів кам'яновугільної промисловості малоприсадибні для росту більшості покритонасінних рослин через несприятливі едафічні фактори, зокрема дефіцит макроелементів і високий уміст важких металів [3; 10; 18]. Тому актуально розробляти оптимальні заходи підготовки субстратів породних відвалів для фітомеліорації.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження особливостей хімічного складу едафо-

топів і мінерального живлення рослин за впливу різних факторів необхідні для економії ресурсів у процесі меліорації антропогенно порушених територій.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. У процесі аналізу літературних джерел не знайдено досліджень сумісного впливу попелу ТЕС із гуматами на вміст макроелементів і важких металів у породних відвалах гірничої промисловості.

Новизна. У статті вперше досліджено вміст рухомих форм макроелементів і важких металів у відвалах гірничої промисловості за сумісного впливу кам'яновугільного попелу ТЕС і гумату калію.

Підготовка субстратів для проведення фітомеліорації полягає в нейтралізації кислотності промисловими відходами з лужною реакцією, внесенні меліорантів, добрив і стимуляторів росту рослин [10; 15; 19; 20]. Завдяки лужній реакції, кам'яновугільний попіл ТЕС використовують для зниження кислотності породних відвалів шахт [24; 26]. У свою чергу, гумати різного походження застосовують для меліорації антропогенно порушених територій завдяки здатності підвищувати стресостійкість рослин, рухомість макроелементів і водночас знижувати рухомість важких металів у ґрунтового розчині [6; 10; 28].

Методологічне або загальнонаукове значення.

Проведення кореляційного аналізу вмісту рухомих форм макроелементів і важких металів із їх валовим вмістом у різних органах рослин у контрольованих експериментальних умовах дає змогу розробити рекомендації щодо проведення польових випробувань меліоративних заходів.

Свіжовідсіпану породу сіро-чорного забарвлення відбирали у 2015 році в межах Червоноградського промислового району (далі – ЧГПР) із відвалу, розташованого на території Сілецької сільської ради Сокальського району Львівської області біля Центральної збагачувальної фабрики (ЦЗФ), а кам'яновугільний попіл 2016 року – з відвалу Добротвірської теплоелектростанції (далі – ДТЕС), розташованої в селищі міського типу Добротвір Кам'янка-Бузького району Львівської області. Як еталон використовували субстрат без потенційного впливу едафічних стрес-факторів, який виготовили змішуванням торфу, листового перегною та піску в пропорції 1:2:1. Для виготовлення субстратів контролю породу з відвалу змішали із субстратом еталону в пропорції 9:1 для запобігання ранній загибелі проростків суданської трави. Субстрати дослідів виготовляли із субстрату контролю, обробленого тільки одним чи обома дослідними меліорантами. Попіл ДТЕС додавали до субстратів породних відвалів у концентрації 5% за масою, щоб досягти компромісу між ефективністю підвищення рН і потенційними фінансовими витратами в разі практичного застосування результатів дослідження. Вплив гуматів на фітотоксичність субстрату

перегорілої породи досліджували за допомогою гумату калію «ГКВ-45» виробництва ТзОВ «ПАРК» (Україна, Львівська область), який, за даними виробника, має такий склад: гумінові речовини – 42%; карбон загальний – 166,3 г/л; N – 2,4 г/л; P₂O₅ – 0,4 г/л; K₂O – 69,3 г/л; Mn – 197,99 мг/л; Fe – 132,04 мг/л; Cu – 3,17 мг/л; Zn – 19,69 мг/л; B – 2,28 мг/л; Co – 3,45 мг/л. Цей меліорант застосовували в концентрації 0,5% для запобігання плазмолізу рослинних клітин. Субстрати для дослідження готували за схемою: Еталон: ґрунтосуміш (1500 г); Контроль: порода (1350 г)+ґрунтосуміш (150 г); Дослід 1: порода (1200 г)+ґрунтосуміш (150 г)+попіл (150 г); Дослід 2: порода (1350 г)+ґрунтосуміш (150 г)+гумат (150 мл); Дослід 3: порода (1200 г)+ґрунтосуміш (150 г)+попіл (150 г)+гумат (150 мл). Проростки суданської трави *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* (Nees ex Steud.) пророщували в темряві протягом 4-х діб за температури 23 °С. Далі в горщики об'ємом 2 л висаджували по 15 проростків, які вирощували під відкритим небом на території ЛНУ ім. І. Франка з липня по жовтень 2016 року. Актуальну кислотність (рівень рН) субстратів вимірювали на приладі «Йономер универсальный ЭВ-74» за температури води +18,5 °С, рН дистильованої води – 5,5 і вмісті твердої речовини – 100 г/л [10]. Витяжки для визначення рухомих форм калію, кальцію і фосфору в субстраті одержували методом Кірсанова, а валового вмісту цих макроелементів у рослинному матеріалі – мокрим озоненням сульфатною кислотою за Піневич у модифікації Куркаєва. Уміст фосфору у витяжках вимірювали фотоколориметричним методом на апараті КФК-3 за методом Деніже, а калію й кальцію – методом полум'яної фотометрії на апараті ПФМ [1; 8]. Визначення рухомих форм важких металів у попелі ДТЕС і субстратах проводили в буферній ацетатно-амонійній витяжці з рН 4,8, а валового вмісту в органах рослин – у витяжці, одержаній мокрим озоненням нітратною кислотою. Далі вміст плюмбуму і хрому у відповідних витяжках вимірювали на атомно-абсорбційному спектрофотометрі С115 М1 [9]. Морфометричні параметри визначали у 25-, біохімічні у 5-, а кореляцію у 20-кратній повторюваності після 96 діб росту суданської трави. Середнє арифметичне і стандартне відхилення розраховували в програмі MS Excell 2007, а критерій достовірності Стьюдента і кореляційний аналіз здійснювали в програмі Statistica 10. Коефіцієнти кореляції зображені в клітинках парних кореляційних матриць на перетинах стовпчиків і рядків із назвами дослідних параметрів (таблиці 5–7, 10, 11). Для кореляційного аналізу брали тільки значення варіантів із субстратом породних відвалів [4; 5].

Виклад основного матеріалу. З літератури відомо, що попіл ТЕС має переважно лужне значення рН через наявність металів із лужними властивостями у своєму складі [23; 26]. Нами виявлено достовірне підвищення рН витяжки субстрату

породних відвалів ЧГПР за впливу попелу ДТЕС (таблиця 2), яке можна пояснити наявністю калію й кальцію в ньому (таблиця 1), що підтверджено прямим кореляційним зв'язком умісту рухомих форм цих макроелементів із актуальною кислотністю субстратів (таблиці 6, 7).

З літератури відомо, що внесення гуматів підвищує рН ґрунтового розчину завдяки утворенню висококорухомих сполук із лужними металами [17]. Нами виявлено достовірне підвищення рН субстратів породних відвалів за впливу гумату калію. Установлено, що субстрати, оброблені обома меліорантами, мають вищий рН, ніж тільки одним. Також виявлено підвищення рН субстратів породних відвалів ЧГПР після вирощування суданської трави

(таблиця 2), яке можна пояснити кореневими виділеннями рослин [21].

З літератури відомо, що нейтралізація кислих ґрунтів покращує доступність фосфору для рослин [12; 25], що підтверджено здійсненим нами кореляційним аналізом, який показав прямий зв'язок умісту рухомого фосфору з рівнем рН субстратів (таблиця 5). Нами виявлено підвищення вмісту фосфору в субстраті до й після вирощування рослин за внесення попелу ДТЕС разом із гуматом калію, що зумовлено підвищенням рН субстратів (таблиці 2, 3).

Відомо, що найбільше фосфору накопичують листки, оскільки в них найактивніший метаболізм серед органів рослин, трохи менше корені, які

Таблиця 1

Уміст рухомих форм макроелементів і важких металів у кам'яновугільному попелі Добротвірської ТЕС, мг/кг сухої маси (n=5)

Макроелементи			Важкі метали	
P	K	Ca	Pb	Cr
58±3	22,0±1,9	237±14	2,39±0,08	17,3±0,2

Таблиця 2

Актуальна кислотність субстратів (рН) до й після 96 діб росту суданської трави (n=5)

Варіант	рН	
	до	після
Еталон	6,22±0,06	6,47±0,05
Порода (Контроль)	3,63±0,06	4,23±0,04
Порода+Попіл	4,34±0,05*	4,85±0,05*
Порода+Гумат	3,95±0,05*	4,52±0,06*
Порода+Попіл+Гумат	4,44±0,04*	5,23±0,05*

Примітка: «*» (тут і далі) – достовірна відмінність параметрів субстратів чи рослин породних відвалів за впливу меліорантів стосовно значень субстрату чи рослин породних відвалів без впливу меліорантів (контролю) при $p \leq 0,05$.

Таблиця 3

Уміст рухомих форм макроелементів у субстратах до й після 96 діб росту суданської трави за впливу меліорантів, мг/кг сухої маси (n=5)

Хімічний елемент	Варіант	Вирощування суданської трави	
		До	Після
P	Еталон	42,6±2,7	37,5±2,5
	Порода (Контроль)	16,2±1,4	12,5±0,9
	Порода+Попіл	17,9±1,6	14,8±1,2
	Порода+Гумат	21,8±1,8	18,5±1,8
	Порода+Попіл+Гумат	23,7±2,1*	19,9±1,9*
K	Еталон	43,6±3,8	40,4±3,5
	Порода (Контроль)	13,9±1,9	9,43±1,88
	Порода+Попіл	18,4±2,9	11,7±1,9
	Порода+Гумат	19,8±2,9	15,3±1,9
	Порода+Попіл+Гумат	23,6±2,9*	15,7±2,2
Ca	Еталон	35,5±5,1	31,9±5,1
	Порода (Контроль)	21,1±3,8	17,5±4,0
	Порода+Попіл	25,6±3,8	21,1±5,9
	Порода+Гумат	29,2±4,5	21,1±3,8
	Порода+Попіл+Гумат	31,0±4,0	24,7±3,2

поглинають рухомі сполуки цього макроелемента з ґрунтового розчину, а найменше стебла, що виконують переважно опорну і транспортну функції [27]. Ми встановили, що додавання попелу збільшує валовий уміст фосфору в коренях і листках суданської трави, а гумату – тільки в листках. Стебла суданської трави, які виростили на субстраті з унесенням обох меліорантів, містили фосфору достовірно більше, ніж рослини контролю, а уміст цього макроелемента в листках перевищив межу стандартного відхилення стосовно субстратів, оброблених тільки

одним із меліорантів, що свідчить про сумісність попелу й гумату (таблиця 4).

З літератури відомо, що калій активно поглинається, транспортується й накопичується з різною швидкістю, яка залежить від органу і стадії онтогенезу, що спричиняє його нерівномірне накопичення в органах рослин [11; 29]. Нами виявлено достовірне підвищення вмісту калію в стеблах суданської трави за впливу внесення гумату, а також гумату разом із попелом.

У листках достовірно підвищення вмісту цього макроелемента щодо контролю виявили тільки

Таблиця 4

Валовий уміст макроелементів в органах суданської трави через 96 діб росту за впливу меліорантів, г/кг сухої маси (n=5)

Хімічний Елемент	Варіант	Орган суданської трави		
		Корінь	Стебло	Листок
P	Еталон	1,81±0,05	1,46±0,03	2,38±0,05
	Порода (Контроль)	0,99±0,04	0,72±0,05	1,24±0,04
	Порода+Попіл	1,27±0,05*	0,81±0,04	1,64±0,05*
	Порода+Гумат	1,12±0,05	0,83±0,04	1,47±0,04*
	Порода+Попіл+Гумат	1,44±0,05*	1,07±0,05*	2,15±0,07*
K	Еталон	3,72±0,12	6,10±0,16	6,98±0,12
	Порода (Контроль)	1,85±0,20	2,09±0,12	2,70±0,18
	Порода+Попіл	1,91±0,16	2,25±0,17	2,90±0,16
	Порода+Гумат	2,02±0,17	2,79±0,21*	3,18±0,25
	Порода+Попіл+Гумат	2,28±0,19	3,02±0,20*	3,57±0,21*
Ca	Еталон	10,3±0,3	11,8±0,3	8,70±0,32
	Порода (Контроль)	6,22±0,32	7,03±0,40	4,95±0,42
	Порода+Попіл	7,18±0,37	7,65±0,34	5,69±0,40
	Порода+Гумат	6,84±0,45	7,52±0,42	5,54±0,40
	Порода+Попіл+Гумат	8,20±0,45*	9,07±0,53*	6,28±0,40*

Таблиця 5

Коефіцієнти кореляції між актуальною кислотністю субстратів (pH) і вмістом Фосфору (P) в субстратах і органах рослин до і після 96 діб росту суданської трави (n=20)

	pH	P До	P Після	Корінь	Стебло	Листок
pH		0,52#	0,54#	0,91#	0,74#	0,88#
До	0,52#		0,84#	0,58#	0,71#	0,69#
Після	0,54#	0,84#		0,62#	0,67#	0,67#
Корінь	0,91#	0,58#	0,62#		0,80#	0,94#
Стебло	0,74#	0,71#	0,67#	0,80#		0,92#
Листок	0,88#	0,69#	0,67#	0,94#	0,92#	

Примітка: «#» (тут і далі) – наявність достовірного кореляційного зв'язку при $p \leq 0,05$.

Таблиця 6

Коефіцієнти кореляції між актуальною кислотністю субстратів (pH) і вмістом калію (K) в субстратах та органах рослин до й після 96 діб росту суданської трави (n=20)

	pH	K До	K Після	Корінь	Стебло	Листок
pH		0,65#	0,43	0,45#	0,50#	0,61#
До	0,65#		0,75#	0,73#	0,72#	0,65#
Після	0,43	0,75#		0,57#	0,70#	0,73#
Корінь	0,45#	0,73#	0,57#		0,71#	0,55#
Стебло	0,50#	0,72#	0,70#	0,71#		0,77#
Листок	0,61#	0,65#	0,73#	0,55#	0,77#	

в рослин, вирощених на субстраті з додаванням обох дослідних меліорантів, що можна пояснити підвищенням рухомості калію, який містив попіл ДТЕС (таблиця 1) гуміновими речовинами гумату калію [17]. Впливу меліорантів на вміст калію в коренях не виявлено (таблиця 4). Також встановлено, що внесення тільки гумату чи попелу не спричиняє достовірного підвищення вмісту калію в субстраті породних відвалів. Натомість виявлено достовірне підвищення вмісту рухомого калію в субстратах породних відвалів за внесення обох меліорантів. У свою чергу, вирощування рослин зменшило вміст

цього макроелемента в субстратах за межу стандартного відхилення (таблиця 4), що підтверджено наявністю прямого кореляційного зв'язку вмісту рухомого калію в субстраті з його валовим умістом в органах рослин (таблиця 6).

З літератури відомо, що злакові рослини із C_4 типом фотосинтезу найбільше кальцію накопичують у стеблах для зміцнення клітинних стінок, трохи менше в коренях і найменше в листках [16].

Нами відмічено зниження вмісту кальцію в субстратах за межу стандартного відхилення за впливу вирощування суданської трави, яке можна пояснити

Таблиця 7

Коефіцієнти кореляції між актуальною кислотністю субстратів (рН) і вмістом Кальцію (Са) в субстратах та органах рослин до й після 96 діб росту суданської трави (n=20)

	рН	Са До	Са Після	Корінь	Стебло	Листок
рН		0,49#	0,48#	0,80#	0,72#	0,70#
До	0,49#		0,22	0,54#	0,63#	0,61#
Після	0,48#	0,22		0,44	0,37	0,23#
Корінь	0,80#	0,54#	0,44		0,79#	0,82#
Стебло	0,72#	0,63#	0,37	0,79#		0,73#
Листок	0,70#	0,61#	0,23	0,82#	0,73#	

Таблиця 8

Уміст рухомих форм важких металів у субстраті до й після 96 діб росту суданської трави за впливу меліорантів, мг/кг сухої маси (n=5)

Хімічний елемент	Варіант	Вирощування суданської трави	
		До	Після
Pb	Еталон	4,41±0,32	3,57±0,26
	Порода (Контроль)	14,5±1,0	11,3±0,9
	Порода+Попіл	12,4±0,9	10,7±0,7
	Порода+Гумат	10,4±0,7*	8,17±0,44*
	Порода+Попіл+Гумат	8,30±0,55*	6,65±0,47*
Cr	Еталон	8,32±0,49	5,43±0,40
	Порода (Контроль)	44,5±3,2	32,5±1,4
	Порода+Попіл	30,3±2,4*	22,1±1,1*
	Порода+Гумат	38,7±2,7	24,2±1,2*
	Порода+Попіл+Гумат	26,6±1,1*	19,1±1,1*

Таблиця 9

Валовий уміст плумбуму (Pb) і хрому (Cr) в органах суданської трави через 96 діб росту за впливу меліорантів, мг/кг сухої маси (n=5)

Хімічний елемент	Варіант	Орган суданської трави		
		Корінь	Стебло	Листок
Pb	Еталон	1,26±0,11	0,78±0,08	0,67±0,07
	Порода (Контроль)	6,44±0,42	1,76±0,14	1,38±0,10
	Порода+Попіл	5,72±0,46	1,25±0,12	0,68±0,08*
	Порода+Гумат	5,62±0,35	1,41±0,18	0,63±0,05*
	Порода+Попіл+Гумат	4,35±0,32	1,33±0,12	0,61±0,05*
Cr	Еталон	4,29±0,32	3,53±0,30	2,68±0,25
	Порода (Контроль)	14,2±1,1	8,44±0,50	11,7±0,7
	Порода+Попіл	12,1±0,9	6,82±0,41	7,44±0,62*
	Порода+Гумат	12,4±0,9	7,52±0,43	8,34±0,68*
	Порода+Попіл+Гумат	10,4±0,6*	6,12±0,37*	6,63±0,45*

Таблиця 10

Коефіцієнти кореляції між актуальною кислотністю субстратів (рН) і вмістом плумбуму (Pb) у субстратах та органах рослин до й після 96 діб росту суданської трави (n=20)

	рН	Pb До	Pb Після	Корінь	Стебло	Листок
рН		-0,68#	-0,52#	-0,73#	-0,74#	-0,79#
До	-0,68#		0,94#	0,83#	0,44	0,76#
Після	-0,52#	0,94#		0,79#	0,35	0,63#
Корінь	-0,73#	0,83#	0,79#		0,52#	0,65#
Стебло	-0,74#	0,44#	0,35	0,52#		0,75#
Листок	-0,79#	0,76#	0,63#	0,65#	0,75#	

Таблиця 11

Коефіцієнти кореляції між актуальною кислотністю субстратів (рН) і вмістом хрому (Cr) у субстратах та органах рослин до й після 96 діб росту суданської трави (n=20)

	рН	Cr До	Cr Після	Корінь	Стебло	Листок
рН		-0,93#	-0,92#	-0,78#	-0,87#	-0,91#
До	-0,93#		0,88#	0,74#	0,82#	0,84#
Після	-0,92#	0,88#		0,88#	0,87#	0,93#
Корінь	-0,78#	0,74#	0,88#		0,86#	0,84#
Стебло	-0,87#	0,82#	0,87#	0,86#		0,85#
Листок	-0,91#	0,84#	0,93#	0,84#	0,85#	

споживанням рослинами [11], що підтверджено наявністю прямого кореляційного зв'язку вмісту рухомих форм цього макроелемента в субстратах із його валовим умістом в органах рослин (таблиця 7). Натомість не виявлено достовірного впливу попелу й гумату на вміст рухомих сполук кальцію в субстратах. Однак виявлено достовірне зростання вмісту цього макроелемента в органах суданської трави за сумісного впливу обох досліджених меліорантів (таблиці 3, 4).

В Україні ГДК для рухомих форм плумбуму і хрому в ґрунтах становить 6 мг/кг [28]. У контрольному субстраті породних відвалів ЧГПР ми виявили перевищення цього нормативу (таблиця 8), яке можна пояснити високими концентраціями Pb і Cr у відходах кам'яновугільної промисловості [18], а також низьким значенням рН, яке підвищує рухомість важких металів у ґрунтового розчині [14], що підтверджено наявністю зворотного кореляційного зв'язку вмісту рухомих сполук плумбуму і хрому з актуальною кислотністю субстратів (таблиці 10, 11).

З літератури відомо, що злакові рослини найбільше концентрують важкі метали в кореневій системі до межі фізіологічного бар'єру між кореневою шийкою і стеблом, а в стеблі й листках набагато менше [7], що підтверджено нами й для випадку вирощування суданської трави на породних відвалах ЧГПР (таблиця 9). Виявлено, що попіл ДТЕС не впливає на вміст рухомих форм плумбуму в субстраті породних відвалів, але статистично достовірно знижує його валовий вміст у листках. Також встановлено, що внесення тільки гумату калію і його внесення з попелом достовірно знижує вміст рухомих форм плумбуму в субстраті й листках суданської трави (таблиці 8, 9). Також відомо, що сполуки

хрому здатні поширюватися на великі відстані разом із пилом та аерозолями промислового походження, що могло спричинити виявлене нами перевищення ГДК в субстраті еталону (таблиця 8). Нами виявлено зниження вмісту рухомих форм Хрому в субстратах за межу стандартного відхилення, яке зумовлено поглинанням кореневою системою [2; 22], що підтверджено наявністю прямого кореляційного зв'язку вмісту рухомих сполук хрому в субстраті з його валовим умістом у коренях рослин (таблиця 11). У свою чергу, додавання попелу ДТЕС спричинило достовірне зниження вмісту рухомих форм хрому в субстраті породних відвалів (таблиця 8) через підвищення рН [14], що підтверджено наявністю зворотного кореляційного зв'язку вмісту хрому з актуальною кислотністю субстратів (таблиця 11).

На основі відсутності перетину межі стандартного відхилення між значеннями вмісту хрому в субстратах породних відвалів за впливу сумісного застосування обох меліорантів і застосування тільки попелу зроблено припущення, що внесення гуматів не впливає на ефективність зниження рухомості хрому попелом ДТЕС (таблиця 8).

Зниження вмісту рухомих форм хрому в субстраті призвело до зниження його валового вмісту в листках, що підтверджено наявністю прямого кореляційного зв'язку вмісту рухомих форм хрому з його валовим умістом у листках рослин (таблиця 11).

Головні висновки. Унесення кам'яновугільного попелу Добротвірської ТЕС разом із гуматом калію підвищує вміст макроелементів і знижує вміст важких металів у субстраті породних відвалів ЧГПР і рослинах суданської трави *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* (Nees ex Steud.) ефективніше, ніж застосування тільки одного із цих меліорантів.

Перспективи використання результатів дослідження. Досліджені концентрації меліорантів у поєднанні з вирощуванням суданської трави можна використати для польових випробувань фіто-меліорації породних відвалів Червоноградського гірничопромислового району.

Література

1. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. 2-е изд. Москва: МГУ, 1970. 488 с.
2. Бессонова В.В., Иванченко О.Е. Накопление хрома в растениях и его токсичность. Питання біоіндикації та екології. 2011. № 2. Т. 16. С. 13–29.
3. Бешлей С.В. Екологічні властивості *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth та його середовищезворна роль на відвалах вугільних шахт (Червоноградський гірничопромисловий район): дис. ... канд. біол. наук: спец. 03.00.16 / Інститут екології Карпат. Львів, 2016. 148 с.
4. Карчевский Е.М., Филиппов И.Е. Excel 2007 в примерах: учебно-методическое пособие. Казань: Казанский федеральный университет, 2010. 75 с.
5. Лакин Г.Ф. Биометрия: учебное пособие для биол. спец. вузов. Москва: Высшая школа, 1990. 352 с.
6. Макеева Н.А. Оценка продукционных процессов овса в условиях внесения гуматов калия и натрия на породный отвал. Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6.
7. Окрушко С.С. Вивчення впливу іонів свинцю на проростки ярого ячменю. Корми і кормовиробництво. 2012. Вип. 72. С. 23–28.
8. Практикум по агрохимии: учебное пособие / под ред. академика РАСХН В.Г. Минеева. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
9. Руденко С.С., Костишин С.С., Морозова Т.В. Загальна екологія: практичний курс: навчальний посібник: у 2 ч. Чернівці: Книги-XXI, 2008. Частина 2: Природні наземні екосистеми. 307 с.
10. Фітотоксичність субстрату породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу попелу теплоелектростанцій і гумату калію / Я. Шпак, І. Записоцька, В. Баранов, О. Терек. *Trajectory Nauki/Path of Science*. 2017. Т. 3. № 3. 17 с.
11. Barker A., Pilbeam D. Handbook of Plant Nutrition. Boca Raton: CRC Press, 2015. 773 p.
12. Burtan L., Dumitru M., Sirbu C. et al. The effect of bioremediation technologies on mobile phosphorus content from polluted soil with crude oil. *Research Journal of Agricultural Science*. 2015. Is. 3. Vol. 3. P. 15–22.
13. Canellas L., Olivares F. Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2014. Is. 1. Vol. 3.
14. Caporale A., Violante A. Chemical Processes Affecting the Mobility of Heavy Metals and Metalloids in Soil Environments. *Current Pollution Reports*. 2016. Is. 1. Vol. 2. P. 15–27.
15. Firpo B., Filho J., Schneider I. A brief procedure to fabricate soils from coal mine wastes based on mineral processing, agricultural, and environmental concepts. *Minerals Engineering*. 2015. Vol. 76. P. 81–86.
16. Johnson J., Barbour N., Weyers S. Chemical Composition of Crop Biomass Impacts Its Decomposition. *SSSAJ*. 2007. Is. 1. Vol. 7. P. 155–162.
17. Khaled H., Fawy H. Effect of different levels of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity. *Soil & Water Res*. 2011. Is. 6. Vol. 1. P. 21–29.
18. Knysh I., Karabyn V. Heavy metals distribution in the waste pile rocks of Chervonogradska mine of the Lviv-Volyn coal basin (Ukraine). *Pollution Research*. 2014. Is. 33. Vol. 4. P. 663–670.
19. Lorestani B., Yousefi N., Cheraghi M. et al. Phytoextraction and phytostabilization potential of plants grown in the vicinity of heavy metal-contaminated soils: a case study at an industrial town site. *Environ Monit Assess*. 2013. Is. 185. Vol. 12. P. 10217–10223.
20. Malti D., Malti S. Ecorestoration Of Waste Dump By The Establishment Of Grass-Legume Cover. *IJSTR*. 2014. Is. 3. Vol 3. P. 37–41.
21. Marschner H., Römheld V. In vivo measurement of root-induced pH changes at the soil-root interface: effect of plant species and nitrogen source. *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie*. 1983. Is. 3. Vol. 111. P. 241–251.
22. Olivera H. Chromium as an Environmental Pollutant: Insights on Induced Plant Toxicity. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Botany*. 2012. Vol. 2012.
23. Pohrebennyk V. Influence of Dobrotvir thermal power plant on environmental specifications. *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Environmental problems*. 2016. Is. 1. Vol. 1. P. 83–89.
24. Roy M., Roopali R., Mukherjee P. et al. Phytoreclamation of Abandoned Acid Mine Drainage Site After Treatment with Fly Ash. *IntechOpen*. 2017. № 69527. P. 101–118.
25. Sanyal S.K., De Datta S.K. Chemistry of Phosphorus Transformations in Soil. *Advances in Soil Science*. 1991. Vol. 16. P. 1–120.
26. Srivastava A., Chhnkar P. Amelioration of coal mine spoils through fly ash application as liming material. *J. Sci. Ind. Res*. 2000. Vol. 59. P. 309–313.
27. Taiz L., Zeiger E., Moller I. et al. *Plant Physiology and Development*. 6th Edition, 2015. Sunderland: Sinauer Associates. 896 p.
28. Tregubova P., Koptsik G., Stepanov A. et al. Application of humic substances in the remediation of heavy-metal-polluted soils of the Subarctic Zone of the Kola Peninsula. *Moscow Univ. Soil Sci. Bull*. 2017. Is. 72. P. 207–214.
29. Wolf O., Jeschke W. Modeling of Sodium and Potassium Flows via Phloem and Xylem in the Shoot of Salt-stressed Barley. *Journal of Plant Physiology*. Is. 128. 1987. P. 371–386.
30. Державні санітарні правила та норми / Державна санітарно-епідеміологічна служба України. 1999. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=4010> (дата звернення: 03.12.2018).