

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІТОМЕЛІОРАТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДИКОРОСЛИХ РОСЛИН НА ДІЛЯНКАХ РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ВУГІЛЬНИХ ВІДВАЛІВ ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ

Клімкіна І.І.¹, Сорока Т.Ю.¹, Харитонов М.М.²

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
пр. Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро
irina.i.klimkina@gmail.com, soroka.tania.1998@gmail.com

²Дніпровський державний аграрно-економічний університет
вул. Сергія Єфремова, 25, 49600, м. Дніпро
envteam@ukr.net

Стаття присвячена дослідженню фітомеліоративних властивостей дикорослих форм *Bromopsis inermis* та *Lathyrus tuberosus*, що зростають на ділянках рекультивациі вугільних відвалів Західного Донбасу. За даними фізико-хімічного аналізу ґрунтів встановлено перевищення норми вмісту важких металів та інших токсичних елементів, а також недостатній рівень вмісту доступних для рослин форм фосфору та азоту. Визначено високу здатність рослин до накопичення важких металів і цінних рідкісних елементів. Показано, що досліджувані рослини можуть бути використані для технологій фітореMediaції (очищення ґрунтів від важких металів та інших токсичних елементів) і фітомайнінгу з метою отримання рідких елементів. *Ключові слова:* вугільні відвали, *Bromopsis inermis*, *Lathyrus tuberosus*, важкі метали, рідкоземельні метали, фітореMediaція, фітомайнінг.

Исследование фитомелиоративных свойств дикорастущих растений на участках рекультивации угольных отвалов Западного Донбасса. Климкина И.И., Сорока Т.Ю., Харитонов Н.Н. Статья посвящена исследованию фитомелиоративных свойств дикорастущих форм *Bromopsis inermis* и *Lathyrus tuberosus*, произрастающих на участках рекультивации угольных отвалов Западного Донбасса. По данным физико-химического анализа почв установлено превышение нормы содержания тяжелых металлов и других токсичных элементов, а также недостаточный уровень содержания доступных для растений форм фосфора и азота. Установлено высокую способность растений к накоплению тяжелых металлов и ценных редких элементов. Показано, что исследуемые растения могут быть использованы для технологий фитореMediaции (очистка почв от тяжелых металлов и других токсичных элементов) и фитомайнинга с целью получения редких элементов. *Ключевые слова:* угольные отвалы, *Bromopsis inermis*, *Lathyrus tuberosus*, тяжелые металлы, редкоземельные металлы, фитореMediaция, фитомайнинг.

Investigation the phytomeliorative properties of native plants on reclaimed coal dumps in Western Donbass. Klimkina I., Soroka T., Kharytonov M. The paper is devoted to the study of phytomeliorative properties of native plants *Bromopsis inermis* and *Lathyrus tuberosus* growing on the coal dump reclamation sites in Western Donbas. The soil physical and chemical analysis has shown the excess of heavy metals and other toxic elements to the norm parameters, and insufficient level of phosphorus and nitrogen forms in soil available to plants. High ability of plants to accumulate the heavy metals and valuable rare elements has been determined. It has been shown that the plants under investigation can be used for phytoreMediaation technologies (soil purification from heavy metals and other toxic elements) as well as for phytomining technologies in order to obtain the rare elements. *Key words:* Coal Dumps, *Bromopsis inermis*, *Lathyrus tuberosus*, Heavy Metals, Rare Earth Elements, PhytoreMediaation, Phytomining.

Постановка проблеми. В умовах сьогодення внаслідок розвитку гірничовидобувної і гірничопереробної промисловості відбувається значне порушення земної поверхні, через що набувають особливої гостроти розроблення і впровадження природоохоронних технологій. Накопичення великих об'ємів техногенних відходів у відвалах призводить до порушень природних ландшафтів, забруднення всіх складових навколишнього природного середовища, вилучення з господарчого обігу значних площ земельних угідь [1].

Для запобігання негативним процесам виникає необхідність у прогнозі ризику забруднення навколишнього природного середовища, який повинен

базуватися на результатах хімічного аналізу розкритих гірських порід, та оцінці їх фітотоксичних властивостей, що пов'язані із зниженням рН, підвищенням міграції токсичних солей важких металів після їх винесення на земну поверхню [2].

Актуальність дослідження. Природне заростання вугільних відвалів після гірничотехнічної рекультивациі вважається важливою частиною відновлення природного середовища. Знижені значення рН, наявність великої кількості рухомих форм важких металів, алюмінію, мала вологоємність та інші несприятливі процеси негативно впливають на швидкість озеленення вугільних відвалів. За відсутності вегетативного покриву спостерігаються

активні процеси фізичного і хімічного вивітрювання, за якого порода руйнується, перетворюється в пил і стає одним з основних джерел забруднення атмосфери, ґрунтів, поверхневих і ґрунтових природних вод [1–4].

Вибір методів для відновлення техногенних територій, особливо в гірничодобувній і промисловій областях, визначається її кліматичними умовами, типом, рівнем і формою забруднення, особливостями ландшафту і технологіями, що використовуються для отримання кінцевого продукту гірничо-збагачувального комплексу.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. В останні роки методи фітореємедіації, які забезпечують фітоекстракцію (або фітомайнінг) – видалення металів шляхом їх накопичення в рослинних органах, – отримали широке визнання [3–8]. Цей метод більш вигідний порівняно з іншими методами очищення забруднених територій: він недорогий, і є можливість отримати додаткову продукцію. Сьогодні фітомайнінг визначається як використання зелених рослин для комерційного вилучення цінних металів із ґрунту з їх високою концентрацією.

Фітомайнінг розглядається як технологія фітоекстракції, яка дає змогу витягувати економічно цінні метали із субстрату (зокрема, з відвалів гірничодобувної промисловості). При цьому ключова роль у фітоекстракції і фітомайнінгу належить рослинам – гіперакумуляторам металів. Такі рослини повинні поглинати метали із субстрату, утримувати їх у тканинах кореня, а потім транспортувати їх у надземну частину. Здатність утворювати велику кількість надземної біомаси протягом одного вегетаційного періоду, простота збору врожаю, здатність рости і розвиватися в несприятливих умовах також є важливими особливостями рослин – гіперакумуляторів металів, які, перш за все, визначаються специфічністю субстрату. Розглянутими недоліками фітоекстракції важких металів є порівняно мала глибина очищення субстрату залежно від глибини вкорінення використовуваних рослин і повільні темпи вилучення важких металів із субстрату [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробленню технологій фітомайнінгу передують численні дослідження з вивчення закономірностей накопичення металів в органах рослин, що ростуть на забруднених ґрунтах [9]. Дослідження з розроблення екологічних технологій (біологічна рекультивация антропогенних ландшафтів, що утворилися внаслідок діяльності гірничодобувної промисловості) [4] та їх подальше практичне використання (особливо в сільському господарстві) проводяться вже майже півстоліття. Проте в останні роки приділяється велика увага розробленню комерційно життєздатних технологій із використання гіперакумуляторних видів рослин для накопичення цінних елементів [6–8, 10].

Метою роботи було вивчити стійкість домінантних видів диких рослин, які зростають на рекультивованих вугільних відвалах Західного Донбасу, до підвищених концентрацій важких металів та інших токсичних елементів, а також перспективи використання цих рослин для технологій фітореємедіації і фітомайнінгу.

Об'єкти та методи досліджень. Відбір зразків для дослідження проводили на базі Павлоградського дослідного стаціонару рекультивации порушених земель ДДАЕУ у Західному Донбасі, який був закладений у 1976 р. в заплаві річки Самара з метою пошуку заходів відновлення природного потенціалу порушеної території. Схема рекультивации земель передбачала вивчення ефективності перекриття шахтних відвалів різними за потужністю шарами ґрунтової маси чорнозему з відсутністю та наявністю екрануючого прошарку лесоподібного суглинку (рис. 1).

Треба зазначити, що в усіх варіантах рекультивации шороку (до 1997 р.) на дослідних ділянках вирощували культури польової сівозміни. До минулого року у зв'язку з реформуванням ВО «Павлоградвугілля» ділянки були під природним заростанням. Основа ділянок рекультивации була сформована шаром гірської породи (8–10 м), поверх якої були насипані ґрунтові субстрати різної потужності. У наших дослідженнях вивчалися ділянки рекультивации з нанесенням на породу чорнозему потужністю 30 см (ділянка 2), 50 см (ділянка 3) і 70 см (ділянка 4) (рис. 1).

Для хімічного аналізу були відібрані зразки ґрунтів із глибини 0–20 см, а також зразки рослинного матеріалу домінантного виду *Bromopsis inermis*. Крім того, досліджували хімічний склад *Lathyrus tuberosus*, що трапляється лише на ділянках із прошарком чорнозему більш ніж 50 см. Зразки рослинного матеріалу та ґрунтових субстратів були висушені, оброблені і підготовлені до фізико-хімічного аналізу відповідно зі стандартними методами для спектрофотометричного та ІСР-MS аналізів. Усі аналізи проводили у 5-кратній повторності.

Було проведено комплексний аналіз таких фізико-хімічних показників, як рН, питома електропровідність ґрунту (ЕС), кількісний вміст поживних речовин для рослин, а саме іонів NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , а також валовий вміст мікроконцентрацій важких металів, інших токсичних елементів і рідких металів.

Проби ґрунтів відбирали згідно з чинними ДСТУ 4287:2004 та ДСТУ ISO 10381-2:2004. Вони були доведені до повітряно-сухого стану, після чого зробили ґрунтово-водні витяжки у співвідношенні 1:10. рН водної витяжки визначали за ГОСТ 17.5.4.01-84, питому електропровідність – за ДСТУ ISO 11265:2001. Для визначення вмісту органічних речовин у ґрунті використовували метод сухого спалювання за ДСТУ Б В.2.1-16:2009.

Наступним визначали кількісний вміст іонів NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} фотометричним методом відпо-

відно до німецьких стандартів «DIN-Norm». Вміст NO_3^- визначали відповідно до методики DIN 38405-9. Нітрати через додавання розчину концентрованих сірчаної та фосфорної кислот реагують із 2,6-диметилфенолом з утворенням 4-нітро-2,6-диметилфенолу. Останній надає розчину оранжевого забарвлення, оптичну щільність якого вимірюють за довжини хвилі 338 нм.

Концентрацію іонів NH_4^+ визначали за індофеноловим методом згідно з DIN 38406-5. В основі методу лежить реакція аміаку з фенолом у присутності окислювача гіпохлориту натрію. Продуктом реакції є індофенол, який у лужному середовищі забарвлює розчини в синій колір. Оптичну щільність розчинів вимірюють за довжини хвилі 625 нм.

Вміст іонів PO_4^{3-} визначали за DIN EN ISO 6878. В основі цього методу лежить здатність фосфат-іонів утворювати з молібдатом амонію фосфорномолібденову гетерополексислоту (ФМГПК) – стійку в кислому середовищі та забарвлену в жовтий колір сполуку. Інтенсивність забарвлення жовтої ФМГПК слабка, тому для визначення фосфору використовували її відновлену форму, інтенсивно забарвлену в синій колір. Оптичну щільність розчинів вимірювали за довжини хвиль 880 нм. Під час додавання відновника Mo(VI) , що входить до складу ФМГПК, переходить до Mo(V) з утворенням «фосфор-молібденової сині». Вільні Mo(VI) і Mo(V) , що не входять до складу ФМГПК, також утворюють забарвлені в синій колір з'єднання. Щоб уникнути відновлення Mo(VI) , що входить до складу молібденово-кислого амонію, процедуру відновлення ФМГПК проводили в м'яких умовах. Як відновник використовували аскорбінову кислоту в присутності антимоніл-тартрату калію – $\text{K(SbO)C}_4\text{H}_4\text{O}_6$, який прискорює утворення відновленої форми ФМГПК і сприяє її стійкості. Утворення пофарбованого в синій колір комплексу відбувається у слабкислому середовищі. Головним компонентом, що заважає під час фотометричного визначення фосфору, є Fe(III) , для

усунення впливу якого здійснювали його відновлення до Fe(II) .

Валовий і водорозчинний вміст мікроелементів визначали на підставі методу мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-MS) на базі лабораторії Інституту біологічних наук Технічного університету «Фрайберзька гірничої академія». Підготовку проб для аналізу валового вмісту елементів здійснювали згідно з ISO 11464:1994 та ДСТУ ISO 14869-1:2005 за розчинення проб ґрунту кислотним плавленням.

Перевищення норми вмісту важких металів у ґрунті визначали за допомогою індексу забруднення [11; 12], а здатність до накопичення хімічних елементів у тканинах рослин – за коефіцієнтом біологічного накопичення [13].

Статистичну обробку результатів дослідження виконано за допомогою пакету програми «Microsoft Excel 2010».

Виклад основного матеріалу. Результати дослідження фізико-хімічних показників ґрунтових субстратів із ділянок рекультивації свідчать про коливання показника рН ґрунту від $6,0 \pm 0,58$ для ділянки 2 (яка була сформована насипним шаром чорнозему 30 см) до $8,4 \pm 0,17$ для ділянки 6 (що сформована насипним шаром червоно-бурої глини), показника питомої електропровідності – від $13 \mu\text{S}/\text{см}$ для ділянки 4 (яка була сформована насипним шаром чорнозему 70 см) до $104 \mu\text{S}/\text{см}$ для ділянки 6.

Варто зазначити, що показники питомої електропровідності водних суспензій, наприклад чорноземів типових, становлять у межах від 35 до $103 \mu\text{S}/\text{см}$, орного шару ясно-сірого лісового ґрунту – $24-25 \mu\text{S}/\text{см}$. Електропровідність пов'язана головним чином із мінеральним складом ґрунту, його вологістю, ємністю катіонного обміну, рівнем солоності, органічних речовин, характеристиками підґрунтя, а також із властивостями ґрунту, які впливають на ефективність його екологічних функцій, зокрема родючість.

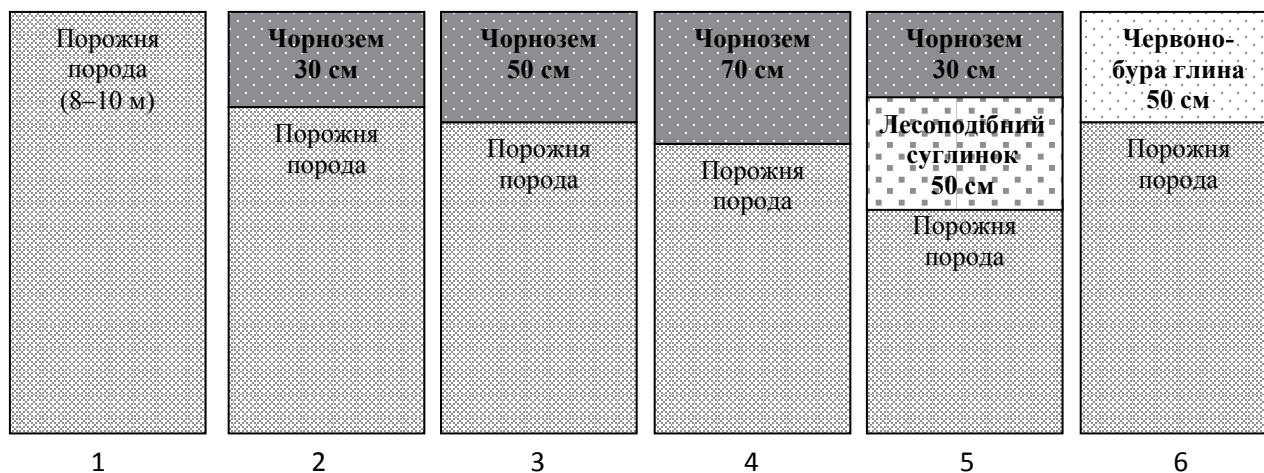


Рис. 1. Варіанти рекультивації відвалів (шахта «Павлоградська», Західний Донбас)

Що стосується забезпеченості ґрунтів елементами мінерального живлення рослин, то родючими вважаються ґрунти, якщо в середньому вміст PO_4^{3-} становить 500–1000 мг/кг. Отримані результати вказують на недостатній рівень вмісту доступної для рослин форми фосфору в усіх дослідних точках – він коливається від $6,5 \pm 0,83$ до $7,7 \pm 0,94$ мг/кг.

Ґрунтові концентрації NH_4^+ та NO_3^- залежать від біологічної активності, отже, можуть коливатися залежно від умов, таких як температура і вологість. Нітрати легко вилуговуються з ґрунту великою кількістю опадів. Типовими концентраціями катіону NH_4^+ у ґрунті вважаються 0,2–1,0 мг/кг; аніону NO_3^- концентрації, які не перевищують 130 мг/кг. Вміст катіону NH_4^+ у ґрунті дослідних ділянок є в межах від $4,72 \pm 0,42$ до $6,2 \pm 0,36$ мг/кг, а вміст аніону NO_3^- – від $18,8 \pm 4,91$ до $41,3 \pm 12,32$ мг/кг.

Загалом, результати свідчать про недостатню кількість доступного рослинам форм азоту та фосфору.

Накопичення важких металів у ґрунті протягом певного періоду часу може призвести до надмірного поглинання цих елементів рослинами.

Після аналізу вмісту 11 елементів у шарі ґрунту 0–20 см серед них виявили перевищення норми вмісту важких металів у 6 (у порядку убування) – $\text{As} > \text{Fe} > \text{Co} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cr}$.

Результати дослідження біогеохімічних показників за важкими металами в дикорослих культурах на ділянках рекультивації. У наших дослідженнях із ділянок рекультивації були відібрані зразки двох спонтанно-зростаючих видів рослин: *Bromopsis inermis* (росте на всіх ділянках рекультивації) і *Lathyrus tuberosus* (трапляється тільки на 3-ій ділянці з найбільш товстим шаром чорнозему – 70 см).

Кострець безостий (*Bromopsis inermis*) – багаторічний кореневищний злаковий вид озимо-ярого типу розвитку. Це цінний універсальний вид, незамінний на схилах, які піддаються водній та вітрової ерозії, витримує затоплення. Кормова цінність трави висока, її добре поїдають усі види тварин завдяки високій кількості вегетативних пагонів. Добре росте на різних типах ґрунтів, малопридатні для нього кислі, засолені та заболочені ґрунти. Швидко витісняє з травостою інші трави. Культура має високу зимо- та холодостійкість, посухостійка й тіневитривала, проте не витримує високого рівня стояння підґрунтових вод.

Чина бульбиста (*Lathyrus tuberosus*) – багаторічна, холодостійка рослина з тонким стеблом, кормова

рослина, багата протеїнами, в потовщених коренях містяться запаси поживних речовин, відома як медоносна і декоративна рослина. Віддає перевагу супіщаним і суглинистим ґрунтам, помірній вологості та нейтральній кислотності ґрунту.

Аналіз умісту мікроелементів у ґрунтах і рослинних зразках показав, що з 37 елементів у 26 йде перевищення співвідношення коефіцієнта біологічного накопичення у *B. inermis* над *L. tuberosus* у 2–3 рази, Mn (6.9 раз), Cd (7.7 раз) і Ge у 20 разів, в інших 5 елементах (Mg, Cu, Zn, Mo, Rh) *L. tuberosus* накопичує більше, ніж *B. inermis* в 1–2 рази і є більш стійким до дії важких металів та інших токсичних елементів.

З 40 елементів, що аналізувалися, *B. inermis* проявив більшу здатність накопичувати 32 елементи, тоді як *L. tuberosus* активно накопичував лише 8 елементів. Співвідношення концентрацій як корисних, так і токсичних елементів, включно з важкими металами, а також рідкими металами, накопиченими в тканинах злакових і бобових рослин, представлені в такій послідовності: $\text{P} > \text{Mg} > \text{Cu} > \text{S} > \text{Zn} > \text{Mo} > \text{Rh} > \text{Re}$ (перевищення в діапазоні від 2,5 до 1 раз); $\text{Ge} > \text{Si} > \text{Mn} > \text{Cd} > \text{Cr} > \text{Co} > \text{U} > \text{Gd} > \text{Tb} > \text{Er} > \text{Dy} > \text{Tm} > \text{Sm} > \text{Ho} > \text{Nd} > \text{Yb} > \text{Lu} > \text{Th} > \text{Pr} > \text{Ce} > \text{Y} > \text{Eu} > \text{As} > \text{Sc} > \text{Al} > \text{V} > \text{La} > \text{In} > \text{Ga} > \text{Fe} > \text{Ag} > \text{Pb}$ (17,6–1,1 раз).

Результати досліджень біогеохімічних показників за рідкими елементами на ділянках рекультивації порід шахтних відвалів показали, що більшість рідких елементів не накопичується в тканинах рослин у концентраціях вище, ніж у ґрунтах. Встановлено, акумуляція германію у наземній частині *B. inermis* була у 20 разів більше порівняно з *L. tuberosus*. Водночас чина бульбиста поглинала родію в 1,04 рази більше, ніж кострець безостий.

Головні висновки. Проведений аналіз показав високий меліоративний потенціал досліджуваних видів рослин. На поширення та зріст дикорослих форм активний вплив здійснює якісний і кількісний склад мінерального живлення рослин.

Перспективи використання результатів дослідження базуються на можливості застосування дикорослих видів *Bromopsis inermis* та *Lathyrus tuberosus*, які зростають на дослідних ділянках рекультивації вугільних відвалів, для технологій фітореMediaції (очищення ґрунтів від важких металів та інших токсичних елементів) і фітомайнінгу з метою отримання рідких елементів.

Література

1. Kharytonov M.M. and Kroik A.A. Environmental Security of Solid Wastes in the Western Donbas Coal Mining Region, Ukraine. *Environmental Security and Ecoterrorism, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*, H. Alpas et al. (eds.). 2011. P. 129–138.
2. Klimkina I., Kharytonov M., Zhukov O. Trend Analysis of Water-Soluble Salts Leaching Along Surfaces of Reclaimed Mine Dumps in Western Donbass (Ukraine). *Environmental Research, Engineering and Management*. 2018. Vol. 74. No 2. P. 82–92.
3. Sheoran V., Sheoran A.S. and Poonia P. Soil Reclamation of Abandoned Mine Land by Revegetation: A Review. *International Journal of Soil, Sediment and Water*. 2010. Vol. 3: Iss. 2. Art. 13. ISSN: 1940-3259.
4. Баранов В.І., Книш І.М., Блайда І.А., Вашук С.П., Гавриляк М.С. Очерет звичайний – фіторедеміант важких металів у дренажних канавах породних відвалів вугільних шахт. *Біологічні Студії / Studia Biologica*. 2012. Т. 6. №1. С. 93–100. DOI: <https://doi.org/10.30970/sbi.0601.188>.
5. Ogoke E.C. Accumulation of Heavy Metal in Soil and Their Transfer to Leafy Vegetables with Phytoremediation Potential. *American Journal of Chemistry*. 2015. No 5(5). P. 125–131.
6. Timofeeva S.S., Ulrikh D.V., Timofeev S.S. Phytomining Perspectives in Rehabilitation of Mining and Industrial Areas of South Ural. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. DOI: 10.1088/1755-1315/66/1/012030.
7. Wiche O., Heilmeier H. Germanium (Ge) and rare earth element (REE) accumulation in selected energy crops cultivated on two different soils. *Minerals Engineering*. 2016. No 92. P. 208–215.
8. Wiche O., Szekely B., Kummer N.-A., Moschner C. and Heilmeier H. Effects of intercropping of oat (*Avena sativa* L.) with white lupin (*Lupinus albus* L.) on the mobility of target elements for phytoremediation and phytomining in soil solution. *International Journal of Phytoremediation*. 2016. DOI: 10.1080/15226514.2016.1156635.
9. Conesa H.M., Evangelou M.W.H., Robinson B.H. and Schulin R. A Critical View of Current State of Phytotechnologies to Remediate Soils: Still a Promising Tool? *The Scientific World Journal*. 2012. Vol. 84. Article ID 173829, 10 pages. DOI:10.1100/2012/173829.
10. Laço A., Radulov I., Berbecea A., Laço K., Crista F. The transfer factor of metals in soil-plant system. *Research Journal of Agricultural Science*. 2012. No 44 (3). P. 67–72.
11. Doležalová Weissmannová H., Pavlovský J. and Chovanec P. Heavy metal Contaminations of Urban soils in Ostrava, Czech Republic: Assessment of Metal Pollution and using Principal Component Analysis. *Int. J. Environ. Res*. 2015. 9(2):683-696. ISSN: 1735-6865.
12. Lu S.G. and Bai S.Q. Contamination and potential mobility assessment of heavy metals in urban soils of Hangzhou, China: relationship with different land uses. *Environmental Earth Science*. 2010. No 60. P. 1481–1490.
13. Готвянська В.О., Демура В.І. Розподіл та накопичення важких металів в ґрунтово-рослинному покриві в умовах техногенного впливу. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: «Геологія. Географія»*. 2014. Вип. № 15. ISSN: 2313-2159.