

## **ВИКОРИСТАННЯ БІОЧАРУ І МІСКАНТУСУ ГІГАНТСЬКОГО (*MISCANTHUS GIGANTEUS*) ДЛЯ РЕМЕДІАЦІЇ ҐРУНТУ, ЗАБРУДНЕНОГО НАФТОПРОДУКТАМИ**

Досліджено динаміку основних показників хімічного складу ґрунту, забрудненого нафтопродуктами, під час вирощування міскантусу гігантського (*Miscanthus giganteus*) та додавання біочару (біовугілля). Проаналізовано можливість використання культури міскантусу і добрива для ремедіації ґрунту за умов забруднення дизельним паливом. Під час вегетації рослин встановлено зниження у ґрунті вмісту нітратів, фосфору і калію та зростання амонію. Найзначніше зменшення концентрації нафтових вуглеводнів у ґрунті було відмічено за умов одночасного додавання біочару і вирощування культури міскантусу, що може ефективно використовуватися для ремедіації земель, забруднених нафтопродуктами.

*Ключові слова:* ґрунт, хімічний склад, ремедіація, міскантус, нафтопродукти.

Розвиток промислового виробництва у сучасному світі супроводжується збільшенням видобутку та споживання вуглеводневої сировини. У зв'язку з цим часто виникає проблема забруднення ґрунтів, поверхневих ґрунтових вод та інших компонентів ландшафтів нафтопродуктами [16, 23].

В Україні найзабрудненішими об'єктами є ґрунти та поверхневі води. У ґрунтах погіршуються агрофізичні та агрохімічні властивості, змінюється кислотно-лужна рівновага, знижується активність ґрунтових ферментів, що здійснюють реакції гідролізу складних сполук і каталізують окисно-відновні реакції, змінюється рухливість Нітрогену, Фосфору, Калію та інших елементів і, отже, їх доступність для рослин. Забруднення відбувається при видобуванні нафти, транспортуванні, під час її зберігання, перероблення, заправки автомобілів, закачування до резервуарів на АЗС, у результаті витоків, аварій, протікань, випарів [8, 15].

Вид нафтопродуктів визначає гранично допустимі концентрації (ГДК) нафтових забруднень у ґрунтах. Встановлено ГДК для бензолу – 0,3 мг/кг, толуолу – 0,3 мг/кг, ксилолу – 0,3 мг/кг. У 2020 році в Україні було визначено величину ГДК загального вмісту нафтопродуктів (НП) у ґрунті на рівні 1000 мг/кг [12].

Відомим та екологічно прийнятним є використання рослин для відновлення забруднених ґрунтів [18, 28]. Їх позитивна роль пов'язана зі здатністю оптимізувати властивості ґрунтів, активувати діяльність мікробних угруповань, і, як наслідок, інтенсифікувати процеси видалення забруднювальних речовин [28].

Міскантус гігантський є перспективною енергетичною культурою, що використовується для ремедіації маргінальних та забруднених земель [25]. Ця рослина демонструє швидке зростання і високу врожайність на ґрунтах різного антропогенного походження і входить до числа рекомендованих біопаливних культур у країнах з обмеженими енергетичними ресурсами. У роботах [26, 27] описується успішне застосування цієї рослини для фіторемердіації та оздоровлення ґрунту.

Перспективним напрямком підвищення родючості ґрунту є внесення біочару (біовугілля), що є твердою фракцією різних сполук, які утворюються за термічного розкладання біомаси в умовах обмеженого надходження кисню або повної його відсутності. Склад і властивості добрива варіабельні та залежать від умов піролізу і типу вихідної сировини – відходи міст, сільського та лісового господарства [30].

Біовугілля впливає на властивості ґрунту за рахунок високого рівня рН, значної питомої поверхні, великої пористості, здатності до катіонного обміну, а також значного вмісту К, Р<sub>2</sub>О<sub>5</sub>, NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, органічного С тощо [26, 30].

Тому актуальним є питання знешкодження нафтових вуглеводнів, зменшення їх токсичної дії та ремедіації забруднених земель з використанням культури міскантусу і внесення біовугілля.

### Матеріали і методи досліджень

Для проведення експерименту відбирали ґрунт з території агробіологічної лабораторії Тернопільського національного педагогічного університету ім. Володимира Гнатюка відповідно до ДСТУ ISO 11464:2007 [7].

Ґрунт просували до постійної ваги на повітрі та просівали для видалення каміння і залишків рослин (діаметр вічка сита – 3 мм). Для штучного забруднення ґрунту використовували дизельне паливо (ДП) екологічного класу Євро – 4 [4].

Було проведено дві серії досліджень. У першій серії експериментів для вирощування культури міскантусу гігантського використовували ґрунт, штучно забруднений дизельним паливом. Концентрації ДП становили 0; 0,25; 1,0; 3,0 та 5,0 г/кг. Змішування ґрунту з ДП здійснювали в бетономішалці. У виборі концентрацій опиралися на градацію забрудненості ґрунтів, розроблену Ю. І. Піковським (1993) [11], де вказано, що концентрації ДП від 100 до 500 мг/кг вважаються підвищеним фоном, концентрації від 500 до 1000 мг/кг належать до помірного забруднення (низького), від 1000 до 2000 мг/кг – до помірно небезпечного (високого), від 2000 до 5000 мг/кг – до сильного небезпечного забруднення, а понад 5000 мг/кг – до дуже сильного забруднення.

У другій серії досліджень до ґрунту додавали біочар (біовугілля), вміст якого становив 5 %. Для дослідження використовували біочар фірми Amteco (Czech Republic) із мулу (human waste of Brno) [21]. Під час вимішування до суміші ґрунт+біочар додавали такі ж, як у першій серії експерименту, концентрації ДП.

Експеримент проводили у вегетаційних посудинах у теплиці. Дно ємностей заповнювали дренажним матеріалом – керамзитом, масою 1,0 кг, який накривали марлею та зверху засипали річковим піском масою 1,0 кг, який знову накривали марлею. Після цього у вегетаційні посудини засипали підготовлену повітряно-суху ґрунтову суміш масою 8,0 кг.

Вологість субстрату під час експерименту підтримували на рівні 60 % ПВ ваговим методом. Для поливу використовували відстояну водопровідну воду. Для запобігання пересихання ґрунту після висаджування рослин поверхню мульчували піском масою 1,0 кг.

У дослідях використовували міскантус гігантський (*Miscanthus giganteus* J.M. Greef & Deuter ex Hodkinson and Renvoize) (*M. giganteus*) [9]. Кореневища-ризоми трирічного віку рослин сорту Осінній зорець отримали із плантації у Загребі, Хорватія.

У кожному вегетаційну посудину висаджували дві ризоми міскантусу на глибину 10 см. Повторення варіантів 3-разове. Одночасно було виконано варіанти з ґрунтом та ґрунтом і біочаром без висаджування рослин. Схема експерименту наведена в таблиці.

Таблиця

Схема експерименту

Варіант досліджу	Ґрунт з міскантусом (повторення 1–3)			Ґрунт без міскантуса
	Концентрація нафтопродуктів, г/кг			
	1	2	3	4
1A	0	0	0	0
1B	0,25	0,25	0,25	0,25
1C	1,00	1,00	1,00	1,00
1D	3,00	3,00	3,00	3,00
1E	5,00	5,00	5,00	5,00
	Ґрунт + біочар з міскантусом (повторення 1–3)			Ґрунт + біочар без міскантуса
	1	2	3	4
2A	0	0	0	0
2B	0,25	0,25	0,25	0,25

<i>Продовження таблиці</i>				
2С	1,00	1,00	1,00	1,00
2D	3,00	3,00	3,00	3,00
2E	5,00	5,00	5,00	5,00

Під час росту рослин *M. giganteus* визначали хімічні показники ґрунту, використовуючи стандартні методики. Відбір проб ґрунту здійснювали на початку досліду – сходи рослин (квітень), у середині вегетації міскантусу (червень) та в кінці вегетації культури (вересень). Вміст нітратного та амонійного азоту визначали методом іонселективної потенціометрії відповідно до ДСТУ 4725:2007 [3]. Рухомі форми Фосфору та Калію – методом Чирикова [2]. Обмінну кислотність визначали на іономірі АІ 123 з ґрунтової витяжки (1 М розчин КСl) відповідно до ДСТУ ISO 10390:2001 [6]. Вимірювання вмісту нафтопродуктів у ґрунті здійснювали методом інфрачервоної спектроскопії за допомогою концентратоміру КН-2М (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів).

Статистична обробка даних проводилася за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel.

### Результати досліджень та їх обговорення

Нітроген – один із найважливіших макроелементів, без участі якого неможливий розвиток рослин. Він відповідає за обмін речовин, знаходиться у складі всіх білків, цитоплазми, ядер клітин, амінокислот, хлорофілу, гормонів, вітамінів та інших сполук. Рослини використовують азот у вигляді солей амонію ( $\text{NH}_4^+$ ) та нітратів ( $\text{NO}_3^-$ ) [1].

Аналіз отриманих результатів показав, що вміст нітратів був практично у два рази вищим у ґрунті, який збагачувався біочаром (рис. 1, 2).

Разом з тим у першій серії дослідів (без внесення біовугілля) було відмічено зменшення кількості нітрат аніонів за час вегетації культури міскантусу від квітня до вересня. Особливо значна утилізація нітратів виявлена за період від червня до вересня, коли їх вміст зменшувався у середньому в 3–5 разів. Найменші концентрації іонів  $\text{NO}_3^-$  було встановлено за підвищеної концентрації ДП (групи С, D і E) (рис. 1).

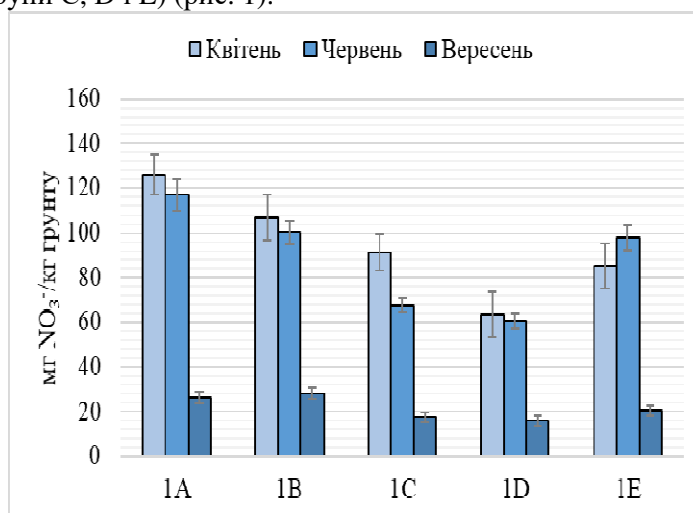


Рис. 1. Динаміка вмісту нітрат іонів у ґрунті під час вегетації міскантусу ( $M \pm m$ ,  $n=3$ ).

*Примітка:* Тут і далі 1A – контроль (без додавання дизельного палива), 1B – 0,25 мг/кг, 1C – 1 мг/л, 1D – 3 мг/л, 1E – 5 мг/л.

Інший характер динаміки вмісту нітратів зафіксовано в другій серії дослідів із додаванням до ґрунту біочару (рис. 2). Було встановлено зростання концентрації нітратів від квітня до червня в середньому в 1,2–1,3 раза. Очевидно, збільшення вмісту  $\text{NO}_3^-$  пов'язане з сорбційними процесами в системі «біочар-ґрунт», наявністю його у добриві, спрямованістю мікробіологічних процесів перетворення сполук Нітрогену тощо. За час червень-вересень

проходило зменшення кількості нітратів. Ця тенденція характерна для різної рослинності через високу доступність для неї  $\text{NO}_3^-$  [1]. Особливо значне використання нітратного Азоту рослинами було відзначене у групах В, С, D, Е, де ґрунт був забруднений ДП. Так, у групі Е вміст іонів  $\text{NO}_3^-$  знижувався у 3,8 раза, що, ймовірно, обумовлено активним використанням Нітрогену для адаптації рослин до токсичного чинника.

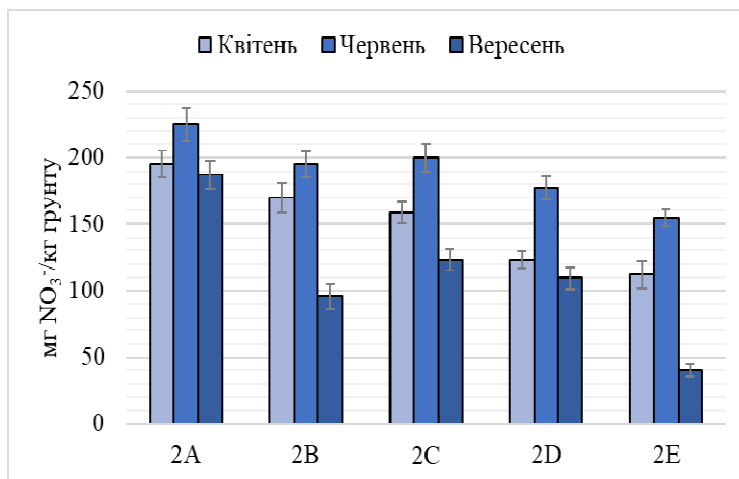


Рис. 2. Динаміка вмісту нітрат іонів у ґрунті з додаванням біочару під час вегетації міскантусу ( $M \pm m$ ,  $n=3$ ).

Таким чином, внесення біочару у ґрунт збагачувало його нітратами, які рослини міскантусу гігантського активно асимілювали. Особливо активним поглинання нітрат аніонів було у другій серії експерименту, коли ґрунт+біочар були забруднені ДП.

Амонійний Нітроген, хоч менш доступний рослинам, але необхідний на ранніх стадіях їх розвитку [1]. Аналіз отриманих результатів показав, що кількість амонійного Азоту в ґрунті є на порядок нижчою ніж нітратного (рис. 3, 4). Разом з тим, динаміка концентрації іонів  $\text{NH}_4^+$  носила протилежний характер порівняно з іонами  $\text{NO}_3^-$ . Так, у першій серії досліджень було відмічене пропорційне зростання кількості амонійного Нітрогену від квітня до вересня (рис. 3). Необхідно зазначити, що внесення у ґрунт нафтових вуглеводнів мало впливало на концентрацію катіонів амонію, за винятком групи 1Е, де в період від червня до вересня їх вміст практично не змінювався (рис. 3).

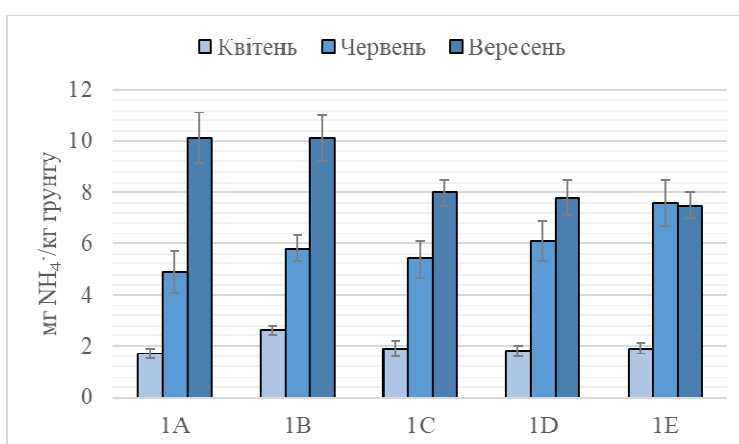


Рис. 3. Динаміка вмісту  $\text{NH}_4^+$  іонів у ґрунті під час вегетації міскантусу ( $M \pm m$ ,  $n=3$ ).

Внесення біовугілля в ґрунт суттєво збагатило його амонійним Нітрогеном (рис. 4). Концентрація його зростає у порівнянні з ґрунтом без добрива у 3–4 рази, проте зміна вмісту іонів  $\text{NH}_4^+$  була такою ж, як у першій серії дослідження – кількість катіонів амонію за період

вегетації зростала. Ймовірно, відбуваються процеси амоніфікації, вивільняється Нітроген органічних сполук, у тому числі нафтопродуктів, який перетворюється на амонійну форму завдяки інтенсивній мікробіологічній діяльності [29].

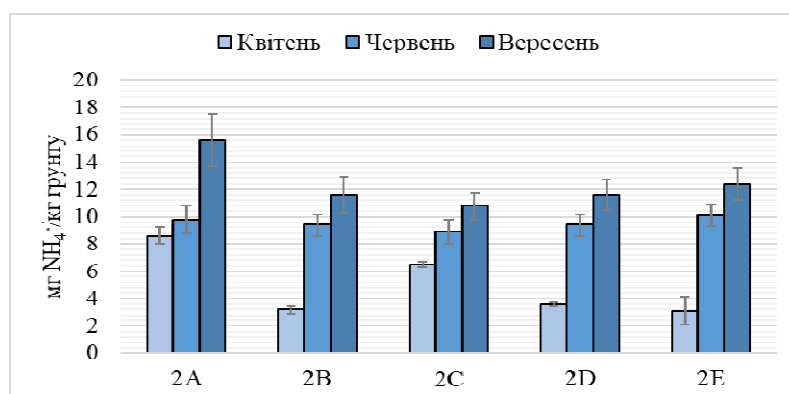


Рис. 4. Динаміка вмісту NH<sub>4</sub><sup>+</sup> іонів у ґрунті з додаванням біочару під час вегетації міскантусу (M±m, n=3).

Отже, вміст NH<sub>4</sub><sup>+</sup> в обох серіях експерименту постійно зростав до закінчення вегетації. Очевидно, таку динаміку зміни сполуки можна пов'язувати із загально відомим фактом, що амонійний Нітроген засвоюється меншою мірою рослинами, у нашому випадку *M. giganteus*, порівняно з нітратною формою. Також зростання вмісту катіонів амонію може бути додатково викликано діяльністю ґрунтових мікробів у ризосфері рослини, що сприяє накопиченню амонійного Нітрогену в ґрунті [29].

Як показали дослідження вмісту Фосфору в першій серії експерименту (забруднений ґрунт ДП без біочару), його динаміка мала подібний характер із нітратним Азотом. Відмічено зменшення кількості ортофосфат іонів від квітня до вересня. Особливо активно Фосфор засвоювався в період від червня до вересня. Так, його концентрація у ґрунті зменшувалася у групах 1A, 1B, 1C, 1D та 1E у 4,6, 5,7, 4,8, 3,8 та 5,0 разів відповідно (рис. 5).

Зазначене поглинання сполук фосфору можна пояснити тим, що під час росту *M. giganteus* інтенсивно нарощує кореневу систему та активно поглинає поживні речовини [24].

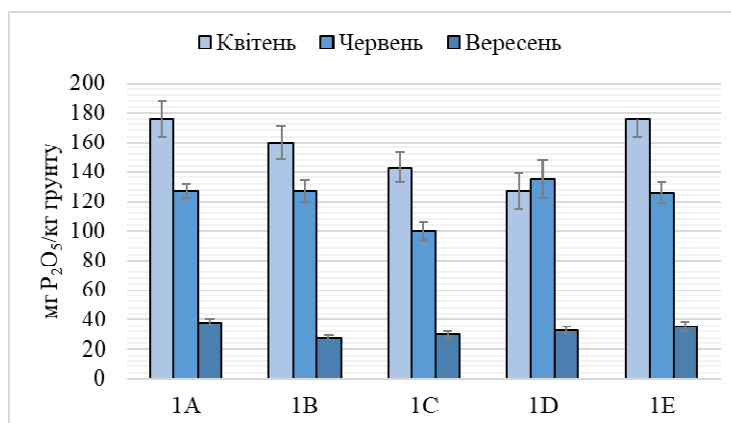


Рис. 5. Динаміка вмісту Фосфору у ґрунті під час вегетації міскантусу (M±m, n=3).

Аналіз результатів другої серії досліджень показав, що в період від квітня до червня було відмічено зростання неорганічного фосфору, що, очевидно, пояснюється активним надходженням його у ґрунт із біовугілля. Особливо помітне збільшення концентрації ортофосфатів було встановлено для груп 2D та 2E, де їх вміст зростав у 3,1 та 1,8 раза. За період від червня до вересня рослини міскантусу гігантського активно поглинали доступні форми елемента, проте, за винятком контрольної групи (2A), концентрація фосфору в ґрунті не

знизилась до показників на початку експерименту, що вказує на його високе надходження із біочару (рис. 6).

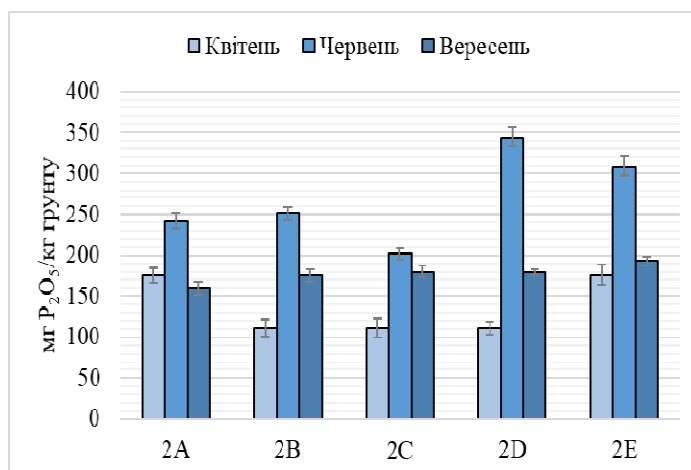


Рис. 6. Динаміка вмісту фосфору у ґрунті з додаванням біочару під час вегетації міскантусу ( $M \pm m$ ,  $n=3$ ).

Очевидно, що під час вегетації рослини міскантусу гігантського активно поглинали водорозчинні форми фосфору, особливо у період з червня до вересня, а внесення біочару є суттєвим джерелом цього елемента.

Як показали результати проведених досліджень, вміст Калію у контамінованому ДП ґрунті від квітня до червня знижувався у групах 1A, 1B, 1C, 1D та 1E на 15, 50, 18, 20 та 22 % відповідно (рис. 7). Ще суттєвішим поглинанням калію рослинами *M. giganteus* було за період від червня до вересня, коли вміст даного макроелемента зменшувався в контрольній та дослідних групах на 35, 50, 66, 60 та 32 %, що, очевидно, пов'язано з активним ростом та накопиченням біомаси рослинами.

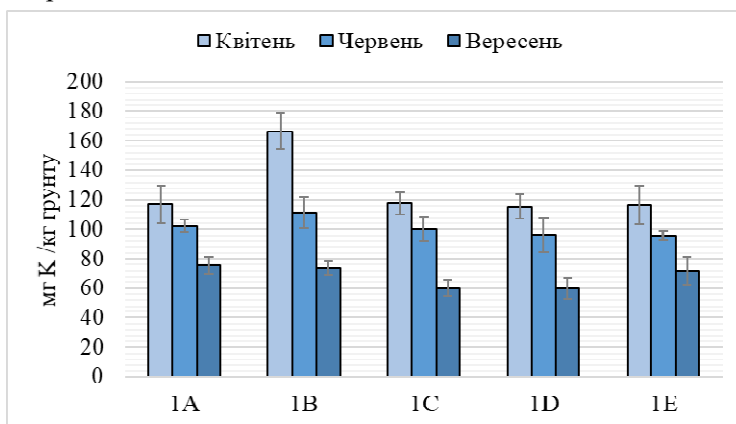


Рис. 7. Динаміка вмісту Калію у ґрунті під час вегетації міскантусу ( $M \pm m$ ,  $n=3$ ).

Результати експериментів, коли для вирощування міскантусу використовували ґрунт з додаванням 5 % біочару, були відмінними від першої серії досліджень, хоча вміст калію у квітні був практично однаковим і становив близько 120 мг/кг ґрунту (рис. 8).

Під час росту міскантусу від квітня до червня встановлено незначне зростання вмісту Калію, за винятком групи 2E (вміст ДП максимальний). Очевидно, мало місце з одного боку поглинання іонів  $K^+$  рослинами, а з іншого – переважаюче надходження даного елемента у ґрунтовий розчин з біовугілля. У кінці вегетації виявлено подальше зниження кількості Калію, особливо у групах 2B та 2C, де його кількість зменшилась на 136 та 91 % щодо червня. Разом з тим, у 2E групі поглинання елемента було мінімальним, що може бути пов'язано з пригніченням росту рослин високими концентраціями нафтових вуглеводнів [13, 26].

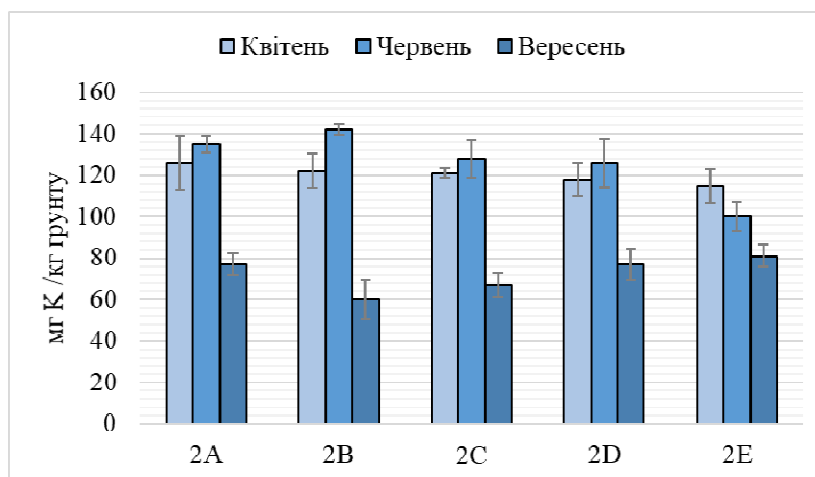


Рис. 8. Динаміка вмісту калію у ґрунті з додаванням біочару під час вегетації міскантусу ( $M \pm m$ ,  $n=3$ ).

Необхідно відзначити, що у цілому до ґрунту з біочаром вносилися додаткова кількість Калію, який активно використовувався рослинами. Найменша кількість калію в обох серіях досліджень поглиналася рослинами в Е групі, де вміст ДП у ґрунті був найвищим – 5 г/кг.

Реакція ґрунтового середовища, або рН, є ознакою, від якої багато в чому залежать агрохімічні властивості ґрунтів і ріст рослин. Кислотність виникає через присутність у ґрунтовому розчині та на колоїдах іонів  $H^+$  [22].

Аналіз отриманих результатів показав, що показники рН ґрунту дослідних груп на початку експерименту (квітень) були дещо вищими щодо контролю (рис. 9), що пояснюється відомим можливим ефектом підлучення нафтовим забрудненням [10].

У період від квітня до вересня показники обмінної кислотності, за винятком варіанту 1С, де прослідковується зниження рН, змінювались мало (рис. 9).

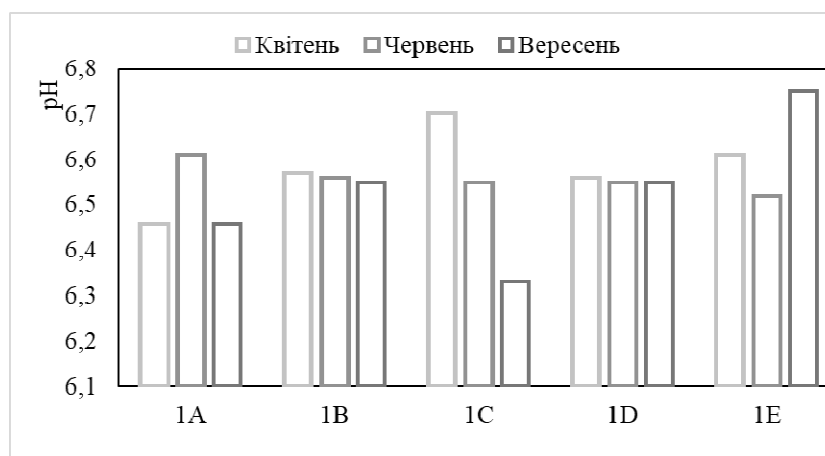


Рис. 9. Динаміка рівня рН у ґрунті під час вегетації міскантусу ( $M \pm m$ ,  $n=3$ ).

Біочар вважається добавкою, що оптимізує стан ґрунту, у тому числі його кислотно-основний баланс, стимулює розвиток рослин та їх біопараметри [19]. Як правило, додавання біовугілля в ґрунт призводить до зростання значення рН, збільшення вмісту Карбону та інших поживних речовин [20].

Отримані результати показали, що в другій серії досліджень показники рН ґрунту були в середньому на 0,2–0,3 вищими у порівнянні з першою серією експерименту, що може обумовлюватися насамперед додаванням біочару, а не ДП (рис. 10). Разом з тим, з квітня до вересня під час вегетації рослин відмічалася загальна тенденція до зниження рН у всіх варіантах (А-Е).

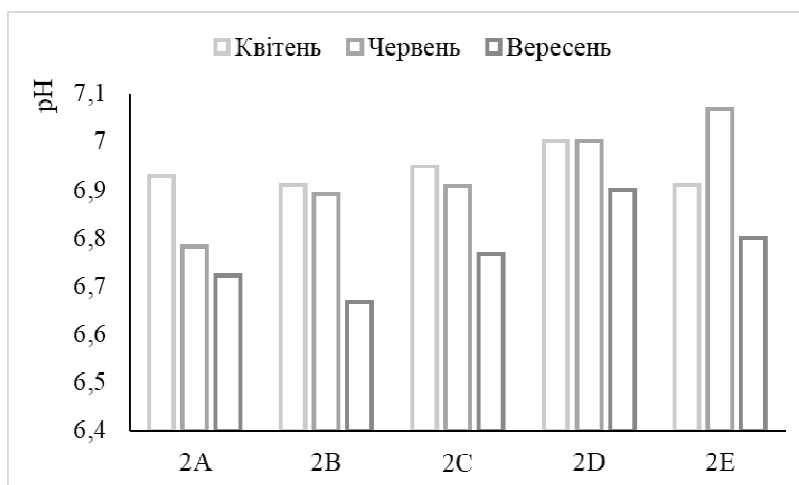


Рис. 10. Динаміка рівня рН у ґрунті з додаванням біочару під час вегетації міскантусу ( $M \pm m$ ,  $n=3$ ).

Отже, в цілому, додавання біочару сприяло зміцненню кислотно-основної рівноваги в бік залужнення, проте після завершення вегетації міскантусу (вересень) виявлено зниження значення рН сольової витяжки ґрунту.

Після потрапляння у ґрунт нафтопродуктів у його товщі відбувається вертикальне і латеральне (горизонтальне) розділення забруднювача. Нафта і нафтопродукти, будучи багатокомпонентними сумішами, під час внутрішньоґрунтової міграції піддаються диференціації: високомолекулярні компоненти сорбуються у верхньому гумусовому горизонті, а низькомолекулярні надходять у нижні шари через вищу їх розчинність у воді. Таким чином, концентрація смолистих речовин у верхніх горизонтах ґрунту в кілька разів більша, ніж у нижніх генетичних горизонтах. Було встановлено, що на акумуляцію і трансформацію вуглеводнів нафти у ґрунті впливає дуже велика кількість факторів. Зокрема, важливе значення має інтенсивність забруднення, склад самої нафти, гранулометричний склад ґрунту, його вологість, щільність, структурність, рельєф місцевості, температура, рівень засолення ґрунтових вод, тип водного режиму та ін. [17].

У досліді на основі ІЧ-спектроскопії було оцінено вміст нафтопродуктів у ґрунті без біочару (1 серія) та ґрунті з біочаром (2 серія) на початку вегетації (квітень) та в кінці вегетації (вересень) рослин *M. giganteus* (рис. 11, 12).

Аналіз отриманих результатів показав, що вже на початку експерименту додавання біочару до ґрунту обумовлювало зменшення вмісту ДП у варіантах С, D та E, де концентрації нафтових вуглеводнів перевищували ГДК (рис. 11).

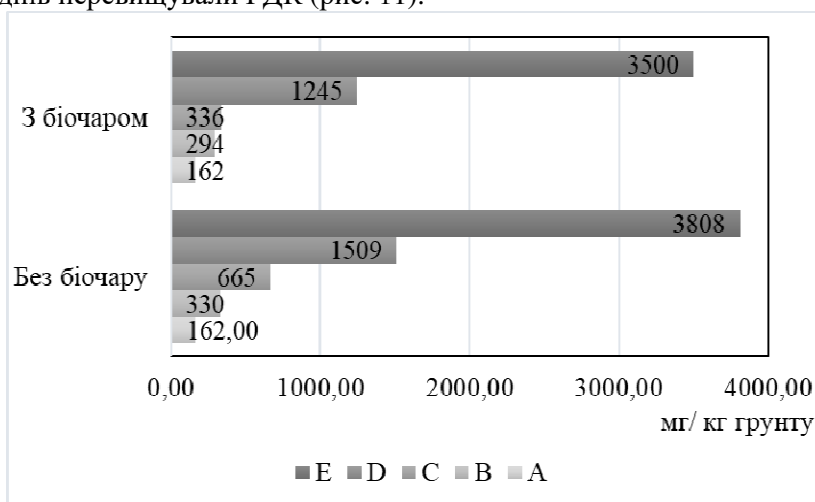


Рис. 11. Вміст ДП у ґрунті на початку експерименту (квітень).



У процесі вегетації міскантусу з квітня до вересня встановлено зниження концентрації нафтопродуктів у ґрунті в середньому в 1,5–1,7 раза (рис. 12). Особливо помітне зменшення кількості ДП було виявлено в Е групі з біочаром – від 3500 до 1650 мг/кг ґрунту.

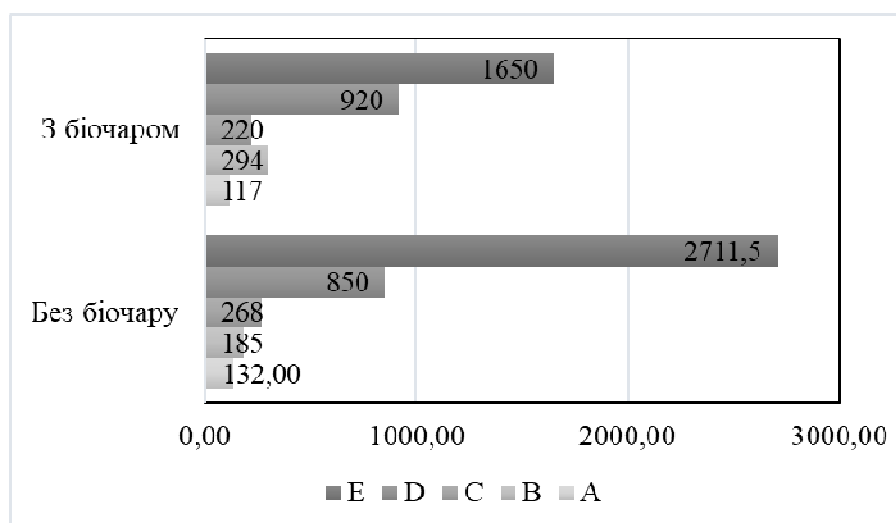


Рис. 12. Вміст ДП у ґрунті в кінці експерименту (вересень).

Процес деградації НП доволі складний і включає низку як хімічних, так і біологічних процесів. Щоб з'ясувати роль міскантусу гігантського у процесах знешкодження ДП, нами було проведено «холостий» експеримент, де ґрунт та ґрунт з біочаром були забруднені НП, але рослин не висаджувались (рис. 13).

Аналіз отриманих результатів виявив, що за відсутності рослин вміст НП у кінці експерименту був вищим у середньому в 1,1–1,3 раза, ніж у ґрунті та ґрунті з біочаром, де вирощувався міскантус.

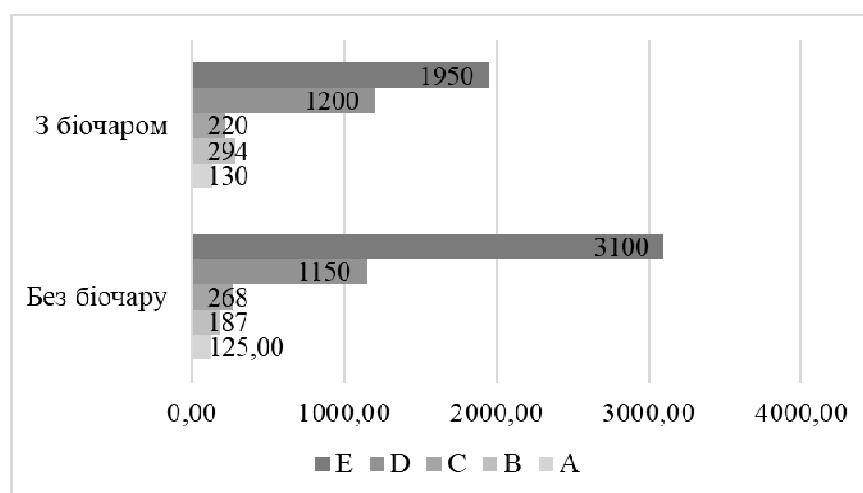


Рис. 13. Вміст ДП у ґрунті без *Miscanthus giganteus* у кінці експерименту («холостий» дослід).

Отже, найбільш помітне зниження кількості нафтопродуктів у ґрунті відбувається за умов додавання біочару та вирощування культури міскантусу, що може ефективно використовуватися для ремедіації земель, які забруднені нафтопродуктами.

#### Висновки

Внесення біочару у ґрунт збагачувало його нітратним Азотом, який рослини активно асимілювали в процесі вегетації. Особливо активним поглинання нітрат аніонів культурою

міскантусу було у другій серії експерименту, коли ґрунт+біочар були забруднені ДП. Вміст  $\text{NH}_4^+$  в обох серіях експерименту зростає протягом вегетації, що, у першу чергу, пов'язано із відомою меншою засвоєвальною здатністю рослинами амонійного азоту, ніж нітратного.

Внесення біочару було суттєвим джерелом Фосфору у ґрунті. Рослини міскантусу гігантського активно поглинали водорозчинні форми цього елемента, особливо в період з червня до вересня.

У ґрунт з біочаром вносилися додаткова кількість Калію, який активно використовувався культурою *M. giganteus*. Найменше Калію в обох серіях досліджень поглиналося рослинами за найвищого (5 г/кг) вмісту дизельного палива в ґрунті.

Внесення в ґрунт нафтопродуктів незначною мірою впливало на зростання обмінної кислотності. Додавання біочару сприяло зміщенню кислотно-основної рівноваги в бік залуження, проте під завершення вегетації міскантусу (вересень) відбувалось зниження рН сольової витяжки ґрунту.

Найзначніше зменшення концентрації дизельного пального у ґрунті відбувається за умов одночасного додавання біочару і вирощування культури міскантусу, що може ефективно використовуватися для ремедіації земель, забруднених нафтопродуктами.

Подяка професору Павлу Шаповалу (Національний університет «Львівська політехніка», Україна) за визначення нафтопродуктів у ґрунті.

1. Ґрунтознавство: підручник / Д. Г. Тихоненко та ін.; за ред. Д. Г. Тихоненка. Київ : Вища освіта, 2005. 703 с.
2. ДСТУ 4115:2002. Ґрунти. Визначення рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Чирикова. [Чинний від 2003-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 2002. 12 с.
3. ДСТУ 4725:2007. Якість ґрунту. Визначення активності іонів калію, амонію, нітрату і хлору потенціометричним методом. [Чинний від 2008-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 22 с.
4. ДСТУ 7688:2015. Паливо дизельне Євро. Технічні умови. [Чинний від 2016-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 16 с.
5. ДСТУ 7861:2015. Якість ґрунту. Визначення обмінних кальцію, магнію, натрію і калію в ґрунті за Шолленбергером у модифікації ННЦ ІГА імені О. Н. Соколовського [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 12 с.
6. ДСТУ ISO 10390:2001. Якість ґрунту. Визначення рН (ISO 10390:1994, IDT). [Чинний від 2003-07-01]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 2003. 14 с.
7. ДСТУ ISO 11464:2007. Якість ґрунту. Попереднє оброблення зразків для фізико-хімічного аналізу (ISO 11464:2006, IDT). [Чинний від 2009-10-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 12 с.
8. Мірошніченко М. М., Фатєєв А. І., Панасенко Є. В., Якушко В. І. Зміни родючості ґрунту при вуглеводневому забрудненні. *Вісник аграрної науки*. 2016. № 10. С. 52–54.
9. Міскантус в Україні : монографія / М. В. Роїк та ін. Київ : ТОВ «ЦП «Компрінт», 2019. 256 с.
10. Панасенко Є. В. Вплив агроеліоративних заходів на відновлення властивостей та родючості нафтозабрудненого чорнозему: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. с.-г. наук: 06.01.03. Харків, 2007. 24 с.
11. Пиковский Ю. И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М. : Изд-во МГУ, 1993. 208 с.
12. Про затвердження Гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті: Наказ Міністерства охорони здоров'я України 14 липня 2020 року № 1595. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20#Text>.
13. Терек О. І. Механізми адаптації рослин до нафтового забруднення. *Біологічні студії*. 2018. Т. 12, № 3–4. С. 141–164. DOI: <https://doi.org/10.30970/sbi.1203.579>.
14. Тесля А. В., Галактионова Л. В., Васильченко А. С. Оценка степени загрязнения типичных и южных черноземов Предуралья нефтепродуктами. *Вестник ОГУ*. 2013. № 6 (155). С. 92–95.
15. Фесенко І. М., Решетов І. А., Фесенко М. М. Оцінка та контроль впливу відходів буріння нафтогазових свердловин на ґрунті. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2013. С. 36–40.

16. Amellal N., Portal J., Berthelin J., Amellal N. Effect of soil structure on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons within aggregates of a contaminated soil. *Appl Geochem.* 2001. Vol. 16, № 14. P. 1611–1619. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0883292701000348>.
17. Duarte A., Cachada A., Rocha-Santos T. Soil Pollution: From Monitoring to Remediation. Academic Press, 2017. 313 p.
18. Flathman P. E., Lanza G. R. Phytoremediation: Current views on an emerging green technology. *Journal of Soil Contamination.* 1998. Vol. 7(4). P. 415–432. URL: <https://doi.org/10.1080/10588339891334438>.
19. Houben D., Evrard L., Sonnet P. Beneficial Effects of Biochar Application to Contaminated Soils on the Bioavailability of Cd, Pb and Zn and the Biomass Production of Rapeseed (*Brassica napus* L.). *Biomass Bioenergy.* 2013. Vol. 57. P. 196–204.
20. Luo Y., Lin Q., Durenkamp M., Dungait A., Brookes P. Soil Priming Effects Following Substrates Addition to Biochar-Treated Soils after 431 Days of Pre-Incubation. *Biol Fertil Soils.* 2017. 53 (3). P. 315–326. DOI: 10.1007/s00374-017-1180-6.
21. MA. Announcement of the Ministry of Agriculture Related Requests to the Fertilizers; Ministry of Agriculture: Prague, Czech Republic, 2000. Vol. N474/2000.
22. Manahan S. E. Soil environmental chemistry. Environmental Chemistry: Seventh Edition. Boca Raton : CRC Press LLC, 2000. P. 484–530.
23. Mirsal I. A. Sources of soil pollution. In Soil Pollution: Origin, Monitoring & Remediation. Springer Berlin Heidelberg: Berlin/Heidelberg, Germany, 2008. 312 p.
24. Monti A., Zatta A. Root Distribution and Soil Moisture Retrieval in Perennial and Annual Energy Crops in Northern Italy. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2009. Vol. 132. P. 252–259. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880909001108>.
25. Nsanganwimana F., Pourrut B., Mench M., Douay F. Suitability of Miscanthus Species for Managing Inorganic and Organic Contaminated Land and Restoring Ecosystem Services. A Review. *J. Environ. Manag.* 2014. Vol. 143. P. 123–134. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479714002163>.
26. Pidlisnyuk V., Herts A., Khomenchuk V., Mamirova A., Kononchuk O., Ust'ak, S. Dynamic of Morphological and Physiological Parameters and Variation of Soil Characteristics during Miscanthus × giganteus Cultivation in the Diesel-Contaminated Land. *Agronomy.* 2021. 11, Iss. 4, 798. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040798>.
27. Pidlisnyuk V.V., Shapoval P., Zgorelec Z., Stefanovska T., Zhukov O. Multiyear Phytoremediation and Dynamic of Foliar Metal(Loid)s Concentration during Application of Miscanthus giganteus Greef et Deu to Polluted Soil from Bakar, Croatia. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020. 27. P. 31446–31457. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-09344-5>.
28. Schnoor J. L. Phytoremediation of soil and groundwater; Technology Evaluation Report TE-02-01; Groundwater Remediation Technologies Analysis Centre (GWRTAC): Pittsburgh, PA, USA, 2002. 45 p.
29. Técher D., Martinez-Chois C., Laval-Gilly P., Henry S., Bennisroune A., D'Innocenzo M., Falla J. Assessment of Miscanthus ×giganteus for Rhizoremediation of Long Term PAH Contaminated Soils. *Appl. Soil Ecol.* 2012. Vol. 62. P. 42–49. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092913931200162X>.
30. Tomczyk A., Sokolowska Z., Boguta P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2020. 19. P. 191–215. URL: <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>.

## References

1. Gruntoznavstvo: pidruchnyk / D. H. Tykhonenko ta in.; za red. D. H. Tykhonenka. Kyiv : Vyscha osvita, 2005. 703 s. [in Ukrainian]
2. DSTU 4115:2002. Grunty. Vyznachennia rukhomykh spoluk fosforu i kaliuu za modyfikovanyim metodom Chyrykova. [Chynnyi vid 2003-01-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Derzhstandart Ukrainy, 2002. 12 s. [in Ukrainian]
3. DSTU 4725:2007. Yakist grunt. Vyznachannia aktyvnosti ioniv kaliuu, amoniiu, nitratu i khloru potentsiometrychnym metodom. [Chynnyi vid 2008-01-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2008. 22 s. [in Ukrainian]
4. DSTU 7688:2015. Palyvo dyzelne Yevro. Tekhnichni umovy. [Chynnyi vid 2016-01-01]. Vyd. ofits. Kyiv : DP «UkrNDNTs», 2015. 16 s. [in Ukrainian]
5. DSTU 7861:2015. Yakist grunt. Vyznachennia obminnykh kaltsiiu, mahniuu, natriuu i kaliuu v grunty za Shollenberherom u modyfikatsii NNTs IHA imeni O. N. Sokolovskoho [Chynnyi vid 2016-07-01]. Vyd. ofits. Kyiv : DP «UkrNDNTs», 2016. 12 s. [in Ukrainian]

6. DSTU ISO 10390:2001 Yakist gruntu. Vyznachannia rN (ISO 10390:1994, IDT). [Chynnyi vid 2003-07-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Derzhstandart Ukrainy, 2003. 14 s. [in Ukrainian]
7. DSTU ISO 11464:2007 Yakist gruntu. Poperednie obroblennia zrazkiv dlia fizyko-khimichnoho analizu (ISO 11464:2006, IDT). [Chynnyi vid 2009-10-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2007. 12 s. [in Ukrainian]
8. Mirosnychenko M. M., Fatieiev A. I., Panasenko Ye. V., Yakushko V. I. Zminy rodiuchosti gruntu pry vuhlevodnevomu zabrudnenni. *Visnyk ahrarnoi nauky*. 2016. № 10. S. 52–54. [in Ukrainian]
9. Miskantus v Ukraini : monohrafiia / M. V. Roik ta in. Kyiv : TOV «TsP «Komprint», 2019. 256 s. [in Ukrainian]
10. Panasenko Ye. V. Vplyv ahromelioryvnykh zakhodiv na vidnovlennia vlastyvosti ta rodiuchosti naftozabrudnenoho chornozemu: avtoref. dys... kand. s.-h. nauk: 06.01.03. Kharkiv, 2007. 24 s. [in Ukrainian]
11. Pikovskij Ju. I. Prirodnye i tehnogenne potoki uglevodorodov v okruzhajushhej srede. M. : Izd-vo MGU, 1993. 208 s. [in Russian]
12. Pro zatverdzhennia Hihienichnykh rehlamentiv dopustymoho vmistu khimichnykh rehovyn u gruntii: Nakaz Ministerstva okhorony zdorovia Ukrainy 14 lypnia 2020 roku № 1595. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20#Text>. [in Ukrainian]
13. Terek O. I. Mekhanizmy adaptatsii roslyn do naftovoho zabrudnennia. *Biologichni studii*. 2018. T. 12, № 3–4. S. 141–164. DOI: <https://doi.org/10.30970/sbi.1203.579>. [in Ukrainian]
14. Teslia A. V., Halaktyonova L. V., Vasylchenko A. S. Otsenka stepeny zahriazneniya tpychnykh y yuzhnykh chernozemov Preduralia nefteproduktamy. *Vestnyk OHU*. 2013. №6 (155). S. 92–95. [in Russian]
15. Fesenko I. M., Reshetov I. A., Fesenko M. M. Otsinka ta kontrol vplyvu vidkhodiv burinnia naftohazovykh sverdlovyn na grundy. *Ekolohiia dovkillia ta bezpeka zhyttiediialnosti*. 2013. S. 36–40. [in Ukrainian]
16. Amellal N., Portal J., Berthelin J., Amellal N. Effect of soil structure on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons within aggregates of a contaminated soil. *Appl Geochem*. 2001. Vol. 16, № 14. P. 1611–1619. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0883292701000348>.
17. Duarte A., Cachada A., Rocha-Santos T. Soil Pollution: From Monitoring to Remediation. Academic Press, 2017. 313 p.
18. Flathman P. E., Lanza G. R. Phytoremediation: Current views on an emerging green technology. *Journal of Soil Contamination*. 1998. Vol. 7 (4). P. 415–432. URL: <https://doi.org/10.1080/10588339891334438>.
19. Houben D., Evrard L., Sonnet P. Beneficial Effects of Biochar Application to Contaminated Soils on the Bioavailability of Cd, Pb and Zn and the Biomass Production of Rapeseed (*Brassica Napus* L.). *Biomass Bioenergy*. 2013. Vol. 57. P. 196–204.
20. Luo Y., Lin Q., Durenkamp M., Dungait A., Brookes P. Soil Priming Effects Following Substrates Addition to Biochar-Treated Soils after 431 Days of Pre-Incubation. *Biol Fertil Soils*. 2017. 53 (3). P. 315–326. DOI: 10.1007/s00374-017-1180-6.
21. MA. Announcement of the Ministry of Agriculture Related Requests to the Fertilizers; Ministry of Agriculture: Prague, Czech Republic, 2000. Vol. N474/2000.
22. Manahan S. E. Soil environmental chemistry. Environmental Chemistry: Seventh Edition. Boca Raton : CRC Press LLC, 2000. P. 484–530.
23. Mirsal I.A. Sources of soil pollution. In Soil Pollution: Origin, Monitoring & Remediation. Springer Berlin Heidelberg: Berlin/Heidelberg, Germany, 2008. 312 p.
24. Monti A., Zatta A. Root Distribution and Soil Moisture Retrieval in Perennial and Annual Energy Crops in Northern Italy. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2009. Vol. 132. P. 252–259. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880909001108>.
25. Nsanganwimana F., Pourrut B., Mench M., Douay F. Suitability of Miscanthus Species for Managing Inorganic and Organic Contaminated Land and Restoring Ecosystem Services. A Review. *J. Environ. Manag.* 2014. Vol. 143. P. 123–134. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479714002163>.
26. Pidlisnyuk V., Herts A., Khomenchuk V., Mamirova A., Kononchuk O., Ust'ak, S. Dynamic of Morphological and Physiological Parameters and Variation of Soil Characteristics during Miscanthus × giganteus Cultivation in the Diesel-Contaminated Land. *Agronomy*, 2021. 11, Iss. 4, 798. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040798>.
27. Pidlisnyuk V.V., Shapoval P., Zgorelec Z., Stefanovska T., Zhukov O. Multiyear Phytoremediation and Dynamic of Foliar Metal(Loid)s Concentration during Application of *Miscanthus giganteus* Greef et Deu to Polluted Soil from Bakar, Croatia. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020. 27. P. 31446–31457. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-09344-5>.

28. Schnoor J. L. Phytoremediation of soil and groundwater; Technology Evaluation Report TE-02-01; Groundwater Remediation Technologies Analysis Centre (GWRTAC): Pittsburgh, PA, USA, 2002. 45 p.
29. Técher D., Martinez-Chois C., Laval-Gilly P., Henry S., Bennisroune A., D’Innocenzo M., Falla J. Assessment of *Miscanthus x giganteus* for Rhizoremediation of Long Term PAH Contaminated Soils. *Appl. Soil Ecol.* 2012. Vol. 62. P. 42–49. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092913931200162X>.
30. Tomczyk A., Sokolowska Z., Boguta P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2020. 19. P. 191–215. URL: <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>.

V. O. Khomenchuk, A. I. Herts, O. B. Kononchuk, N. V. Herts

Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

#### USE OF BIOCHAR AND GIANT MISCANTHUS (*MISCANTHUS GIGANTEUS*) FOR REMEDIATION OF SOIL CONTAMINATED BY PETROLEUM PRODUCTS

The dynamics of changes in the chemical composition of soils contaminated with oil products during the vegetation of *Miscanthus giganteus*, as well as under the conditions of adding biochar (biochar) were studied. The possibility of using the culture of *Miscanthus* giant and biochar for soil remediation under conditions of oil pollution was analyzed. It was shown that the introduction of biochar into the soil enriched it with nitrate nitrogen, which was actively assimilated by giant miscanthus plants during the growing season. The absorption of nitrate anions by plants was especially active in the second series of the experiment, when the soil + biochar was contaminated with diesel fuel. It was established that the content of  $\text{NH}_4^+$  ions in both series of the experiment increased until the end of the growing season. Obviously, ammonium nitrogen is absorbed to a lesser extent by *M. giganteus* plants, compared to nitrate. The increase in ammonium content can be additionally caused by the activity of soil microbes in the rhizosphere of plants, which contributes to the accumulation of ammonium nitrogen in the soil. It has been shown that miscanthus plants actively absorbed water-soluble forms of phosphorus, especially in the period from June to September. The application of biochar was a significant source of phosphorus, although its release into the soil is a rather slow process. It was determined that additional amounts of potassium were added to the soil with biochar, which was actively used by the *M. giganteus* culture. The minimum amounts of potassium in both series of studies were absorbed by plants of E groups, where the content of diesel fuel in the soil was the highest. The introduction of petroleum products had a minor effect on the value of exchangeable acidity. The addition of biochar contributed to the shift of the acid-base balance in the direction of alkalinity, but after the end of the miscanthus vegetation (September), a decrease in the pH of the saline extract of the soil was noted. It is shown that the most noticeable decrease in the concentration of diesel fuel in the soil was noted under the conditions of adding biochar and after growing miscanthus, which can be effectively used for the remediation of lands contaminated by oil products.

*Key words:* soil, chemical composition, remediation, miscanthus, petroleum products.

Надійшла 07.12.2022.