

Оптимізація технології вирощування енергетичної культури *Panicum virgatum* L. на нафтозабрудненому ґрунті

Романюк О. І.¹, Шевчик-Костюк Л. З.¹, Долецька А. С.^{1,2}

¹Відділення фізико-хімії горючих копалин Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії імені Л. М. Литвиненка Національної академії наук України

²Львівський національний університет імені Івана Франка

romaniuk@ua.fm

Ключові слова: нафтозабруднений ґрунт, фіторе mediaція, енергетичні рослини, просо лозоподібне.

Відновлення земель України, порушених внаслідок воєнних дій є актуальним завданням сьогодення. Забруднена паливно мастильними матеріалами та нафтою частина цих земель може бути відновлена за участі енергетичних культур. Просо лозоподібне *Panicum virgatum* L. розглядається, як важлива енергетична культура, що широко використовується для виробництва енергії та може бути використане для відновлення земель. Метою роботи було оцінити ефективність технологій для оптимізації вирощування *P. virgatum* з подальшим використанням у фіторе mediaційних заходах з відновлення нафтозабруднених ґрунтів. Досліджено вплив сорбентів-меліорантів (сухих трав'яних решток/сіна, лушпиння соняшника), мінеральних добрив $(\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{K}_2\text{HPO}_4$ і гуматів (гуміфілд форте) на ріст рослин *P. virgatum* в умовах нафтового забруднення ґрунту (вміст нафти 5 %). Показано, що лушпиння соняшника є найбільш перспективним і доступним агентом пришвидшення фіторе mediaції. Вивчено залежності початкових ростових параметрів *P. virgatum*, від концентрацій розчинів гуматів і встановлено оптимальну концентрацію гуміфілд форте для передпосівної обробки насіння 0,1 г/л. Досліджено окремий і сумісний вплив сорбентів, мінеральних добрив, гуматів на ріст рослин проса лозоподібного. Найкращі результати отримано за сумісного використання, комплексу лушпиння соняшника + гуміфілд форте, що позитивно впливає на ростові показники *P. virgatum*: збільшення довжини кореня, висоти пагона та сумарного вмісту хлорофілів ($a+b$).

Ключові слова: нафтозабруднений ґрунт; фіторе mediaція; енергетичні рослини; просо лозоподібне.

The optimization of technology of growth of *Panicum virgatum* L. plants on the oil polluted soils

Romaniuk O. I.¹, Shevchyk-Kostiuk L. Z.¹, Doletska A. S.^{1,2}

¹Department of Physical Chemistry of Fossil Fuels of the Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry named after L. M. Lytvynenko of National Academy of Sciences of Ukraine

²Ivan Franko National University of Lviv

romaniuk@ua.fm

Key words: oil polluted soil, phytoremediation, energy crops, millet plant.

The remediation of soils of Ukraine, disturbed due to war affairs, is an important task nowadays. Millet plants (*Panicum virgatum* L.) is considered as an important energy crop, widely used for energy production and may be used for land reclamation. Our aim was a study the effectiveness of optimization of technology for the growth of *P. virgatum* plants with their subsequent usage for the remediation of oil-polluted soils. The influence of the following agents on the growth of *P. virgatum* plants under oil pollution of the soil (oil content 5%) was studied: sorbent-meliorants: dry grassy leftovers/hay, sunflower husk; mineral fertilizers: $(\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{K}_2\text{HPO}_4$; humates. It was shown that sunflower husk is the most promising and affordable agent, accelerating phytoremediation. The dependence of initial growth parameters of *P. virgatum* plants on the concentration of humate solutions (Humifild forte) was studied. It was found that the optimal concentration for seed pretreatment before sowing was equal to 0.1 g/l. An individual and combined influence of sorbents, mineral fertilizers, humates and on the growth of *P. virgatum* plants was studied. The best results were obtained under combined use of complex (sunflower husks + Humifield forte), which revealed a positive effect on growth parameters of *P. virgatum* plants: increase of shoot height, root length as well as total content of chlorophylls *a+b*.

Key words: oil polluted soil, phytoremediation, energy crops, millet plant.

Вступ

У світовому співтоваристві нафта та нафтопродукти є найважливішою стратегічною сировиною, що забезпечує зростання та розвиток економіки. Однак, збільшення світового виробництва й споживання продукції нафтохімічного комплексу супроводжується забрудненням компонентів довкілля небезпечними речовинами. Щорічно в результаті "природного витоку" і аварійних розливів на нафтопроводах та родовищах у навколишнє середовище потрапляє 5–10% від добутої нафти, що становить 1,7–8,8 млн т. Серед нафтових вуглеводнів особливу загрозу несуть поліциклічні ароматичні вуглеводні, які володіють високою токсичністю й стійкістю до розкладання. Ці речовини характеризуються біоаккумуляцією, є об'єктом трансграничного переносу в повітрі й воді, мають здатність накопичуватись у ґрунті й наземних екосистемах, осідати на великій відстані від джерел викидів¹.

В Україні на забруднення ґрунтів поліциклічними ароматичними вуглеводнями припадає понад 13,3% випадків, на забруднення мінеральними маслами – 33,7% випадків². Внаслідок воєн-

них дій збільшуватиметься відсоток забруднених ґрунтів нафтою та нафтопродуктами. Якщо в приземному шарі атмосфери та поверхневих водах високі концентрації нафти та нафтопродуктів спостерігатимуться нетривалий проміжок часу і через природне розведення знижуватимуться, то у ґрунтах забруднення накопичуватиметься і стане джерелом вторинного забруднення підземних та поверхневих вод.

На сьогодні для ліквідації нафтового забруднення існує широкий вибір різноманітних методів, проте серед усіх відомих способів очищення та рекультивации ґрунтів при помірному ступені забруднення, найбільш ефективними вважаються методи фіторемедіації³.

При фіторемедіації позитивний вплив рослин на нафтозабруднений ґрунт пояснюється тим, що рослини використовують вуглеводні нафти як додаткове харчування і сприяють поліпшенню газоповітряного режиму забрудненого ґрунту, збагачуючи його при цьому різними активними сполуками, що в кінцевому підсумку стимулює зростання кількості мікроорганізмів і, відповідно, розкладання нафти та нафтопродуктів. Вирощування енерге-

тичних рослин як фіторемедіантів на забруднених землях дозволить не лише знизити рівень деградації, а й підвищити агрономічну цінність ґрунтів. Відновлення техногенно забруднених ґрунтів фіторемедіацією та отримання цінної рослинної біомаси – альтернативного джерела енергії – комплексний підхід для успішного вирішення актуальних проблем забруднених територій.

Зв'язок фіторемедіації з енергетичними культурами – це вимога не лише сучасності, а й майбутнього. Енергетичні рослини дають значний урожай і мають невеликі вимоги до вирощування. В перерахунку на еквівалент енергії витрати на вирощування таких культур значно менші, ніж вартість енергоносіїв, отриманих від традиційних джерел⁴.

Однак, рекультивация забруднених територій за використання енергетичних культур та отримання селективної біомаси є непростим завданням, що потребує специфічного підходу як до типу забруднювача так і до можливостей адаптації потенційних енергетичних культур до несприятливих умов зростання на забруднених землях.

Найбільш складним забрудненням вважається нафтове через гідрофобність і високу токсичність нафти, значне порушення водоповітряного балансу та співвідношення основних мікроелементів живлення в ґрунті, що унеможливає вирощування більшості рослин. Тому перспективним є використання у фіторемедіаційних технологіях стійких до нафтового забруднення енергетичних культур та різноманітних агентів ремедіації: мінеральних добрив, гуматів, сорбентів для покращення умов зростання рослин та їх адаптації.

Як показують попередні дослідження просо лозоподібне (світчграс) (*Panicum virgatum* L.) толерантне до нафтового забруднення⁵, невибагливе до вмісту вологи та поживних речовин у ґрунті, здатне рости на різних типах ґрунтів⁶. *P. virgatum* – посухо- та морозостійка багаторічна рослина з родини злакових (*Gramineae*), яка формує потужну мичкувату кореневу систему, порожнисті стебла висотою до 3 м, з листками до 60 см. Рослина утворює суцвіття – волоть, розмножується насінням і поділом кореневищ. Урожайність сухої біомаси – до 25 т/га, насіння – 0,34–0,76 т/га¹. Основними шляхами використання проса лозоподібного в США та Канаді є виробництво електроенергії через газифікацію, комбіноване спалювання на вугільних заводах та виробництво етанолу для пального⁶.

Це дає підстави розглядати просо лозоподібне, як важливу енергетичну культуру з фіторемедіаційними можливостями.

Мета роботи – оцінити ефективність технологій для оптимізації вирощування *Panicum*

virgatum, з подальшим використанням у фіторемедіаційних заходах з відновлення нафтозабруднених ґрунтів.

Матеріали та методи досліджень

Мікропольові дослідження проводили на території Відділення фізико-хімії горючих копалин Інституту фізико-органічної хімії і вуглекислоти ім. Л. М. Литвиненка НАН України.

Для досліджень використовували глинистий ґрунт, який штучно забруднювали нафтою у кількості 5 %. Контролем слугував ґрунт без нафти. Фіторемедіант – просо лозоподібне *Panicum virgatum* L. – багаторічна рослина родини злакових (*Gramineae*). Для оптимізації вирощування *P. virgatum* використовували такі агенти ремедіації: 1) сорбенти – відходи агропромислового виробництва (сухі трав'яні рештки/сіно, лушпиння соняшника); 2) добрива: мінеральне $(\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{K}_2\text{HPO}_4$; 3) гумати – водний розчин гуміфілд форте 0,1 г/л, яким обробляли насіння проса лозоподібного перед посівом.

Мікропольові дослідження включали такі варіанти:

1. N 1 – Умовно чистий ґрунт (Контроль 1) + *P. virgatum*
2. N 2 – ґрунт + 5% нафти (Контроль 2) + *P. virgatum*
3. N 3 – ґрунт + 5% нафти + сіно + *P. virgatum*
4. N 4 – ґрунт + 5% нафти + добриво + *P. virgatum*
5. N 5 – ґрунт + 5% нафти + лушпиння соняшника + *P. virgatum*
6. N 1" – ґрунт + гумати + *P. virgatum*
7. N 2" – ґрунт + 5% нафти + гумати + *P. virgatum*
8. N 3" – ґрунт + 5% нафти + гумати + сіно + *P. virgatum*
9. N 4" – ґрунт + 5% нафти + гумати + добриво + *P. virgatum*
10. N 5" – ґрунт + 5% нафти + гумати + лушпиння + *P. virgatum*

Морфометричні параметри рослин вимірювали за загальноприйнятими методиками⁷ на 30 добу зростання. Відносну довжину кореня (ВДК) та відносну висоту пагона (ВВП) проса лозоподібного визначали, як відношення довжини у досліді до довжини у контролі, тобто:

• ВДК = (Довжина кореня (ДК) в досліді / Довжина кореня в контролі) × 100 %;

• ВВП = (Висота пагона (ВП) в досліді / Висота пагона в контролі) × 100 %;

Серії дослідів проводили не менше ніж у трикратній повторності, при кількості об'єктів вимірювання не менше ніж 30 для кожного варіанту.

Для визначення оптимальної концентрації водних розчинів гуматів для передпосівної обробки насіння *P. virgatum*, проводили лабораторні дослі-

дження залежності початкових ростових параметрів рослини від концентрацій розчинів гуматів на 7 добу росту. Серії дослідів проводили не менше ніж у трикратній повторності, при кількості об'єктів вимірювання не менше ніж 60 для кожної концентрації гуміфілду.

Вміст пігментів фотосинтезу у листках рослин досліджували спектрофотометрично⁸.

Статистичну обробку результатів проводили, використовуючи пакет програм Microsoft Office Excel. Порівняння середніх арифметичних і визначення достовірної різниці між вибірками проводили за допомогою t-критерію Стьюдента. Розбіжності між значеннями вважали достовірними на рівні значущості 95 % ($P \leq 0,05$).

Результати

Результати дослідження морфометричних показників проса лозоподібного на 30 добу, при зростанні на умовно чистому і нафтозабрудненому ґрунті, свідчать про помірну реакцію рослин *P. virgatum* на вміст нафти у ґрунті – відносна висота пагона зменшується на 7% відносно контролю, а відносна довжина кореня – на 18 % (табл. 1).

Для підвищення стресостійкості проса лозоподібного до несприятливих умов нафтового заруднення опробували гумати: гуміфілд форте та фульвітал плюс. Гумати, як відомо, забезпечують активний ріст і розвиток культур, формування високого і якісного врожаю, підвищують стресостійкість рослин до несприятливих умов довкілля.

Для визначення оптимальної концентрації водних розчинів гуматів для передпосівної обробки насіння *P. virgatum*, вивчали залежності початкових ростових параметрів рослини (на 5 добу), від концентрацій розчинів гуматів: фульвіталу та гуміфілду плюс 0,1–0,4 г/л.

Визначено, що фульвітал за концентрації 0,1–0,4 г/л не покращує ростових показників *P. virgatum* при його зростанні на нафтозабрудненому ґрунті, на відміну від гуміфілд форте.

При зростанні проса лозоподібного за концентрації гуміфілд форте 0,1 та 0,2 г/л на нафтозабрудненому ґрунті висота пагона зростає на 140 % та 74 % відповідно (рис. 1Б). За концентрації 0,4 г/л просо лозоподібне не проростає.

При зростанні проса на умовно чистому ґрунті за концентрації гуміфілд форте 0,1 г/л, 0,2 г/л та 0,4 г/л довжина кореня зменшується на 41%, 21% та 4%, а також зменшується висота пагона відповідно на 29%, 29% та 20%.

Отже, гуміфілд форте за концентрації 0,1–0,2 г/л стимулює ріст пагона проса лозоподібного при його зростанні на нафтозабрудненому ґрунті.

Оптимальна робоча концентрація гуміфілд форте, що забезпечує максимальне зростання рослин *P. virgatum* на нафтозабрудненому ґрунті складає 0,1 г/л (рис. 1).

Випробувано дію сорбентів-меліорантів: рослинних залишків/сіна та лушпиння соняшника, у технології вирощування *P. virgatum* на нафтозабрудненому ґрунті (табл. 2).

Таблиця 1 – Ростові показники *Panicum virgatum* за впливу нафтового забруднення

Варіант	Довжина кореня, см	ВДК, %	Висота пагона, (см)	ВВП, %
1 Контроль 1 (Умовно чистий ґрунт)	8,3±0,04	100	22,1±0,02	100
2 Ґрунт + 5% нафти	6,8±0,08*	81,93	20,5±0,42*	92,76

Примітка: * – дані статистично значущі за t-критерієм Стьюдента ($p \leq 0,05$)

Таблиця 2 – Вплив сорбентів на ростові показники *Panicum virgatum* при його зростанні на нафтозабрудненому ґрунті

Варіант	Довжина кореня	ВДК, %	Висота пагона	ВВП, %
2 Ґрунт + 5% нафти (Контроль 2)	6,8±0,08	100	20,5±0,42	100
3 Ґрунт + 5% нафти + сіно	8,2±0,02*	120,59	20,7±0,3	100,98
4 Ґрунт+5%нафти+добриво	6,6±0,02*	97,06	20,8±0,04	101,46
5 Ґрунт+ 5% нафти +лушпиння соняшника	6,9±0,04	101,47	19,6±0,04*	95,61

Примітка: * – дані статистично значущі за t-критерієм Стьюдента ($p \leq 0,05$)

Таблиця 3 – Вплив сорбентів та добрива у комплексі з гуматами на ростові показники *Panicum virgatum* L. при його зростанні на нафтозабрудненому ґрунті

Варіант	Довжина кореня	ВДК, %	Висота пагона	ВВП, %
2 Ґрунт + 5% нафти (Контроль 2)	6,8±0,08	100	20,5±0,42	100
2" Ґрунт + 5% нафти + гумати	6,6±0,02	97,06	18,7±0,02*	91,22
3" Ґрунт + 5% нафти + сіно + гумати	9,7±0,04*	142,42	23,78±0,02*	116,04
4" Ґрунт + 5% нафти+добриво+гумати	7,1±0,62	104,55	23,4±0,04*	113,90
5" Ґрунт + 5% нафти + лушпиння соняшника + гумати	10,1±0,04*	148,48	25,2±0,04*	122,99

Примітка: * – дані статистично значущі за t-критерієм Стьюдента ($p \leq 0,05$)

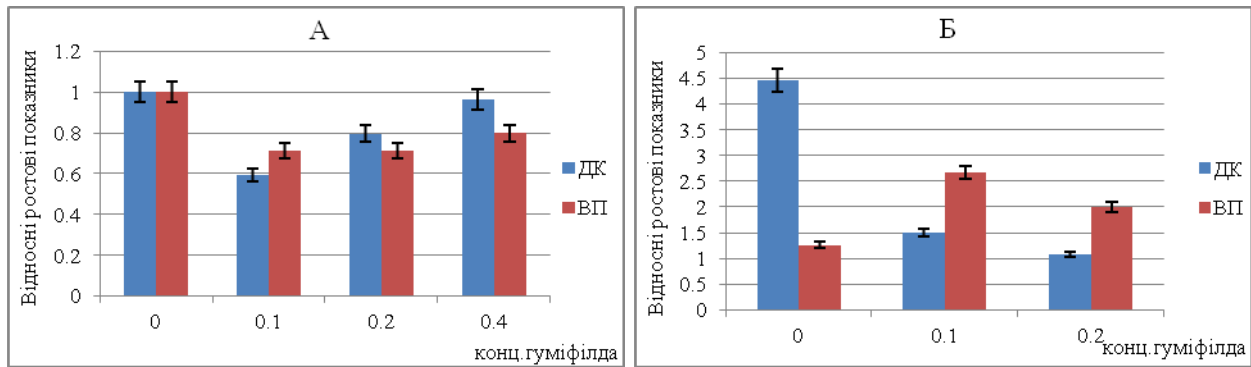


Рис. 1. Вплив гуміфілд форте на початкові ростові показники проса лозоподібного (*Panicum virgatum* L.), %: А – умовно чистий ґрунт (Контроль 1); Б – нафтозабруднений ґрунт (5%)

Встановлено, що внесення сіна у нафтозабруднений ґрунт стимулює ростові показники проса лозоподібного, особливо кореня, довжина якого збільшується на 21%, у порівнянні з рослинами, які ростуть на ґрунті, забрудненому нафтою (Контроль 2). Поокреме додавання лушпиння соняшника чи мінерального добрива незначно впливають на ростові показники *P. virgatum* (табл. 2). В той же час сумісне використання сорбентів з гуматами та добрива з гуматами добре стимулює ростові показники проса лозоподібного (табл. 3).

Найкращі результати досягнуто за сумісного використання лушпиння соняшника з гуміфілд форте: висота пагона збільшується на 23 %, а довжина кореня – на 48 % у порівнянні з рослинами,

які ростуть на ґрунті забрудненому нафтою без додавання агентів ремедіації.

Для оцінки ефективності технологій для оптимізації вирощування *P. virgatum* з використанням різних агентів ремедіації аналізували біохімічні параметри рослин – вміст пігментів фотосинтезу та каротиноїдів (рис. 2).

У варіантах із поокремим та сумісним використанням лушпиння соняшника та гуматів виявлено підвищення вмісту хлорофілів ($a+b$) у рослин до 3,79–3,92 мг/г, каротиноїдів до 1,3–1,48 мг/г у порівнянні зі значеннями для рослин на нафтозабрудненому ґрунті: хлорофілів ($a+b$) – 2,64 мг/г, каротиноїдів – 0,85 мг/г. Це підтверджує позитивний ефект від використання агентів ремедіації

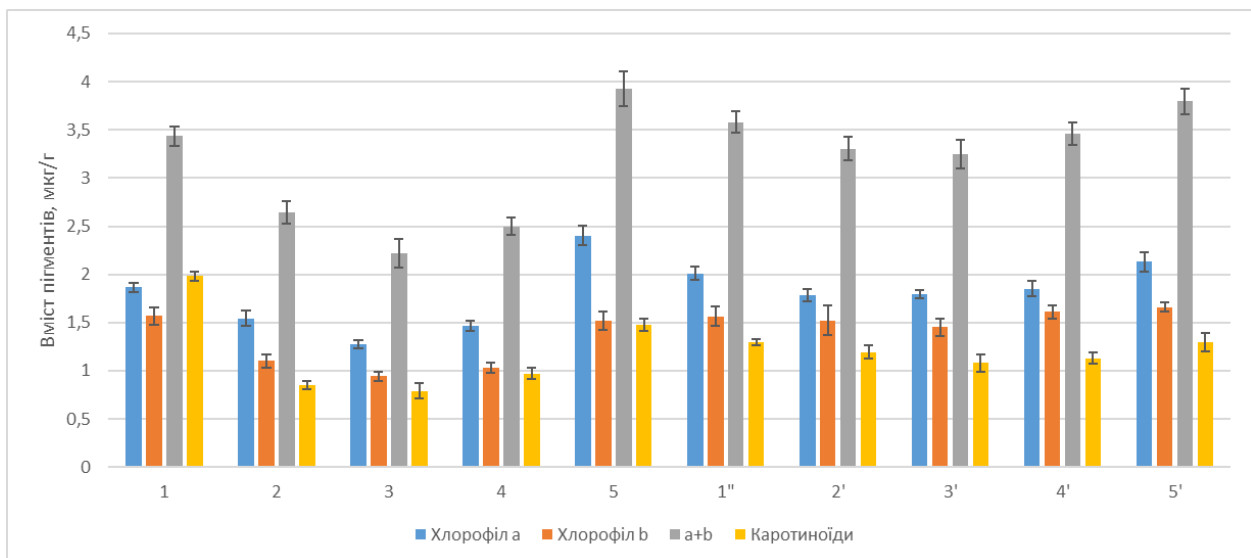


Рис. 2. Вміст хлорофілів a , b , $a+b$ та каротиноїдів у рослинах *Panicum virgatum* при їх зростанні на нафтозабрудненому ґрунті з додаванням сорбентів, добрив та гуматів:

1 – умовно чистий ґрунт (Контроль 1); 2 – ґрунт + 5% нафта;

3 – ґрунт + 5% нафта + сіно; 4 – ґрунт + 5% нафта + добриво;

5 – ґрунт + 5% нафта + лушпиння соняшника; 1'' – чистий ґрунт + гумати;

2'' – ґрунт + 5% нафта + гумати; 3'' – ґрунт + 5% нафта + сіно + гумати;

4'' – ґрунт + нафта 5% + добриво + гумати; 5' – ґрунт + 5% нафта + лушпиння соняшника + гумати

гуміфілд форте та лушпиння соняшника у технологіях зростання на нафтозабрудненому ґрунті.

Обговорення

Невимогливість та здатність проса лозоподібного адаптуватись до умов навколишнього середовища відкриває перспективи для вирощування цієї культури на еродованих та забруднених ґрунтах. Непрості умови для рослин у нафтозабрудненому ґрунті ставлять на перше місце чутливість енергетичної культури до нафтового забруднення а також відгук на дію агентів ремедіації для оптимізації зростання.

В процесі досліджень з'ясовано, що *P. virgatum* є помірно чутливим до нафтового забруднення (5% нафти в ґрунті), а тому може вирощуватись на нафтозабруднених ґрунтах. Проте, як свідчать наукові дані, просо лозоподібне не завжди може адаптуватись до великої кількості обмежувальних чинників, що в майбутньому позначиться на формуванні врожаю. Тому, обмежувальні чинники обов'язково мають враховуватись в технології вирощування, адже вплив багатьох чинників можна знівелювати правильним добром елементів технології⁹. Тому, для підвищення стійкості проса лозоподібного в умовах нафтового забруднення, опробовані агенти ремедіації: сорбенти-меліоранти, добрива, гумати. В якості сорбентів-меліорантів вибрані відходи агропромислового комплексу, що володіють меліоруючими, сорбуючими та збагачуючими властивостями – це залишки трав'яних відходів/сіно та лушпиння соняшника. Використовували мінеральне добриво

$(\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{K}_2\text{HPO}_4$, яке за своїм складом стимулює харчування рослин та мікроорганізмів і відповідно розкладання вуглеводнів нафти. Для підвищення стійкості опробовані гумати: гуміфілд форте та фульвітал.

Встановлено оптимальну концентрацію гуміфілд форте 0,1 г/л для підвищення стійкості рослин проса лозоподібного в умовах росту на нафтозабрудненому ґрунті та позитивний вплив лушпиння соняшника. Для ефективної технології вирощування *P. virgatum* в умовах нафтозабрудненого ґрунту доведено доцільність використання ремедіаційного комплексу лушпиння соняшника+гуміфілд форте.

Висновки

Просо лозоподібне є перспективною енергетичною культурою для вирощування на ґрунтах забруднених нафтою. Ефективне зростання *P. virgatum* досягається за участі агентів ремедіації (сорбентів-меліорантів, гуматів, добрив). Оптимальна концентрація гуміфілд форте для передпосівної обробки насіння 0,1 г/л. Найкращі ростові показники на нафтозабрудненому ґрунті забезпечує використання комплексу лушпиння соняшника + гуміфілд форте, збільшуються висота пагона на 23 %, довжина кореня на 48%, сумарний вміст хлорофілів ($a+b$) зростає у 1,5 рази.

Отже, отримані результати вказують на ефективність оптимізації технології вирощування *P. virgatum* та можливість подальшого використання у фіторемердіаційних заходах з відновлення нафтозабруднених ґрунтів.

Література

- (1) Kulyk, M., Galytska, M., Samoylik, M., Zhornyk, I. Phytoremediation aspects of energy crops use in Ukraine. *Agrology*. 2019, 2(1), 65-73. doi: 10.32819/2617-6106.2018.14020.
- (2) Pandey, V. C., Vajpai, O., Singh, N. Energy crops in sustainable phytoremediation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, 54, 58–73. doi: 10.1016/j.rser.2015.09.078
- (3) Шевчик Л. З., Романюк О. І. Аналіз біологічних способів відновлення нафтозабруднених ґрунтів. *Scientific Journal «ScienceRise: Biological Science»*. 2017, 1(4), 31–39. doi: 10.15587/2519-8025.2017.94052.
- (4) The Biofuels Market: Current Situation and Alternative Scenarios (2009). [Електронний ресурс]: http://unctad.org/en/docs/ditcbcc20091_en.pdf.
- (5) Борецька І., Романюк О., Шевчик-Костюк Л., Джура Н. Використання енергетичних культур і ремедіаційних технологій для відновлення ґрунтів: зб. матер. міжнар. наук.-практ. конф. «Екологія. Довкілля. Енергозбереження», Полтава: НУПП. 2022, 44-47.
- (6) Хіврич О. Б., Квак В. М., Каськів В. В., Мамайсур В. В. Енергетичні рослини як альтернатива традиційним видам палива. *Агробіологія*. 2011, 6, 153–156.
- (7) Грицаєнко З. М., Грицаєнко А. О., Карпенко В. П. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів. К.: "Нічлава". 2003, 316 с.
- (8) Мусієнко М. М., Паршикова Т. В., Славний П. С. Спектрофотометричні методи в практиці фізіології, біохімії та екології рослин. Київ: Фітосоціоцентр. 2001, 200 с.
- (9) Кулик М. І. Енергетичний потенціал та економічна ефективність виробництва фітомаси свіччграсу для біопалива. Наукові доповіді НУБіП України. 2016. № 4. [Електронний ресурс]: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/view/6971>