

UDC 581.6+631.8+665.6

DOI: 10.48077/scihor.23(10).2020.7-16

IMPROVING THE EFFICIENCY OF PHYTOREMEDIATION TECHNOLOGIES OF OIL-CONTAMINATED SOILS WITH THE PARTICIPATION OF NATURAL SORBENTS-MELIORANTS

Lesya Shevchyk-Kostiuk*, Olga Romaniuk, Andriy Banya

Department of Physical Chemistry of Fossil Fuels of the Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry named after L.M. Lytvynenko of the NAS of Ukraine
79053, 3a Naukova Str., Lviv, Ukraine

Article's History:

Received: 02.09.2020

Revised: 21.09.2020

Accepted: 06.10.2020

*Corresponding author:

Department of Physical Chemistry of Fossil Fuels of the Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry named after L.M. Lytvynenko of the NAS of Ukraine, 79053, 3a Naukova Str., Lviv, Ukraine, E-mail: lesyashevchik@gmail.com

Suggested Citation:

Shevchyk-Kostiuk, L., Romaniuk, O., & Banya, A. (2020). Improving the efficiency of phytoremediation technologies of oil-contaminated soils with the participation of natural sorbents-meliorants. *Scientific Horizons*, 23(10), 7-16.

Abstract. Phytoremediation is considered to be a promising and environmentally friendly way to restore oil-contaminated soils. However, the multicomponent nature of oil pollution, its low bioavailability, high stability, hydrophobicity, and toxicity require a comprehensive approach to its implementation. The purpose of the study is to investigate the influence of different types of sorbents-meliorants and their complexes with remediation agents on improvement of the efficiency of phytoremediation technologies of oil-contaminated soils. The study established that the most effective plants for phytoremediation of oil-contaminated soils are *Vicia faba* var. Minor, *Pisum sativum* L., *Avena sativa* L., which are the least exposed to toxic effects of oil among the studied crops, and better adapt to the conditions of oil-contaminated soils. The influence of sorbent-meliorants such as glauconite, zeolite, sawdust, and sunflower husk on the process of phytoremediation of oil-contaminated soils (oil content 5%) was studied. It was proven that sunflower husk is the most promising and available agent for accelerating phytoremediation. The study examined the individual and combined influence of mineral fertilisers, biogenic surfactants of microbial origin, and humates on the growth of *Avena sativa* plants under conditions of oil pollution, as well as on the process of soil restoration. The best results are obtained by application of the above agents in combination with sunflower husk. This complex (sunflower husk + mineral fertilizers + surfactants of microbial origin / humates) has a positive effect on *Avena sativa* plants – reduces the rate of oxidative stress, which indicates an improvement in the adaptability of plants to oil-contaminated soil; growth parameters increase; plant biomass accumulation; the total content of chlorophyll *a+b* increases; and there is an improvement in soil properties by reducing the oil content in soil, reducing phytotoxicity, increasing dehydrogenase activity

Keywords: oil-contaminated soils, phytoremediation, sorbents-meliorants, sunflower husk

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІТОРЕМЕДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НАФТОЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ ЗА УЧАСТІ ПРИРОДНИХ СОРБЕНТІВ-МЕЛІОРАНТІВ

Леся Зеновіївна Шевчик-Костюк, Ольга Іванівна Романюк,
Андрій Романович Баня

Відділення фізико-хімії горючих копалин Інституту фізико-органічної хімії і
вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України
79053, вул. Наукова, 3а, м. Львів, Україна

Анотація. Перспективним та екологічно-прийнятним способом відновлення забруднених нафтою ґрунтів вважається фіторе mediaція, проте полікомпонентність нафтового забруднення, його низька біодоступність, висока стійкість, гідрофобність і токсичність вимагає комплексного підходу в її проведенні. Мета роботи – вивчення впливу різних типів сорбентів-меліорантів і їх комплексів з агентами ремедіації на підвищення ефективності фіторе mediaційних технологій нафтозабруднених ґрунтів. Встановлено, що найбільш ефективними в якості фіторе mediaнтів є біб кормовий (*Vicia faba* var. *minor*), горох польовий (*Pisum sativum* L.) та овес посівний (*Avena sativa* L.), які серед досліджуваних культур найменш схильні до токсичного впливу нафти та краще пристосовуються до зростання на забруднених нафтою ґрунтах. Досліджено вплив сорбентів-меліорантів: глауконіт, цеоліт, тирса, лушпиння соняшника на процес фіторе mediaції нафтозабруднених ґрунтів (вміст нафти 5 %). Показано, що лушпиння соняшника є найбільш перспективним і доступним агентом пришвидшення фіторе mediaції. Досліджено окремий і сумісний вплив мінеральних добрив, біогенних поверхнево-активних речовин мікробного походження, гуматів на ріст рослин вівса посівного в умовах нафтового забруднення та на процес відновлення ґрунтів. Найкращі результати отримано за сумісного використання вище перелічених агентів у комплексі з лушпинням соняшника. Такий комплекс (лушпиння соняшника + мінеральні добрива + поверхнево-активні речовини мікробного походження / гумати) позитивно впливає на рослини вівса посівного – знижується показник оксидативного стресу, що свідчить про покращення адаптаційної здатності рослин до умов нафтозабрудненого ґрунту; відбувається збільшення ростових параметрів; нагромадження біомаси рослин; збільшується сумарний вміст хлорофілів $a+b$; а також спостерігається покращення властивостей ґрунту за рахунок зниження вмісту нафти в ньому, зменшення фітотоксичності, підвищення дегідрогеназної активності

Ключові слова: нафтозабруднені ґрунти, фіторе mediaція, сорбенти-меліоранти, лушпиння соняшника

ВСТУП

Українські ґрунти – одне з найцінніших багатств нашої країни і від їх раціонального та ефективного використання залежить добробут нашого народу. Однак, в умовах господарської діяльності – видобуток, транспортування, зберігання, переробка нафти і використання нафтопродуктів – часто відбувається забруднення ґрунтів. Техногенне нафтове забруднення зумовлює негативні зміни морфологічних, фізико-хімічних і біологічних характеристик ґрунту та призводить до виведення великої кількості земель з сільськогосподарського вжитку, внаслідок зниження або повної втрати їх продуктивності. Порушені землі втрачають свою початкову цінність і стають джерелом поширення забруднюючих речовин у навколишнє середовище: повітря, підземні

та поверхневі води, донні відклади та харчові ланцюги. На земельних ділянках з деградованими, забрудненими та виснаженими ґрунтами неможливо проводити сільськогосподарську та іншу діяльність, за винятком такої, що пов'язана із запобіганням подальшої деградації ґрунтів та усуненням її наслідків.

Світова практика проведення рекультивувальних робіт представлена різноманітними методами відновлення ґрунтових екосистем. Однак, на сьогоднішній день, перевага віддається біологічним способам очистки: біоре mediaції та фіторе mediaції [1]. Методи біоре mediaції нафтозабруднених ґрунтів передбачають активізацію існуючої мікрофлори шляхом створення оптимальних умов за рахунок оранки, розпушування,

внесення мінеральних добрив, сорбентів та ін., або використання мікроорганізмів-нафтодеструкторів, які вносять у забруднений ґрунт у значних кількостях [2–4]. ФітореMediaція, тобто очищення та відновлення навколишнього середовища за допомогою рослин, часто використовується як самостійний спосіб і як завершальний етап багатоступеневих рекультивацийних технологій. Вона приваблює своєю природністю, екологічністю, простотою і економічністю, характеризується тривалішим впливом і стабільним покращенням екологічної ситуації. Рослини-фітореMediaнти, які найбільш широко використовують у фітореMediaції представлені серед таких родин, як злакові [5; 6], бобові [7; 8], представники сімейств зонтичні [9], осокові [10; 11], рогозові [12], амарантові [13], евкаліптові [14], молочайні [15], а також можна використовувати суміші трав – газонних або дикорослих [16; 17]. Показано, що дерева-фітореMediaнти (тополя, верба, акація, обліпіха) характеризуються швидким зростанням, глибоким укоріненням, високою транспірацією і гіпераккумуляцією нафтопродуктів, а злаки утворюють безліч коренів у поверхневому шарі ґрунту, що сприяє його стійкості до ерозії та зв'язуванню вуглеводнів [18–20].

Однак, успішне проведення фітореMediaції нафтозабруднених ґрунтів є непростим завданням через гідрофобність і високу токсичність нафти, значне порушення водоповітряного балансу та співвідношення основних мікроелементів Вуглецю та Азоту в ґрунті, що робить неможливим зростання більшості рослин. Перспективним у цьому плані є використання у фітореMediaційних технологіях різноманітних агентів реMediaції: мінеральних добрив [21], біогенних поверхнево-активних речовин мікробного походження (біо-ПАР) [22; 23], гуматів [24], а також сорбентів – речовин, здатних вбирати у великих кількостях нафтопродукти, тим самим запобігати подальшій їх міграції. Крім того, більшість сорбентів виконують роль меліорантів – покращують властивості ґрунту, розпушують його, оптимізують газообмін, виступають джерелом важливих мікроелементів, матрицею для зростання мікроорганізмів-деструкторів нафти та ін. В якості сорбентів застосовують, в основному, пористі матеріали: зола, торф, кокс, силікагелі, алюмогелі, активні глини, а також різні промислові та рослинні відходи, що утворюються безпосередньо в умовах сільськогосподарського виробництва: шроти, тирсу, лушпиння, висівки, солома [25; 26].

Проте, на сьогоднішній день, вплив різних типів сорбентів і їх поєднання з ефективними агентами реMediaції: мінеральними добривами, біогенними поверхнево-активними речовинами мікробного походження, гуматами, на ефективність фіторекультивачії нафтозабруднених ґрунтів, є практично не дослідженим. Тому, мета роботи – вивчення впливу різних типів сорбентів-меліорантів і їх комплексів з агентами реMediaції на підвищення ефективності фітореMediaційних технологій нафтозабруднених ґрунтів.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Дослідження були проведені на території Відділення фізико-хімії горючих копалин Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України і склались з трьох етапів:

1) вибір рослини, яка здатна рости на нафтозабрудненому ґрунті та яка була б показовою для вивчення впливу різних типів сорбентів-меліорантів на підвищення ефективності фітореMediaційних технологій нафтозабруднених ґрунтів;

2) вибір доступного та ефективного сорбента-меліоранта;

3) мікропольове дослідження комплексного використання фітореMediaнта, сорбента та інших біологічних агентів для відновлення нафтозабруднених ґрунтів.

Усі дослідження проводили на глинистому ґрунті, який штучно забруднювали нафтою у кількості 5 %. Контролем слугував ґрунт без нафти. У процесі вибору фітореMediaнта було опробовано 7 видів рослин: горох польовий (*Pisum sativum* L.), ріпак (*Brassica napus* L.), райграс (*Lolium perenne* L.), жито посівне (*Secale cereale*), овес посівний (*Avena sativa* L.), гірчиця біла (*Sinapis alba*), біб кормовий (*Vicia faba* var. *minor*). Серед сорбентів опробовано: глауконіт, цеоліт, тирсу та лушпиння соняшника.

Мікропольовий дослід включав такі варіанти експерименту:

1 – Контроль (незабруднений ґрунт) + овес посівний.

2 – Ґрунт + 5 % нафти + овес посівний.

3 – Ґрунт + 5 % нафти + лушпиння соняшника + овес посівний.

4 – Ґрунт + 5 % нафти + добриво + овес посівний.

5 – Ґрунт + 5 % нафти + добриво + біоПАР + овес посівний.

6 – Ґрунт + 5 % нафти + добриво + лушпиння соняшника + овес посівний.

7 – Ґрунт + 5 % нафти + добриво + лушпиння соняшника + біоПАР + овес посівний.

8 – Ґрунт + 5 % нафти + добриво + лушпиння соняшника + гумати + овес посівний.

Добривом слугував розчин елементів мінерального живлення: $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ та K_2HPO_4 .

БіоПАР – поверхнево-активна речовина (рамноліпідний біокомплекс, 0,01 г/л) – продукт мікробного синтезу штаму *Pseudomonas* sp. PS-17, що містить поверхнево-активні рамноліпіди та полісахарид (4:1), отриманий у Відділенні фізико-хімії горючих копалин Інституту фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України [27].

Гумати – водний розчин гумінових кислот 1 г/л. Насіння дослідних рослин перед посівом замочували впродовж 3 год у воді, розчинах біоПАР, гуматах, залежно від варіанту експерименту.

Морфометричні параметри рослин вимірювали на 45 добу за загальноприйнятими методиками [28]. Вміст пігментів фотосинтезу у листках рослин визначали спектрофотометрично [29]. Вміст пероксидного окиснення ліпідів за вмістом малонового діальдегіду визначали в реакції рослинного екстракту з тіобарбітуровою кислотою [30]. Фітотоксичність ґрунту оцінювали за допомогою рослинних тестів-об'єктів: *Linum usitatissimum* L., *Helianthus annuus* L., *Fagopyrum vulgare* St. [31]. Дегідрогеназну активність визначали колориметричним методом із трифенілтетразолій хлоридом [32]. Результати досліджень оброблено статистично з використанням Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Перший етап досліджень – це вибір фіторе-медіанта, тестової рослини, показової для вивчення впливу різних типів сорбентів-меліорантів на підвищення ефективності фіторе-медіаційних технологій нафтозабруднених ґрунтів. Було опробовано горох польовий (*Pisum sativum* L.), ріпак (*Brassica napus* L.), райграс (*Lolium perenne* L.),

жито посівне (*Secale cereale*), овес посівний (*Avena sativa* L.), гірчиця біла (*Sinapis alba*), біб кормовий (*Vicia faba* var. *minor*). Досліджувались морфометричні показники рослин, оскільки вони інформативні і визначальні в умовах росту на забруднених нафтою ґрунтах.

Встановлено різну стійкість досліджуваних рослин до дії нафти. Показано, що ріпак, райграс і гірчиця є чутливими до нафтового забруднення. Ці рослини проростають у нафтозабрудненому ґрунті, кількість їх пророслого насіння не відрізняється від контролю, проте подальшого розвитку рослин не відбувається. Через місяць у нафтозабрудненому ґрунті висота пагона райграсу, ріпаку та гірчиці, була нижчою, ніж у контролі в 4; 4,4 і 22,5 рази відповідно (рис. 1).

Хороші результати отримано при використанні бобу кормового та гороху. Біб кормовий і горох належать до родини Бобових, а отже для їх кореневої системи характерний симбіоз із бульбочковими бактеріями, які, як відомо, здатні засвоювати атмосферний азот і забезпечувати себе та ґрунт азотними речовинами як добривами.

Дослідженнями показано, що біб є стійким до нафтового забруднення. Висота пагона є однаковою як у контролі, так і у нафтозабрудненому ґрунті. Довжина кореня бобу у нафтозабрудненому ґрунті (5 % нафти в ґрунті) удвічі перевищує довжину кореня в контролі (рис. 1). Отже, біб включає захисні механізми, щоб вижити у нафтозабрудненому ґрунті, тому активно нагромаджує кореневу систему, яка зі свого боку буде забезпечувати його поживними речовинами, а відповідно й відновлювати нафтозабруднений ґрунт. Тому біб кормовий є придатним для очищення нафтозабруднених ґрунтів середнього ступеню забруднення (5 %) як самостійний фіторекультивант, так і для створення фіторе-медіаційних систем.

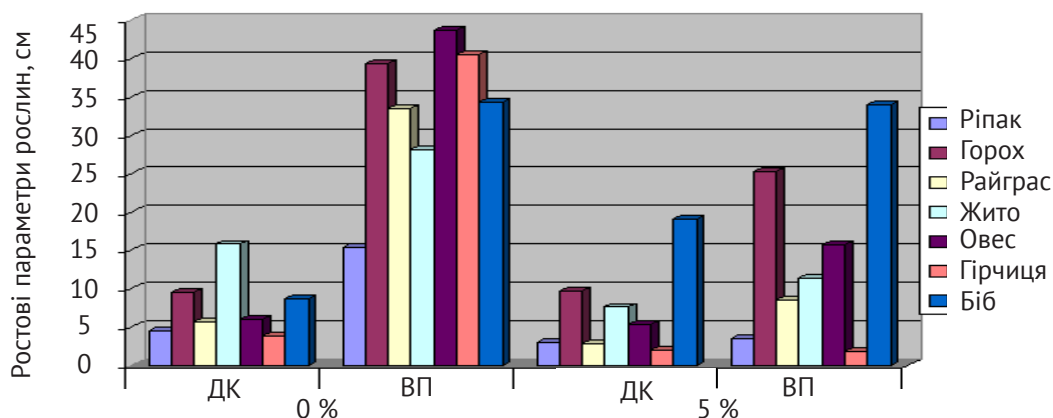


Рисунок 1. Довжина кореня (ДК) та висота пагона (ВП) досліджуваних рослин, вирощених впродовж місяця на незабрудненому та нафтозабрудненому ґрунті (5 % нафти у ґрунті)

Горох виявився менш стійким, ніж біб. Його коренева система у нафтозабрудненому ґрунті не відрізнялась від контролю, а висота пагона була в 1,5 рази нижчою, ніж у контролі (рис. 1). Жито та овес також здатні рости на нафтозабрудненому ґрунті в концентрації 5 %, хоча їх ростові параметри є значно нижчими за контроль (рис. 1). Встановлено, що рослини жита після одного місяця росту призупинили ріст: почали сохнути та гинути. Рослини вівса на нафтозабрудненому ґрунті залишались зеленими та життєздатними.

Таким чином, отримані результати досліджень свідчать, що найбільш ефективними в якості фіторемедіантів є представники бобових та овес посівний, які серед досліджуваних культур найменш схильні до токсичного впливу нафти та краще пристосовуються до зростання на забруднених нафтою ґрунтах. Однак, овес посівний, з огляду однозначної відповіді на забруднення, пока-

зав себе кращою тестовою рослиною. Тому овес вибрали для подальших досліджень оцінки впливу сорбента-меліоранта, мінеральних добрив та активних добавок на процес фіторекультивациі нафтозабруднених ґрунтів.

Дослідження проводились з використанням природних сорбентів – тирси, лушпиння соняшника, глауконіту, цеоліту. Встановлено, що всі досліджувані сорбенти в незабрудненому ґрунті дещо пригнічували ріст пагона вівса, проте спостерігали стимулювання росту довжини кореня у випадку з тирсою та лушпинням соняшника. У нафтозабрудненому ґрунті лише у випадку з лушпинням соняшника відбувалось збільшення ростових параметрів вівса посівного. Так, довжина кореня та висота пагона вівса на 23 і 9,7 % відповідно були вищими, ніж у нафтозабрудненому ґрунті без лушпиння (рис. 2, 3).

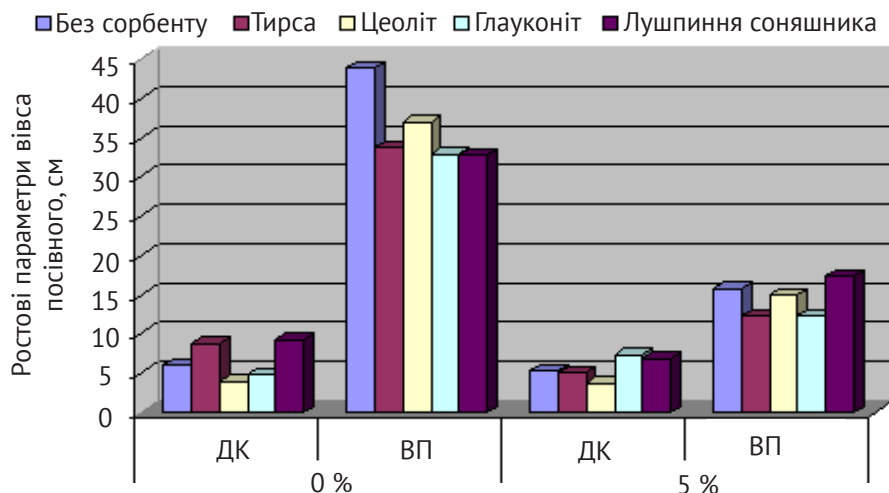


Рисунок 2. Довжина кореня (ДК) і висота пагона (ВП) вівса посівного в незабрудненому та забрудненому нафтою ґрунті (5 % нафти в ґрунті) із додаванням сорбентів-меліорантів



Рисунок 3. Рослини вівса посівного в незабрудненому та забрудненому нафтою ґрунті: А – рослини вівса посівного в незабрудненому ґрунті, Б – рослини вівса посівного в незабрудненому ґрунті із додаванням лушпиння соняшника; В – рослини вівса посівного в забрудненому нафтою ґрунті (5 %); Г – рослини вівса посівного в забрудненому нафтою (5 %) ґрунті із додаванням лушпиння соняшника

Проведені експериментальні дослідження продемонстрували можливість використання відходу агропромислового комплексу – лушпиння соняшника для поліпшення умов ґрунту та підвищення процесу фіторекультивації. Лушпиння соняшника є дешевим відходом сільського господарства, яке представляє собою задерев'янілу рослинну тканину, однорідну по фізичній структурі. Основним компонентом частинок лушпиння є клітковина, яка складається з лігніну, целюлози та геміцелюлози, яка бере участь у мікробіологічному обміні речовин у аеробних мікроорганізмів.

Оскільки відновлення нафтозабруднених ґрунтів рослинами є тривалим процесом, постало питання використання додаткових біологічних агентів для підсилення фіторемедіації.

Досліджено окремий і сумісний вплив лушпиння соняшника, мінеральних добрив, біогенних поверхнево-активних речовин мікробного походження (біоПАР), гуматів на ріст рослин вівса та процес відновлення нафтозабруднених ґрунтів. Встановлено, що у всіх варіантах із лушпинням соняшника відбувається нагромадження біомаси вівса та незначне збільшення їх ростових параметрів. Відмічено позитивний вплив добрив на ріст рослин, як порівняти із нафтозабрудненим ґрунтом без добрив (рис. 4).

Для оцінки ефективності агентів ремедіації аналізували біохімічні параметри рослин: вміст пігментів фотосинтезу (табл. 1) і малонового діальдегіду (показника оксидативного стресу) (рис. 5).

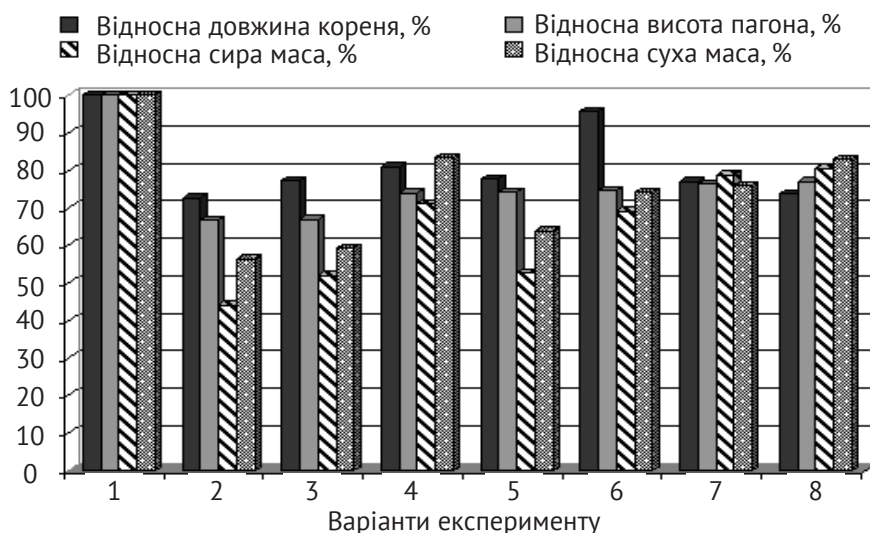


Рисунок 4. Ростові параметри вівса посівного, вирощеного на забрудненому нафтою ґрунті (5 % нафти у ґрунті) із додаванням стимуляторів ремедіації:

- | | |
|---|--|
| 1 – Контроль (незабруднений ґрунт); | 6 – ґрунт + 5 % нафти + добриво + лушпиння соняшника; |
| 2 – ґрунт + 5 % нафти; | 7 – ґрунт + 5 % нафти + добриво + лушпиння соняшника + біоПАР; |
| 3 – ґрунт + 5 % нафти + лушпиння соняшника; | 8 – ґрунт + 5 % нафти + добриво + лушпиння соняшника + гумати. |
| 4 – ґрунт + 5 % нафти + добриво; | |
| 5 – ґрунт + 5 % нафти + добриво + біоПАР; | |

Таблиця 1. Вміст пігментів фотосинтезу в рослин вівса посівного за росту на ґрунтах, забруднених нафтою

ґрунт, забруднений нафтою	Вміст пігментів, мг/г сирової речовини			
	Хлорофіл a	Хлорофіл b	Хлорофіл a+b	Каротиноїди
0 % нафти	5,430±0,22	2,537±0,13	7,967±0,15	1,139±0,05
5 % нафти	1,723±0,11	0,793±0,07	2,516±0,08	0,325±0,03
5 % нафти + лушпиння	1,809±0,09	0,823±0,05	2,632±0,19	0,341±0,11
5 % нафти + добриво	1,843±0,02	0,893±0,10	2,736±0,21	0,359±0,04
5 % нафти + добриво + біоПАР	1,914±0,03	1,055±0,19	2,969±0,09	0,417±0,07
5 % нафти + добриво + лушпиння	1,790±0,15	0,842±0,04	2,632±0,10	0,402±0,08
5 % нафти + добриво + лушпиння + біоПАР	2,041±0,07	0,862±0,11	2,903±0,14	0,397±0,09
5 % нафти + добриво + лушпиння + гумати	2,049±0,12	1,057±0,05	3,106±0,03	0,403±0,05

У варіантах із комплексним використанням біоПАР, гуматів, лушпинням соняшника та добрив виявлено підвищення вмісту сумарних хлорофілів $a+b$ у рослин на 23–35 % відносно рослин на нафтозабрудненому ґрунті (табл. 1).

Зниження показника оксидативного стресу рослин на 47–48 % (варіант 7 і 8) за дії використаних стимуляторів: мінеральне добриво + лушпиння + біоПАР; мінеральне добриво + лушпиння + гумати, – свідчить про покращення

адаптаційної здатності рослин до умов нафтозабрудненого ґрунту (рис. 5).

Важливим показником, який характеризує ефективність ремедіації, є активність ґрунтових дегідрогеназ. Ґрунтові ферменти каталізують важливі метаболічні процеси, враховуючи деструкцію органічних речовин, зокрема нафтопродуктів. Показано, що дегідрогеназна активність в усіх варіантах підвищувалася порівняно з нафтозабрудненим ґрунтом (рис. 6).

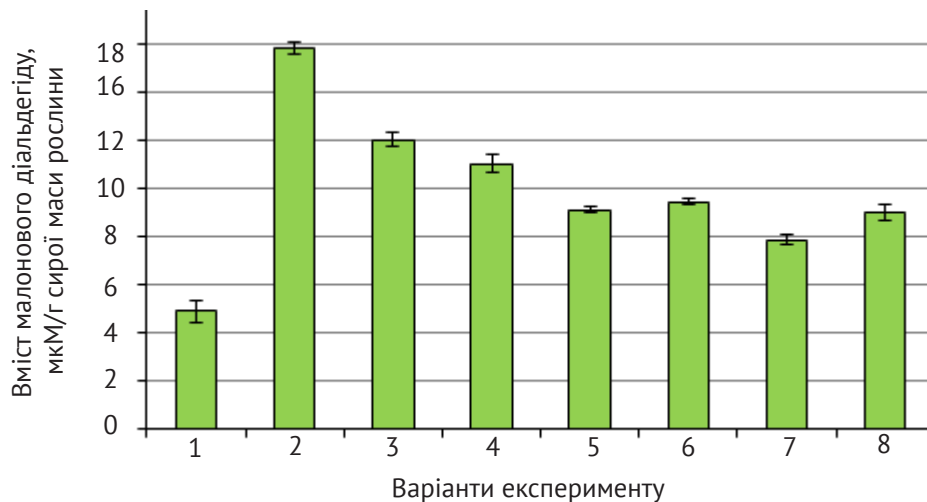


Рисунок 5. Вміст малонового діальдегіду у рослин вівса посівного за росту на ґрунтах, забруднених нафтою (5 %):

- | | |
|---|--|
| 1 – Ґрунт без нафти (контроль); | 6 – Ґрунт, 5 % нафти + мінеральне добриво + лушпиння; |
| 2 – Ґрунт, 5 % нафти; | 7 – Ґрунт, 5 % нафти + мінеральне добриво + лушпиння + біоПАР; |
| 3 – Ґрунт, 5 % нафти + лушпиння; | 8 – Ґрунт, 5 % нафти + мінеральне добриво + лушпиння + гумати. |
| 4 – Ґрунт, 5 % нафти + мінеральне добриво; | |
| 5 – Ґрунт, 5 % нафти + мінеральне добриво + біоПАР; | |

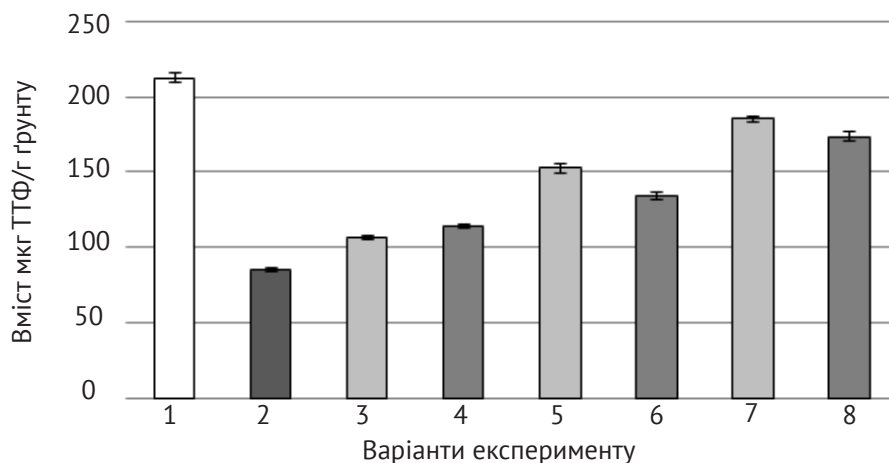


Рисунок 6. Дегідрогеназна активність нафтозаруднених ґрунтів (5 %) після фіторемедіації із використанням вівса посівного та стимуляторів ремедіації:

- | | |
|---|--|
| 1 – Ґрунт без нафти (контроль); | 6 – Ґрунт, 5 % нафти + мінеральне добриво + лушпиння; |
| 2 – Ґрунт, 5 % нафти; | 7 – Ґрунт, 5 % нафти + мінеральне добриво + лушпиння + біоПАР; |
| 3 – Ґрунт, 5 % нафти + лушпиння; | 8 – Ґрунт, 5 % нафти + мінеральне добриво + лушпиння + гумати. |
| 4 – Ґрунт, 5 % нафти + мінеральне добриво; | |
| 5 – Ґрунт, 5 % нафти + мінеральне добриво + біоПАР; | |

Кращі показники отримані за комплексного використання рослин вівса посівного, біоПАР, гуматів, лушпиння соняшника, а також добрив – дегідрогеназна активність ґрунту зростала у 2,3 рази щодо нафтозабрудненого ґрунту (рис. 6). Це свідчить про зростання функціональної активності ґрунтової біоти.

Досліджено фітотоксичність ґрунтів, що піддавались ремедіації. Встановлено, що рослини вівса посівного позитивно впливають на

нафтозабруднений ґрунт. При їх самостійному впливі відбувається зниження фітотоксичності забрудненого ґрунту. Однак, найкращі результати отримано за застосуванні рослин вівса в комбінації із лушпинням соняшника, добривами та з додаванням біоПАР або гуматів. Вміст нафти за шкалою токсичності становить 0,4–2,5 при самостійному застосуванні вівса та менше 0,4 у випадку додавання біологічних агентів, що відповідає допустимому рівню забруднення (табл. 2).

Таблиця 2. Фітотоксичність ґрунтів і вміст нафти в ґрунті після фіторемердіації

№п/п	Ґрунт, забруднений нафтою із рослинами вівса посівного та біологічними агентами	Ефективна токсичність	Вміст нафти в ґрунті, %*
1	0 % нафти	0	
2	5 % нафти	0,769	0,4–2,5
3	5 % нафти + лушпиння	0,228	<0,4
4	5 % нафти + добриво	0,365	<0,4
5	5 % нафти + добриво +біоПАР	0,524	<0,4
6	5 % нафти + добриво +лушпиння	0,374	<0,4
7	5 % нафти + добриво +лушпиння + біоПАР	0,138	<0,4
8	5 % нафти + добриво +лушпиння + гумати	0,135	<0,4

Примітка: * – дані подано згідно шкали токсичності нафтозабруднених ґрунтів [31]

Таким чином застосування лушпиння соняшника, мінеральних добрив, біоПАР і гуматів значно пришвидшують фіторемердіаційний процес. Вони позитивно впливають на рослини фіторемердіанти, у нашому випадку вівса посівного, та знижують фітотоксичність ґрунту, вміст нафти та підвищують його дегідрогеназну активність.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень встановлено, що найбільш ефективними фіторемердіантами, які можуть застосовуватись в умовах нафтозабрудненого ґрунту (5 % нафти в ґрунті) є біб кормовий (*Vicia faba* var. *minor*), горох польовий (*Pisum sativum* L.) та овес посівний (*Avena sativa* L.), які проявляють достатню стійкість до токсичного впливу нафти та добре пристосовуються до непростих умов зростання.

Серед досліджуваних сорбентів-меліорантів: глауконіт, цеоліт, тирса та лушпиння соняшника. Найбільш перспективним і доступним агентом пришвидшення фіторемердіації є лушпиння соняшника. Мінеральні добрива, біогенні поверхнево-активні речовини мікробного походження, гумати, за їх поокремого та сумісного використання, позитивно впливають на ріст фіторемердіантів – рослин вівса посівного. Найкращі результати

фіторемердіації нафтозабруднених ґрунтів отримано при поєднанні сорбента-меліоранта лушпиння соняшника з агентами ремедіації: мінеральними добривами, поверхнево-активними речовинами мікробного походження / гуматами. Комплекс (лушпиння соняшника + мінеральні добрива + поверхнево-активні речовини мікробного походження / гумати) позитивно впливає на рослини вівса посівного – знижується показник маленового діальдегіду на 47–48 %, збільшуються ростові параметри на 8–11 %, а біомаса рослин – на 31–39 %, зростає сумарний вміст хлорофілів $a+b$ на 23–35 % відносно рослин на нафтозабрудненому ґрунті. Також відбувається покращення властивостей ґрунту: зменшується фітотоксичність ґрунту та вміст нафти в ньому до допустимого рівня забруднення (<0,4 % нафти в ґрунті), підвищується дегідрогеназна активність у 2,3 рази щодо нафтозабрудненого ґрунту.

Отже, використання природних сорбентів-меліорантів – лушпиння соняшника, а особливо його поєднання з агентами ремедіації: мінеральними добривами, поверхнево-активними речовинами мікробного походження / гуматами, є перспективним шляхом підвищення ефективності фіторемердіаційних технологій нафтозабруднених ґрунтів і поліпшення якості ґрунтів.

REFERENCES

- [1] Shevchyk, L.Z., & Romaniuk, O.I. (2017). The analysis of biological ways of restoration of the oil-contaminated soils. *ScienceRise: Biological Science*, 1(4), 31-39. doi: 10.15587/2519-8025.2017.94052.
- [2] Boopathy, R. (2000). Factors limiting bioremediation technologies. *Bioresource Technology*, 74(1), 63-67. doi: 10.1016/S0960-8524(99)00144-3.
- [3] Lee, E.H., Kang, Y.S., & Cho, K.S. (2011). Bioremediation of diesel contaminated soils by natural attenuation, Biostimulation and Bioaugmentation employing *Rhodococcus* sp. EH831. *Korean Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(1), 86-92.
- [4] Singh, A., Kuhad, R.C., & Ward, O.P. (Eds.). (2009). *Advances in Applied Bioremediation (Soil Biology)*. Berlin: Springer. doi: 10.1007/978-3-540-89621-0.
- [5] Kaimi, E., Mukaidani, T., & Tamaki, M. (2007). Screening of twelve plant species for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. *Plant Production Science*, 10(2), 211-218. doi: 10.1626/pp.s.10.211.
- [6] Korade, D.L., & Fulekar, M.H. (2009). Effect of organic contaminants on seed germination of *Lolium multiflorum* in soil. *Biology and Medicine*, 1(1), 28-34.
- [7] Yateem, A., Balba, M.T., El-Nawawy, A.S., & Al-Awadhi, N. (2000). Plants-associated microflora and the remediation of oil-contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, 2(3), 183-191. doi: 10.1080/15226510009359031.
- [8] Dzhura, N.M. (2011). Prospects of oil polluted soils phytoremediation by *Faba bona Medic. (Vicia faba L.)* plants. *Visnyk of Lviv University. Biological Series*, 57, 117-124.
- [9] Bashirova, R.M., Grigoriadi, A.S., & Kireeva, N.A. (2012). Resistance of *Angelica officinalis* to soil contamination by crude oil. *Russian Journal of Plant Physiology*, 59(5), 710-715.
- [10] Basumatary, B., Saikia, R., & Bordoloi, S. (2012). Phytoremediation of crude oil contaminated soil using nut grass, *Cyperus rotundus*. *Journal of Environmental Biology*, 33(5), 891-896.
- [11] Bordoloi, S., & Basumatary, B. (2015). Phytoremediation of hydrocarbon-contaminated soil using sedge species. In *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants* (pp. 279-282). Switzerland: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-10395-2_19.
- [12] Ijaz, A., Imran, A., Haq, M.A., Khan, Q.M., & Afzal, M. (2015). Phytoremediation: Recent advances in plant-endophytic synergistic interactions. *Plant Soil*, 405(1-2), 179-195. doi: 10.1007/s11104-015-2606-2.
- [13] Moubasher, H.A., Hegazy, A.K., Mohamed, N.H., Moustafacet, Y.M., Kabielaal, H.F., & Hamad, A.A. (2015). Phytoremediation of soils polluted with crude petroleum oil using *Bassia scoparia* and its associated rhizosphere microorganisms. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 98, 113-120. doi: 10.1016/j.ibiod.2014.11.019.
- [14] Taheria, M., Motesarezadeha, B., Zolfagharib, A.A., & Javadzarrin, I. (2018). Phytoremediation modeling in soil contaminated by oilhydrocarbon under salinity stress by eucalyptus (A comparative study). *Computers and Electronics in Agriculture*, 150, 162-169. doi: 10.1016/j.compag.2018.04.016
- [15] Singha, L.P., & Pandey, P. (2017). Glutathione and glutathione-S-transferase activity in *Jatropha curcas* in association with pyrene degrader *Pseudomonas aeruginosa* PDB1 in rhizosphere, for alleviation of stress induced by polyaromatic hydrocarbon for effective rhizoremediation. *Journal of Ecological Engineering*, 102, 422-432. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.02.061.
- [16] Krasnoperova, S.A. (2015). The morphological analysis and resistance of plants recommended for phytoremediation of the oil-polluted soils. *Modern High Technologies. Regional Application*, 4(44), 184-188.

- [17] Sindireva, A.V., Lovinetskaya, S.B., & Geys, V.V. (2016). The use of lawn grasses for phytoremediation of soils contaminated with petroleum products. *Bulletin of OmGAU*, 1(21), 92-97.
- [18] Cook, L., & Hesterberg, D. (2013). Comparison of trees and grasses for rhizoremediation of petroleum hydrocarbons. *International Journal of Phytoremediation*, 15(9), 844-860. doi: 10.1080/15226514.2012.760518.
- [19] Lim, M.W., Lau, E.V., & Poh, P.E. (2016). A comprehensive guide of remediation technologies for oil contaminated soil – present works and future directions. *Marine Pollution Bulletin*, 109, 14-45. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.04.023
- [20] Shevchyk, L.Z., & Romaniuk, O.I. (2016). Phytoremediation of oil contaminated soil using Sea Buckthorn. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytsky Melitopol State Pedagogical University*. 6(3), 472-480. doi: 10.15421/2016120.
- [21] Arhipchenko, I.A., Zagvozdkin, V.K., & Ertsev, G.N. (2004). Purification of oil-contaminated soils using biological products based on microbial fertilizers. *Ecology and Industry of Russia*, 9, 16-18.
- [22] Silva, R. de C.F.S., Almeida, D.G., Rufino, R.D., Luna, Ju.M., Santos, V.A., & Sarubbo, L.A. (2014). Applications of biosurfactants in the petroleum industry and the remediation of oil spills. *International Journal of Molecular Sciences*, 15, 12523-12542. doi: 10.3390/ijms150712523.
- [23] Almansoori, A., Hasan, H., & Idris, M. (2015). Potential application of a biosurfactant in phytoremediation technology for treatment of gasoline-contaminated soil. *Ecological Engineering*, 84, 113-120.
- [24] Grechischeva, N.Yu., Perminova, I.V., & Mescheryakov, S.V. (2016). Humic Compounds in Treatment of Oil Contaminated Environments. *Ecology and Industry of Russia*, 20(1), 30-36. doi: 10.18412/1816-0395-2016-1-30-36.
- [25] Kamenshchikov, F.A., & Bogomolnyy, E.I. (2005). *Oil Sorbents*. Izhevsk: NITs "Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika" Publ.
- [26] Tsombueva, B.V., Goryashkueva, Z.V., & Scherbakova, L.F. (2017). The method of cleaning soil from oil pollution by using natural sorbents. *Bulletin of VolGU. Series 11, Natural Sciences*, 7(2), 19-25. doi: 10.15688/jvolsu.11.2017.2.3.
- [27] Karpenko, E.V., Pokinbroda, T.Ya., Makitra, R.G., & Palchikova, E.Ya. (2009). Optimal methods for the isolation of biogenic surfactant rhamnolipids. *Russian Journal of General Chemistry*, 12, 2011.
- [28] Gritsaenko, Z.M., Gritsaenko, A.O., & Karpenko, V.P. (2003). *Methods of biological and agrochemical research of plants and soil*. Kyiv: ZAT Nichlava.
- [29] Musienko, M.M., Parshikova, T.V., & Slavniy, P.S. (2001). *Spectrophotometric methods in the practice of physiology, biochemistry and ecology of plants*. Kyiv: Fitosotsiotsentr.
- [30] Bagnyukova, T.V., Lushchak, O.V., Storey, K.B., & Lushchak, V.I. (2007). Oxidative stress and antioxidant defense responses by goldfish tissues to acute change of temperature from 3 to 23 °C. *Journal of Thermal Biology*, 32, 227-234. doi: 10.1016/j.jtherbio.2007.01.004.
- [31] Romaniuk, O.I., Shevchyk, L.Z., Oschapovskiy, I.V., & Zhak, T.V. (2016). Method of ecological assessment of oil-contaminated soils. *Biosystems Diversity*, 24(2), 264-269. doi: 10.15421/011633.
- [32] Casida, L., Klein, D., & Santoro, T. (1964). Soil dehydrogenase activity. *Soil Science*, 98, 319-328.