

РОЗРОБКА ФІТОРЕМЕДІАЦІЙНИХ КОМПОЗИЦІЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ НАФТОЮ ТА ЇЇ ПОХІДНИМИ

Романюк О.І.¹, Борецька І.Ю.^{1,2}, Шевчик Л.З.¹, Ощеповський І.В.²

¹Відділення фізико-хімії горючих копалин Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії імені Л. М. Литвиненка Національної академії наук України
вул. Наукова, 3А, м. Львів, 79022, Україна

²Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Грушевського, 4, 79005, Львів
romaniuk@ua.fm, ira.boretska2017@gmail.com

Екологічні проблеми пов'язані з забрудненням ґрунтів нафтою, нафтопродуктами, дизельним паливом та іншими паливно-мастильними матеріалами набули особливої актуальності в час воєнних дій на території України і потребують термінового і ефективного вирішення.

Досліджено фіторемедіаційний потенціал рослин бобу (*Vicia faba* L.) та фіторемедіаційної композиції бобу з вівсом посівним (*Avena sativa* L.) у відновленні ґрунтів, забруднених нафтою (1–15%) та її похідними (1,5%).

Вивчено вплив вуглеводнів різної будови з різною довжиною вуглеводневого ланцюгу (толуол, циклогексан, октан, ізо-октан, ундекан) на ріст рослин *V.faba* та зниження токсичності забрудненого ґрунту. Показано зростання схожості насіння рослин *V.faba* в умовах забруднення ґрунту похідними нафти (1,5%): толуолу – на 13%, циклогексану – на 7%, октану – на 16%, ундекану – на 3%, відносно контролю та стимулювання росту кореня бобу вдвічі за дії октану та пагона на 10 % за дії ізо-октану. Доведено, що рослини *V. faba* прискорюють процес біодеградації нафти у ґрунті. За низьких концентрацій нафти 1%, ґрунт очистився на 100%; за дії нафти 2% сумарне очищення ґрунту становило 92%, а за дії нафти 5% і 10% – 70 і 61,7% відповідно.

Встановлено, що спільне зростання *V. faba* з *A. sativa* на нафтозабруднених ґрунтах, підвищує стійкість рослин *A. sativa* та *V. faba* на різних етапах розвитку і росту, що проявляється у збільшенні морфометричних показників *A. sativa*: довжини кореня на 67%, висоти пагона на 30%, вмісту фотосинтетичних пігментів у листках на 16–25%. Розроблено фіторемедіаційну композицію *V. faba*+ *A. sativa* (1: 20–50), що забезпечує високий 85% ступінь очищення ґрунтів від нафтового забруднення (5%) без додаткового внесення добрив та інших агентів ремедіації. *Ключові слова*: фіторемедіація, нафтозабруднені ґрунти, *Vicia faba*, *Avena sativa*.

The development of phytoremediation compositions for cleaning of soils, polluted by oil and oil derivatives. Romanyuk O., Boretska I., Shevchyk-Kostiuk L., Oshchapovskyy I.

Ecological problems, associated with pollution of soils by oil, oil products, diesel fuel and other fuel and lubrication materials have become especially important during war at the territory of Ukraine and demand prompt and effective solution.

The phytoremediation potential of bean plants (*V. faba*) and the phytoremediation composition of beans with oats (*A. sativa*) towards recultivation of oil – (1–15 %) and oil-derivative (1.5%) polluted soil was studied. It was established that joint vegetation of *V. faba* together with *A. sativa* on oil-polluted soils improves the resilience of plants of both species at the different stages of growth and development.

An influence of hydrocarbons of various structure and chain length (toluene, cyclohexane, octane, iso-octane, undecane) on growth of *V.faba* plants and toxicity of polluted soil was studied. An increase of germination of *V.faba* seeds in comparison to control under soil pollution by the following oil derivatives (1.5 wt. %) was revealed: 13% for toluene, 7% – cyclohexane, 16% – octane, 3% – undecane. Twofold increase of bean root growth under the influence of octane and 10% increase of shoot growth under the influence of iso-octane was shown as well. An increase of morphometric parameters of *A. sativa* was observed: root length in 67%, shoot height in 30%, photosynthetic pigments content in leaves in 16–25%.

It has been proven that *V.faba* plants accelerate biodegradation of oil in soil. In case of low oil concentration 1% the soil was cleaned in 100%; in case of 2% of oil the total degree of cleaning was 92%, whereas under influence of 5% and 10% oil – 70 and 61,7% respectively.

The phytoremediation composition *V. faba* + *A. sativa* (1: 20–50) has been developed, which achieves high 85% degree of cleaning of soil from oil pollution (5%) without addition of fertilizers and other remediation agents. *Key words*: phytoremediation, oil-contaminated soils, *Vicia faba*, *Avena sativa*.

Постановка проблеми та актуальність.

Екологічні проблеми пов'язані з забрудненням ґрунтів нафтою, нафтопродуктами, дизельним паливом та іншими паливно-мастильними матеріалами набули особливої актуальності в час воєнних дій на території України і потребують термінового і ефективного вирішення з метою повернення

земель до їх цільового господарського використання. Враховуючи економічні складності воєнного сьогодення, загострення екологічної ситуації в ряді районів України, обумовлені наслідками ворожих бомбардувань складів з паливномастильними матеріалами, запропоновані технології відновлення ґрунтів мають бути простими і швидкими

в реалізації, економічно вигідними і екологічно безпечними.

Систематизація та узагальнення літературних даних про особливості нафтового забруднення ґрунтів та їх рекультивациі вказують на перспективність використання фітореємедіаційних технологій [1–5]. Фітореєкультивація не вимагає еєкєавациі ґрунту, є економічно вигідною, не передбачає великих одно-разових капіталовкладень, є найбільш еєстетичною, характеризується тривалішим впливом і стабільним покращенням якості довкілля на великих площаєх.

Однає, успішне проведення фітореємедіації нафтозаєруднених ґрунтів є непростим завданням через гідрофобність та високу тоєсичність нафто-продуктів, значне порушення водоповітряного балансу ґрунту та співвідношення основних елементів живлення: С та N, що робить неможливим зростання більшості рослин у ньому. Саме тому практично не розроблені і не втілені фітотехнології очищення ґрунту від нафтового забруднення. Для вирішення цієї актуальної проблеми необхідна розробка ефективних фітореємедіаційних композицій стійких до нафтового забруднення та придатних до використання в фітореємедіаційних технологіях.

Мета роботи – розробка стійких до нафтового забруднення фітореємедіаційних композицій, придатних до ефективного використання в технологіях відновлення ґрунтів, забруднених нафтоєу та її похідними.

Методика досліджень. Модельні дослідження фітореємедіаційних можливостей бобу кормового (*Vicia faba* L.) проводили на території Відділення фізико-хімії горючих копалин Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України. Просіяний ґрунт штучно забруднювали вуглеводнями (толуол, циклогексан, октан, ієооктан, ундекан) або сирєю нафтоєу у кількості 1–15%. Вегетаційні посудини наповнювали забрудненим ґрунтом і через місяць (час, необхідний для вивітрювання летких тоєсичних нафтопродуктів) висівали *V. faba*. Після 46 днів вегетації, відбирали рослини для аналізу та визначали ростові показники за методиками [6]. Фітотокєсичність ґрунту оцінювали за допомогою тест-об'єкту льону звичайного (*Linum usitatissimum* L.) [7]. Вміст фотосинтетичних пігментів визначали за методикоєу [8]. Результати опрацьовували статистично з використанням критерієу Ст'юдента та програми MS Excel.

Польові дослідження проводили на відвальних нафтозаєруднених ґрунтаєх озокеритовидобутку м. Борислава.

Виклад основного матеріалу. Відомо про стійкість бобових (*Fabaceae*) до нафтового забруднення, що пояснюється здатністю фіксувати атмосферний азот і, таким чином, забезпечувати себе джерелом мінерального живлення у нафтозаєрудненому ґрунті. Окрім того, кореневі симбіонти бобових із роду *Rhizobium* здатні не лише фіксувати азот пові-

тря, але й розклаєдати вуглеводні нафти і використувати їх як альтернативне джерело живлення [1, 9].

Досліджено фітореємедіаційні можливості бобу в умовах забруднення ґрунтів нафтоєу та нафтопродуктами, в т.ч. вплив різних вуглеводнів (лінійні, циклічні, ароматичні) з різною довжиною вуглеводневого ланцюгу на рієт рослин *V. faba* та зниження тоєсичності забрудненого ґрунту.

Встановлено зростання схожості насіння рослин *V. faba* в умовах забрудненого ґрунту окреими вуглеводнями (1,5%): за дії толуолу – на 13%, циклогексану – на 7%, октану – на 16%, ундекану – на 3%, відноєсно контролю. За дії толуолу виявлено зростання маси сирєї речовини і зниження вмієту сухої речовини у органах дослідних рослин. За дії октану довжина наземної частини рослини *V. faba* сягала контролю, тоді як наєромадження сирєї і сухої маси кореня збільшувалося майже удвічі. Аналог октану ієооктан стимулював рієт надземної частини рослини на 10%. За дії ундекану також спостерігали незначне ($\leq 3\%$) стимулювання росту рослин *V. faba* відноєсно контролю. Циклогексан призводив до стимулювання наєромадження сирєї маси кореня на 43% і зниження в ньому частки сухої речовини удвічі відноєсно контролю.

Досліджено фітореємедіаційний потенціал рослин бобу у відновленні ґрунтів, забруднених нафтоєу (1–15%). Показано позитивний вплив рослин *V. faba* на зниження фітотокєсичності нафтозаєрудненого ґрунту. Так, відноєсна схожієть насіння тестової рослини *L. usitatissimum* на нафтозаєрудненому ґрунті (2%, 5% і 10%) становила 93,3; 70 та 73,3%, тоді як після трьох місяців фітореєкультивації рослинами *V. faba* – 110,4; 110,4; і 104,3% відповідно. Для нафтозаєрудненого ґрунту 15% відноєсна схожієть *L. usitatissimum* після трьох місяців рекультивациі рослинами *V. faba* зросла у 2,5 рази (рис. 1). Аналогічну закономірність виявлено при дослідженні інших тест-показників – відноєсна довжина кореня та висота пагона *L. usitatissimum* на фітореєкультивованих ґрунтаєх також поступово збільшувалися (рис. 1).

Аналіє ґрунтів на вмієт нафтопродуктів підтвердив, що рослини *V. faba* прискорюють процес біодеєградації нафти у ґрунті (табл. 1). В результаті фітореємедіації, за низьких концентрацій нафти 1%, ґрунт очистився на 100%; за дії нафти 2% сумарне очищення ґрунту становило 92%, а за дії нафти 5% і 10–70 і 61,7% відповідно.

Польові дослідження, що охоплювали повний вегетаційний період *V. faba*, показали 77% очищення ґрунту від нафтового забруднення при початковій концентрації нафти в ґрунті 5% (табл. 2).

Отже, у процесі реємедіації нафтозаєруднених ґрунтів рослинами *V. faba* кількість нафтопродуктів у ґрунті зменшується, фітотокєсичність знижується, що євідчить про перспективність використання бобу у фітотехнологіях відновлення ґрунтів.

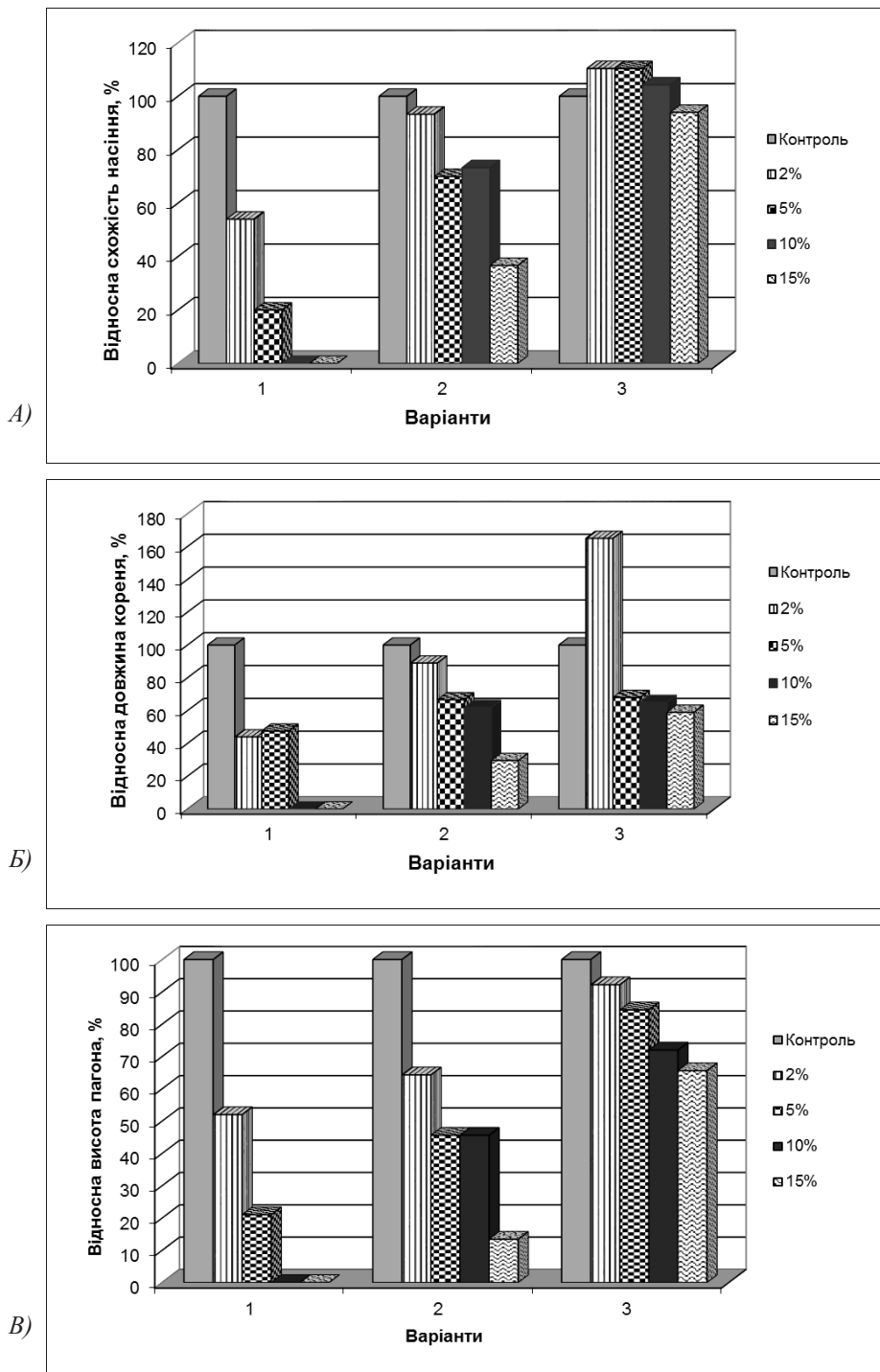


Рис. 1. Відносна схожість насіння (А), відносна висота кореня (Б) і відносна висота пагона (В) фітотесту *Linum usitatissimum* L. на нафтозабруднених ґрунтах: 1 – свіжозабруднений нафтою ґрунт; 2 – нафтозабруднений ґрунт, рекультивований рослинами *V. faba* 1,5 місяці; 3 – нафтозабруднений ґрунт, рекультивований рослинами *V. faba* 3 місяці

Проте, слід зазначити, що через певні морфологічні особливості бобу, вирощування *V. faba* на великих нафтозабруднених територіях, потребуватиме додаткових агротехнічних заходів і, відповідно, приведе до ускладнення та здорожчання фітотехнології. Зокрема, через щільну поверхню насінної шкірки, біб потребує тривалого часу проростання і достат-

нього зволоження, що не завжди можливо в умовах нафтового забруднення ґрунтів при не сприятливих погодних умовах. Це може стати суттєвою проблемою і привести навіть до загибелі посівів, ще на стадії проростання рослин. Цього можна запобігти, якщо включити до ремедіаційної системи поряд з бобом іншу рослину, відносно толерантну до нафто-

Таблиця 1

Вплив рослин *V. faba* на біодеградацію нафти у ґрунті. Модельні досліді з штучно забрудненими нафтою ґрунтами

Початкове забруднення ґрунту нафтою, %	Залишкове забруднення ґрунту нафтою, %	Очищення ґрунту, %
1,00	0	100,00
2,00	0,18	92,00
5,00	1,50	70,00
10,00	3,83	61,70

вого забруднення, з вищою швидкістю проростання насіння та пагона. Цим критеріям відповідає овес посівний, який згідно з попередніми дослідженнями [10] є також толерантним до нафтового забруднення, хоча і в меншій мірі, ніж біб. При сумісній посадці насіння бобу та вівса, швидке проростання останнього забезпечить зелений покрив, що запобігатиме перегріванню поверхні ґрунту і створить сприятливі умови для проростання бобу, а в подальшому забезпечить вертикальну підтримку його стебла. В той же час, дорослі особини бобу постачатимуть рослини вівса додатковим джерелом органічного азоту за рахунок симбіозу бобових з азотофіксуючими бактеріями. Велика площа кореневої системи вівса сприятиме розпушуванню ґрунту та кращому постачанню киснем поверхневого шару ґрунту.

Тобто композиційні штучні насадження двох рослин: бобу та вівса будуть толерантними до нафтового забруднення, матимуть високу механічну еластичність посівів, потужну різнопланову систему коренів, здатність забезпечити себе азотом та рости у погано аерованому ґрунті. Додавання в таку систему комплексу добрив та лушпиння соняшника сприятиме стійкості та продуктивності такої симбіотичної ремедіаційної системи. Це було підтверджено експериментально.

Таблиця 2

Вплив рослин *V. faba* на біодеградацію нафти у ґрунті в польових умовах

Початкове забруднення ґрунту нафтою, %	Залишкове забруднення ґрунту нафтою, %	Очищення ґрунту, %
5,00	1,15	77,00
10,00	3,40	66,00

Модельні дослідження проводили в ящиках об'ємом 10 л з нафтозабрудненим ґрунтом (5% нафти на 1кг ґрунту). Через 30 днів після внесення нафти у ґрунт (необхідний термін для вивітрювання летких токсичних нафтопродуктів) висаджували попередньо замочене у воді (15 год.) насіння бобу, вівса посівного, їх суміші (1:20–50). Контролем слугували рослини вирощені у ґрунті без нафти. Період деградації нафти у ґрунті тривав 120 днів, з них 90 днів – період очищення ґрунту за участю рослин. Після зазначеного терміну визначали вміст нафтопродуктів у ґрунтах.

З отриманих результатів видно (рис. 2, 3), що при зростанні на нафтозабрудненому ґрунті, рослини *A. sativa* краще проростали і нагромаджували біомасу у композиційних насадженнях з *V. faba* (варіант 3), аніж без нього (варіант 2). Застосування добрива ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{K}_2\text{HPO}_4$) (варіант 4) і лушпиння соняшника (варіант 5) незначно стимулювало ростові процеси досліджуваних фіторемедіантів.

Така ж тенденція спостерігалась при дослідженні вмісту фотосинтетичних пігментів у листках *A. sativa* (рис. 4). Вміст хлорофілу *a*; хлорофілу *b* та суми хлорофілів *a+b* був вищим у варіанті за сумісного проростання *A. sativa* з *V. faba* (рис. 4, варіант 3), ніж у варіанті монопосівів *A. sativa* (рис. 4, варіант 2).

Отже композиційні насадження *V. faba* + *A. sativa* є стійкими до нафтового забруднення і придатні до використання в фіторемедіаційних технологіях відновлення ґрунтів.

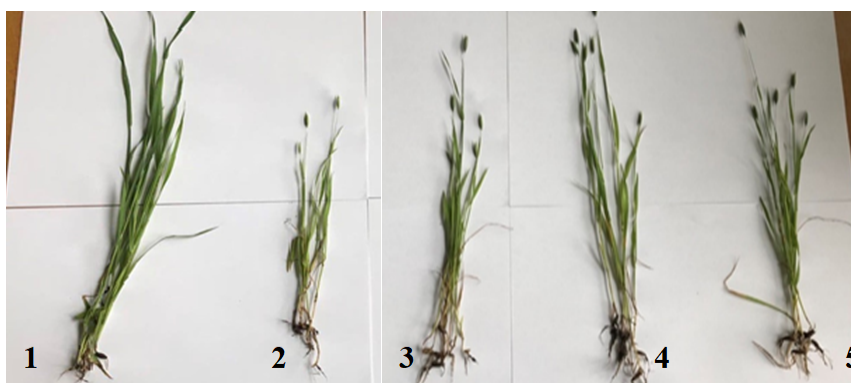


Рис. 2. Рослини *A. sativa* за сумісного зростання з *V. faba* у нафтозабрудненому ґрунті: 1 – контроль (ґрунт без нафти) + *A. sativa*; 2 – нафтозабруднений ґрунт (5%) + *A. sativa*; 3 – нафтозабруднений ґрунт (5%) + *A. sativa* + *V. faba*; 4 – нафтозабруднений ґрунт (5%) + *A. sativa* + *V. faba* + добрива; 5 – нафтозабруднений ґрунт (5%) + *A. sativa* + *V. faba* + добрива + лушпиння соняшника

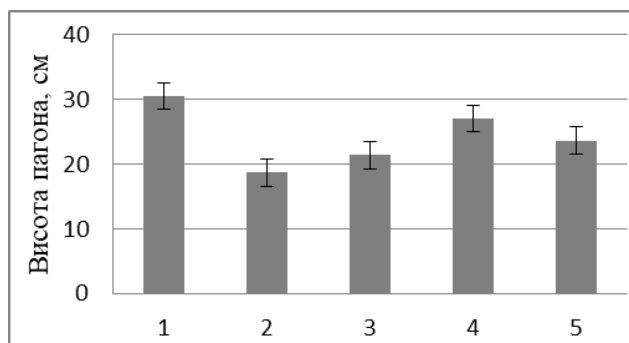
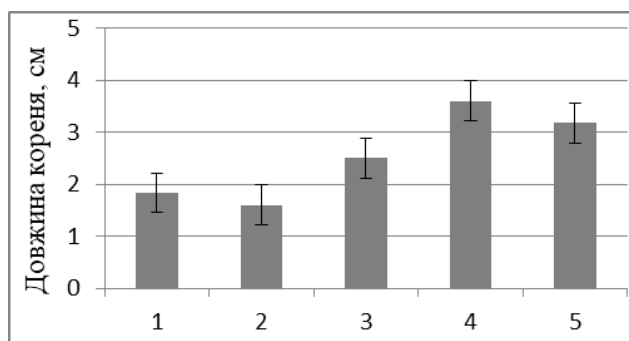


Рис. 3. Ростові показники *A. sativa* за сумісного зростання з *V. faba* у нафтозабрудненому ґрунті:

- 1 – контроль (ґрунт без нафти) + *A. sativa*;
- 2 – нафтозабруднений ґрунт (5%) + *A. sativa*;
- 3 – нафтозабруднений ґрунт (5%) + *A. sativa* + *V. faba*;
- 4 – нафтозабруднений ґрунт (5%) + *A. sativa* + *V. faba* + добрива;
- 5 – нафтозабруднений ґрунт (5%) + *A. sativa* + *V. faba* + добрива + лушпиння соняшника

Спільне зростання *V. faba* з *A. sativa* підвищувало стійкість рослин *A. sativa* та *V. faba* на різних етапах розвитку і росту, що проявлялося у збільшенні довжини кореня на 67%, висоти пагона на 30%, а фотосинтетичних пігментів у листках на 16–25 % (рис. 2–4). Внесення мінеральних добрив і сорбенту (лушпиння соняшника) мало впливало на ростові показники рослин, а також вміст хлорофілів (варіанти 4, 5) у порівнянні з результатами без цих добавок за сумісного зростання бобу та вівса (варіант 3). Тобто результати проведених досліджень свідчать, що за використання фітореMediaційної композиції *V. faba* + *A. sativa* є можливим проведення ефективної рекультивaції нафтозабруднених ґрунтів навіть без внесення мінеральних добрив та інших реMediaційних агентів, що додатково здешевлює таку технологію.

Здійснене відновлення нафтозабруднених ґрунтів (5% нафти) в реальних польових умовах (м. Борислав) показало, що використання фітореMediaційної композиції *V. Faba* + *A. sativa* (1:20–50) забезпечує високий 85% ступінь очищення ґрунтів від нафтового забруднення (табл. 3).

Використання запропонованої композиції у фітореMediaційних технологіях не вимагає додаткового внесення добрив, забезпечує ріст і розвиток трав'я-

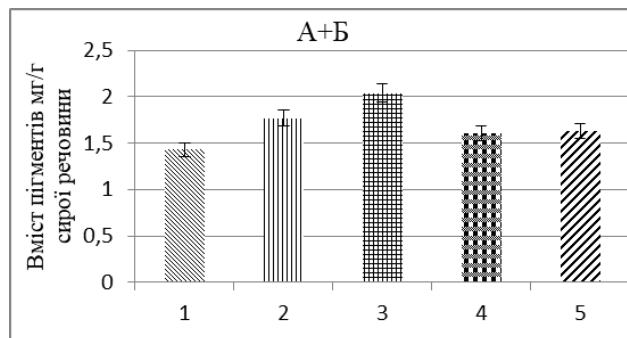
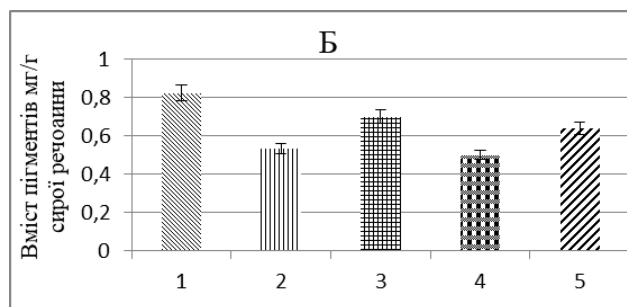
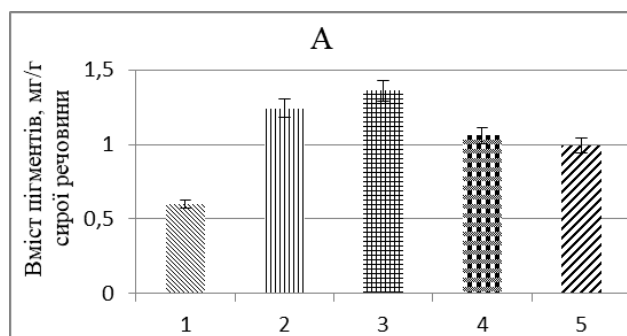


Рис. 4. Вміст фотосинтетичних пігментів у листках *A. sativa* за сумісного зростання з *V. faba* у нафтозабрудненому ґрунті: А – вміст хлорофілу а; Б – вміст хлорофілу b; А+Б – вміст хлорофілу а+b. 1 – контроль (ґрунт без нафти) + *A. sativa*; 2 – нафтозабруднений ґрунт (5%) + *A. sativa*;

Таблиця 3
Вплив рослин на біодеградацію нафти у ґрунті за початкового забруднення ґрунту 5% (природні умови)

ФітореMediaнти	Залишкове забруднення, %	Очищення ґрунту, %
<i>V. faba</i>	1,2	77,0
<i>V. faba</i> + <i>A. sativa</i>	0,8	85,0

ної рослинності всього за один вегетаційний період, сприяє відновленню вуглецево-азотного балансу ґрунту, забезпечує ефективне (85%) очищення земель від нафтового забруднення та повернення до сільськогосподарського ужитку.

Головні висновки. Вперше розроблено фіто-ремедаційну композицію, що включає біб кормовий + овес посівний (1:20–50) для відновлення нафтозабруднених територій насінєвим способом, що забезпечує високий ступінь очищення ґрунтів. Використання запропонованої композиції підвищує ефективність фіторемедації шляхом одночасного використання декількох стійких до

нафтового забруднення рослин, котрі селективно очищують ґрунт від нафта на 85%, при початковому забрудненні 5%, знижують фітотоксичність, спрощують та здешевлюють процес за рахунок мінімізації затрат на підготовку ґрунту та можливість проведення рекультивації без внесення мінеральних добрив та інших агентів ремедації.

Література

1. Adam G., Duncan H. The effect of diesel fuel on common vetch (*Vicia sativa* L.) plants. *Environ Geochem Health*. 2003. Vol. 25, Issue 1. P. 123–130.
2. Merkl N., Schultze-Kroft R., Infant C. Assessment Of Tropical Grasses And Legumes For Phytoremediation Of Petroleum-Contaminated Soils. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2005. Vol. 165, Issue 1–4. P. 195–209.
3. Dzhura N., Romanyuk O, Oshchapovsky I. Using plants for recultivation of oil-polluted soils. *J. Environmental protection and ecology*. 2008. Vol. 9, Issue 1. P. 55–59.
4. Муратова, А. Ю., Бондаренкова А. Д., Панченко Л. В, Турковская О. В. Использование комплексной фиторемердиации для очистки почвы, загрязненной нефтешламом. *Биотехнология*. 2010. № 1. С. 77–84.
5. Шевчик Л. З., Романюк О. І. Аналіз біологічних способів відновлення нафтозабруднених ґрунтів. *Scientific Journal «ScienceRise: Biological Science»*. 2017. № 1(4). С. 31–39.
6. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів / Грицаєнко З. М., Грицаєнко А. О., Карпенко В. П. К. : ЗАТ Нічлава, 2003. 320 с.
7. Романюк О. І., Шевчик Л. З., Ощеповський І. В., Жак Т. В. Методика екологічного оцінювання нафтозабруднених ґрунтів. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія, екологія*. 2016. № 24(2). С. 264–269.
8. Мусієнко М.М., Паршикова Т.В., Славний П.С. Спектрофотометричні методи в практиці фізіології, біохімії та екології рослин. К. : Фітосоціоцентр, 2001. 200 с.
9. Frick C. M., Farrell R. E, Germida J. J. Assessment of phytoremediation as an in situ technique for cleaning oil-contaminated sites. *PTAC Petroleum Technology Alliance, Canada, Calgary*, 1999. 88 p.
10. Шевчик-Костюк Л. З., Романюк О. І., Баня А. Р. Підвищення ефективності фіторемедаційних технологій нафтозабруднених ґрунтів за участі природних сорбентів-меліорантів. *Scientific Horizons*, 2020, Vol. 23, No. 10, 7–16.