

Перспективи використання буркуну білого та буркуну жовтого для відновлення земель України: огляд

Романюк О. І.¹, Романюк Г. В.¹, Шевчик-Костюк Л. З.¹, Ощиповський І. В.²

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

²Інститут ядерної фізики ім. Генрика Неводнічанського Польської Академії Наук
lesyashevchik@gmail.com

Ключові слова: забруднені ґрунти, фіторе mediaція, *Melilotus albus*, *Melilotus officinalis*, нафтопродукти, важкі метали.

Повоєнне майбутнє вимагатиме розв'язання одного із важливих завдань – відновлення порушених, забруднених земель України.

Успішність застосування фіторе mediaційних технологій для відновлення ґрунтів, при їх комплексному забрудненні, лімітуватиметься нафтовим забрудненням, яке дуже токсичне для рослин. Встановлення перспективних фіторе mediaнтів для відновлення порушених ґрунтів, забруднених важкими металами, нафтою та її похідними є актуальним завданням сьогодення. Бобові трави з потужною кореневою системою можуть бути перспективними фіторе mediaнтами порушених ґрунтів, забруднених важкими металами, нафтою та її похідними.

В роботі представлено аналіз сучасних джерел щодо фіторе mediaційних можливостей буркуну білого (*Melilotus albus*) та буркуну жовтого (*Melilotus officinalis*) і оцінювання перспективи використання їх у повоєнному відновленні ґрунтів України.

Показано, що *Melilotus* – незамінна бобова трав'яниста рослина для освоєння засолених земель, закріплення відкосів ярів різної крутизни. Своїм глибоко проникаючим корінням буркун скріплює ґрунт, чим створює кращі умови водопроникності, а надземна частина рослини запобігає його змиванню дощовою водою на схилі. Відзначено, що *Melilotus* стійкий до забруднення ґрунту важкими металами: Cr, Cu, Ni, Zn, Mo, Cd, Hg, Pb. При цьому, діючи як фітостабілізатор, *M. officinalis* накопичує метали переважно в коренях, а тому подальше використання його надземної рослинної біомаси є безпечним.

Відзначено, що *M. officinalis* стійкий до умов нафтозабрудненого ґрунту з концентрацією нафти 0,1-5 % і має здатність збирати у ризосфері специфічні ґрунтові бактеріальні консорціуми, які, очевидно, беруть участь у розкладанні нафти, чим можна пояснити високу фіторе культивуаційну роль цієї рослини – зниження вмісту вуглеводнів в ґрунті на 8,8-51,1%. Фіторе mediaційний потенціал *M. officinalis* в рази вищий, ніж у *M. albus*. Буркун білий і буркун жовтий культивується в Україні, і є наявні селекційні центри для нього, а отже, відносно недороге насіння. Враховуючи все вищенаведене, вважаємо буркун перспективною рослиною для реалізації фіторе культивуаційних технологій повоєнного відновлення постраждалих земель.

Ключові слова: забруднені ґрунти, фіторе mediaція, *Melilotus albus*, *Melilotus officinalis*, нафтопродукти, важкі метали.

Prospects of using sweet clover *Melilotus albus* and sweet yellow clover *Melilotus officinalis* plants for recultivation of soils of Ukraine: review

Romaniuk O. I.¹, Romaniuk H. V.¹, Shevchyk-Kostiuk L. Z.¹, Oshchapovsky I. V.²

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

² Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences

lesyashevchik@gmail.com

Key words: contaminated soils, phytoremediation, *Melilotus albus*, *Melilotus officinalis*, petroleum products, heavy metals.

Recultivation of disturbed and polluted soils is one of the important tasks demanding solution in post-war future.

The effectiveness of technologies of phytoremediation of soils under complex pollution of them will be limited by oil pollution, which is very toxic for plants. Selection of promising phytoremediation agents for recultivation of disturbed soils, polluted by heavy metals, oil and its derivatives is an important task nowadays. Herbaceous leguminous plants with highly developed root system can be promising phytoremediation agents for disturbed soils, polluted by heavy metals, oil and its derivatives.

The paper presents analysis of contemporary literature sources concerning phytoremediation capabilities of sweet clover *Melilotus albus* and sweet yellow clover *Melilotus officinalis* plant species and the evaluation of their potential use in post-war reclamation of soils of Ukraine.

It was shown that *Melilotus* species are the essential herbaceous leguminous plants for reclamation of salt-affected lands, soil fastening of inclines of ravines of various steepness. *Melilotus* plants fasten soil by their deep penetrating roots, which facilitate penetration of water, whereas their above-ground parts prevent soil erosion on the slope by rain water.

It is worth noting that *Melilotus* species are resistant to soil pollution by heavy metals: Cr, Cu, Ni, Zn, Mo, Cd, Hg, Pb. *M. officinalis* acts as phytostabilizer. It accumulates heavy metals mostly in its roots, whereas further usage of its above-ground biomass is safe.

It was shown that *M. officinalis* species is resistant against oil concentration 0,1-5 % in soil and can collect specific soil microbial consortia in its rhizosphere which take part in oil decomposition. This explains its high recultivation potential – 8,8-51,1% decrease of hydrocarbon content in soil. Phytoremediation potential of *M. officinalis* species is several times higher than *M. albus* species.

M. albus and *M. officinalis* are cultivated in Ukraine. There are selection centers and production companies working with it. Therefore relatively inexpensive seed is available. As a summary of all the aforementioned information we consider *Melilotus* as promising species for the implementation of phytorecultivation technologies for the post-war reclamation of the affected soils.

Key words: contaminated soils, phytoremediation, *Melilotus albus*, *Melilotus officinalis*, petroleum products, heavy metals.

Вступ

Воєнне сьогодення та повоєнне майбутнє вимагатимуть розв'язання одного із важливих завдань – відновлення порушених, забруднених земель України. Відновленню підлягатимуть як сільськогосподарські землі, так і несільськогосподарські угіддя, що зазнали значних техногенних змін внаслідок вибухів, знищення рослинності, порушення рельєфу.

Через пошкодження підприємств та складів металургійної, нафтової, хімічної, фармацевтичної промисловості в довкілля потрапили продукти та напівпродукти тонкого та багатотоннажного хімічного синтезу, пестициди, радіонукліди, важкі метали, відбулись аварійні витoki нафти, бензину, гасу, дизельного пального. Тотальне хімічне забруднення сільськогосподарських земель та деструктивні зміни у родючому шарі ґрунту стали значною проблемою аграрного сек-

тору. Дедалі частіше спостерігається деградація, втрата гумусу, поживних речовин, водна й повітряна ерозія, замулювання та кіркоутворення, переуцільнення, підкислення і заболочування ґрунтів, втрата природного біорізноманіття^{1,2}.

Природне самоочищення ґрунтів – складний, довготривалий процес, який не завжди завершується повним відновленням ґрунтової екосистеми. У промислово розвинених країнах світу найбільш перспективним методом відновлення ґрунтів вважається фітореMediaція³⁻⁵. Ця технологія забезпечує стабільне покращення екологічної ситуації, динамічне відновлення ґрунту без екскавації і може застосовуватись на великих площах^{6,7}. ФітореMediaція приваблює своєю природністю, екологічністю та економічністю⁸. Фітотехнології можуть застосовуватись як для органічних забруднювачів: нафтових вуглеводнів, газових конденсатів, хлорованих сполук, пестицидів, вибухових речовин, так і неорганічних забруднювачів: важких металів, металоїдів, радіоактивних матеріалів та солей.

Значна частина сільськогосподарських земель України, внаслідок воєнних дій, зазнала біологічної, фізико-хімічної, структурної руйнації та комплексного забруднення шкідливими речовинами: важкими металами, нафтою та її похідними. Успішність застосування фітореMediaційних технологій для відновлення ґрунтів при їх комплексному забрудненні лімітуватиметься нафтовим забрудненням, яке дуже токсичне для рослин. Встановлення перспективних фітореMediaнтів для відновлення порушених ґрунтів, забруднених важкими металами, нафтою та її похідними, є актуальним завданням сьогодення.

Натепер розвинутим є напрямок фітоочистки ґрунтів від важких металів⁹⁻¹⁴, однак, мало дослідженим є напрямок фітореMediaції ґрунтів, забруднених нафтою, нафтопродуктами, пально-мастильними матеріалами. ФітореMediaція нафтозабруднених ґрунтів є непростим завданням. Умови нафтозабрудненого ґрунту роблять неможливим зростання більшості рослин через гідрофобність та високу токсичність нафти, значне порушення водоповітряного балансу та співвідношення основних мікроелементів живлення. Довгокореневищні види рослин здатні отримувати вологу зі значних глибин 3-5 м, що дозволяє їм виживати в умовах гідрофобності ґрунту¹⁵. Відмічається позитивний ефект використання злакових^{16,17}, які завдяки великій поверхні кореня та кореневим виділенням стимулюють ріст мікроорганізмів і, відповідно, розкладання нафти. Бобові (*Fabaceae*) здатні фіксувати атмосферний азот та забезпечувати себе джерелом мінерального живлення у нафтозабрудненому ґрунті^{18,19}. Високу реMediaційну здатність показують також деревні

та чагарникові види рослин, для яких характерний симбіоз з азотфіксуючими бактеріями, зокрема, обліпіха крушиновидна (*Hippophae rhamnoides* L.)²⁰. Власний науковий досвід та попередній аналіз літературних джерел наводять на думку, що бобові трави з потужною кореневою системою – буркун білий та буркун жовтий – можуть бути перспективними фітореMediaнтами порушених ґрунтів, забруднених важкими металами, нафтою та її похідними. Однак, систематичних даних про використання цих культур у фітореMediaційних технологіях вкрай мало.

Мета дослідження – аналіз сучасних джерел щодо фітореMediaційних можливостей буркуну білого та буркуну жовтого та оцінювання перспективи їх використання у повоєнному відновленні ґрунтів України.

Біологічна характеристика буркуну білого та буркуну жовтого

Буркун білий (*Melilotus albus* L.) – рослина роду буркунів (*Melilotus*), родини бобових (*Fabaceae*). Рослина євразійського й північноафриканського походження, натуралізована й культивується у тропічному й помірному поясах світу. Дворічна або однорічна невитка трав'яниста рослина, з товстим коренем, голим або з розсіяними волосками. Стебла 30-200 см, прямостоячі, часто дуже розгалужені. Нижні листки з листочками 1-2,5 x 0,5-1,5 см, від довгастих до оберненояйцюватих, прилистки лінійні. Суцвіття з 40-60 квітками, може досягати 9 см у плодоношенні. Квіти ароматні. Чашечка 1,3-2 мм, дзвінчаста, блідо-зелена, зубці 0,7-1 мм, рівні, вузько трикутні. Віночок 2,5-4(6) мм, білий. Плід $\approx 3,5 \times 2$ мм з 1-2 насінинами. Насіння $\approx 2,2 \times 1,4$ мм, яйцеподібне, гладке. Маса 1000 насінин 2-2,2 г²¹.

Буркун білий – холодостійка, вологолюбна, порівняно посухостійка рослина, азотфіксатор і фітомеліорант. До настання повного цвітіння від початку сходів минає 65-70 днів, вегетаційний період 120-140 днів. Поширений на всій території України. Добре росте майже на всіх польових ґрунтах, включаючи солонці і ґрунти на малопроникних глинах. На сьогодні буркун білий однорічний забезпечує урожайність зеленої маси 25-30 т/га і більше, насіння 0,55-0,8 т/га^{22,23}. *M. albus* – важливий медонос. Поліпшення кормової бази бджіл досягається розширенням посівних площ буркуну білого, нектарокормових сумішок (наприклад, буркуну білого з кукурудзою), висіванням медоносів на непридатних землях (схилах балок, горбів, ярів), підсіванням на луках і пасовищах²⁴.

Добре розвинена коренева система буркуну захищає ґрунт від змивання і видування пиловими бурями. Своїм глибоко проникаючим корінням він скріплює ґрунт, чим створює кращі умови водо-

проникності. При цьому надземна частина рослини запобігає його змиванню дощовою водою на схилі. Серед інших бобових, *Melilotus* дуже швидко та успішно заселяє змиті ґрунти. Після збирання покривної культури до початку зими висота рослин досягає 30-35 см, що сприяє затриманню снігу і, відповідно, запобігає видуванню ґрунту в зимовий період²⁵.

Буркун лікарський або буркун жовтий (*Melilotus officinalis* (L.) Pall.) – рослина роду буркунів (*Melilotus*), родини бобових (*Fabaceae*). Дворічна трав'яниста розгалужена рослина 60-150 см заввишки з черговими трійчастими листками, дрібнозубчастими з країв. Середній листочок з черешком, бічні – майже сидячі. З пазів листків виходять гілки з довгими багатоквітковими пазушними китицями з дрібних жовтих запашних квіток (пахнуть кумарином – сіном), біля основи листка є два шилоподібні прилистки. Чашечка дзвоникувата. Цвіте з червня до вересня. Плід – одно-, двонасінний біб, який досягає у серпні-вересні. Листки буркуну присмерком або перед дощем піднімаються догори і складаються. Це сприяє зменшенню випромінювання внутрішнього тепла рослини і, очевидно, є захистом від небажаного підвищення вологості повітря біля продихів. Квітки запилюються джмелями. Росте на перелогах, схилах, уздовж доріг, на пустищах, засмічених місцях, толоках, у ярах, на межах, у канавах, на парових полях. Росте по всій Україні, де місцями утворює зарості. З господарською метою буркун лікарський широко застосовують у фармацевтичній, парфумерній промисловості, у лікєро-горілчаному виробництві. Буркун жовтий – добрий медонос та кормова культура²⁶.

Буркун активно культивується в Україні. Селекційними центрами буркуну є Інститут кормів та сільського господарства Поділля НААН України, Тернопільський інститут агропромислового виробництва НААН України, Державне підприємство «Експериментально-дослідне господарство «Еліта» Волинського інституту агропромислового виробництва НААН України, Подільська обласна сільськогосподарська дослідна станція²⁵.

Буркун білий і буркун жовтий у рекультивції техногенних ґрунтів

Буркун білий і жовтий можна вирощувати майже повсюдно на різних ґрунтах і ґрунтових відмінностях²⁷. Це незамінна бобова трав'яниста рослина для освоєння засолених земель, закріплення відкосів ярів різної крутизни, у тому числі і залізорудних кар'єрних виробок. Маючи глибокопроникну міцну кореневу систему, буркун поглинає поживні речовини з шару ґрунту 2,5-3 м, розчиняючи їх своїми кореневими виділеннями. При цьому верхній шар ґрунту збагачується на кальцій, який позитивно впливає на реакцію

ґрунтового розчину. Разом з тим, у разі підвищеної кислотності ґрунто-підґрунтя під буркун слід вносити вапняні добрива.

Особлива цінність буркуну білого і жовтого полягає в тому, що вони містять рослинний білок, здатні накопичувати біологічний азот у ґрунті, сприяють утворенню гумусу та поліпшенню структури ґрунту. Для південного регіону країни, що вважається зоною ризикованого землеробства, надзвичайно важливим є використання в сівозміні посухостійких сільськогосподарських культур, здатних формувати в екстремальних умовах стабільні врожаї насіння високої якості. Даним вимогам повністю відповідає буркун білий однорічний – технологічна, посухо- і жаростійка культура, відносно невибаглива до ґрунтів²⁸.

У безпокровних посівах однорічний буркун білий накопичує 60-70 ц/га, дворічний – 90-120 ц/га сухої маси рослинних решток, тобто більше, ніж люцерна другого року користування. З рослинними рештками у ґрунт потрапляє відповідно 160-180 і 260-300 кг/га азоту, 45-50 і 60-80 фосфору, 120-140 і 180-220 кг/га калію. За кількістю рослинних решток буркун майже не має собі подібних серед інших сільськогосподарських культур. Це однаково стосується польових і рекультивованих земель. Проте, на відміну від польових земель з їхньою високою родючістю, на кар'єрних виробках високий урожай буркуну можливий лише за удобрення підготовленого до сівби ґрунто-підґрунтя. Це можуть бути ґрунто-підґрунтя, підготовлені глибоким обробітком, вапнуванням та іншими прийомами, або нанесений шар ґрунту, раніше знятий гумусний шар, лесоподібні породи кар'єрів²².

Біологічною особливістю буркуну є здатність формувати високі врожаї зеленої маси на піщаних, малородючих, засолених ґрунтах. Автори²⁹ відзначають здатність *Melilotus* розвивати кореневі бульбочки та фіксувати азот у симбіозі з ризосферними бактеріями, навіть у солоних та посушливих середовищах, що робить цю рослину корисною для відновлення ґрунту та для зменшення потреб у великих кількостях неорганічних азотних добрив³⁰. Повідомляється, що в едафічних умовах Західного Донбасу при вирощуванні на засолених ґрунтах буркуну білого відбувається зниження сумарної концентрації солей на 18,4 %. Вирощування буркуну жовтого дозволяє зменшити вміст солей в ґрунті лише на 5 %. Для буркуну білого характерним є максимальне поглинання солей, але при цьому відбувається зниження вмісту органіки в ґрунті, що зумовлене життєвим циклом однорічних рослин, які при вегетації не сприяють накопиченню органічної речовини, а навпаки, споживають її під час розвитку, що призводить до зменшення органіч-

ної складової у ґрунті на 10 %. Буркун жовтий, навпаки, при незначному розсолуючому ефекті, сприяє підвищенню вмісту гумусу у ґрунтах, приріст органіки в середньому складає 72 %. Обидві культури знижують показник рН ґрунту. Таким чином, для розсолуючого ефекту оптимальною є схема: 50 % буркуну білого та 50 % буркуну жовтого, за якою очікується, що на третій рік рекультивациі приріст органічної речовини збільшиться на 93 %³¹.

Трав'янисті бобові – *M. albus*, *M. officinalis* не лише здатні рости на деградованих ґрунтах, але й можуть значно покращувати стан та структуру останніх. Завдяки утворенню симбіотичних взаємовідносин із бульбочковими бактеріями *Rhizobium meliloti*³², *Sinorhizobium meliloti*³³ відбувається накопичення біологічного азоту, що дозволяє виду *Melilotus* рости на збіднених азотом ґрунтах³⁴. В умовах цілеспрямованої біологічної рекультивациі і при спонтанному заростанні техногенних земель буркун на 1 га посівів накопичує до 300-500 кг азоту та за 7-8 років створює умови для заселення інших, менш стійких рослин³⁵, викликаючи зміни на рівні екосистеми³³.

При дослідженні природного заростання залізородних суглинистих і глинистих, залізо-кварцитосланцевих та вапнякових відвалів, яке відбувається вкрай повільно, було встановлено поступову, впродовж 5-10 років заміну бур'янів багаторічними кореневищними, щільно-та нещільнокущовими злаками, дво- та багаторічними травами, серед яких буркун білий та буркун жовтий³⁶. А тому рослини *Melilotus* можуть бути використані в розробці рекультивуваної травосуміші для таких відвалів.

Для рекультивациі залізородних відвалів, складених з малопридатних порід та ґрунтів (крейди, мергелю з глинистими мінералами) розроблено травосуміш, до складу якої входить буркун жовтий. Розроблене угруповання: *Stipa asperella* + *Stipa ucrainica* + *Stipa pennata* + *Festuca valesiaca* + *Bothriochloa ischaemum* + *Diplotaxis tenuifolia* + *Melilotus officinalis* + *Hyssopus officinalis* починає виконувати протиерозійні, санітарно-захисні функції з 7-10 років, а 2-3 ярусний рослинний покрив із проективним покриттям 60-70 %, подібний до зонального, формується через 12-15 років³⁶.

Повідомляється, що використання буркуну жовтого в суміші зі злаковими – стоколосом безостим (*Bromus inermis*) дає позитивний ефект при фіторекультивациі відвальних гірських порід, винесених на денну поверхню в процесі видобутку корисних копалин. Підвищення частки складних бобово-тонконогових агрофітоценозів на рекультивованих породах сприяє фітомеліоративному ефекту та створенню високопродуктивних фітомеліоруючих агроценозів, з середньорічною уро-

жайністю сіна 32,2-38,5 ц/га, що відрізняються довговічністю використання та ресурсозберігаючим характером технології виробництва³⁷.

Буркун білий і буркун жовтий у рекультивациі ґрунтів, забруднених важкими металами, нафтою, нафтопродуктами

Важкі метали, як відомо, можуть змінювати проникність мембрани в різних видах рослин, знижувати ферментативну активність, спотворювати живлення мінералами, пошкоджувати фотосинтетичний апарат і генерувати окислювальний стрес, впливаючи, таким чином, на морфологію, зростання та процеси фотосинтезу рослин. Надлишок важких металів у клітинах викликає молекулярне пошкодження рослин, головним чином, через синтез активних форм кисню (АФК), таких як супероксидний радикал ($O_2^{\bullet-}$), гідроксильний радикал ($OH^{\bullet-}$), перекис водню (H_2O_2). Надмірний синтез АФК є однією з початкових відповідей організму на різні стресові фактори. Ці АФК можуть призводити до необоротного окислення ліпідів, білків, хлоропластичних пігментів, ДНК і РНК і, таким чином, впливати на життєздатність клітин³⁸.

Корінь є ключовим органом для стабілізації та накопичення поживних речовин рослиною і завдяки таким фенотиповим ознакам як довжина, біомаса, щільність і площа відіграє важливу роль в адаптації, живленні і здоров'ї рослини³⁹. Буркун створює розгалужену кореневу систему і здатен поглинати поживні речовини з шару ґрунту 2,5-3 м. Проведені дослідження³⁴ показують, що *M. officinalis* стійкий до ґрунту, забрудненого важкими металами, і поглинає їх під час вегетації більше, ніж інші зелені рослини.

M. officinalis ефективний для фітореMediaції ґрунтів, забруднених міддю, хромом, свинцем, молибденом, цинком, нікелем і кобальтом⁴⁰⁻⁴⁸. Вирощений у забрудненому міддю та молибденом ґрунті *M. officinalis* має більшу здатність накопичувати важкі метали в коренях, ніж у пагонах. Використання хелатів, зокрема етилендіамінтетраоцтової кислоти, підвищує ефективність фітоекстракції міді та молибдену^{40,46}.

Автори³⁴ зазначають, що концентрація важких металів в рослинному матеріалі *M. officinalis*, що зростав на ґрунті, забрудненому цинком, кадмієм, свинцем відповідає ряду $Zn > Cd > Pb$. Вміст металів в коренях значно вищий, ніж у пагонах, що свідчить про те, що буркун жовтий накопичує метали переважно в коренях, діючи як фітостабілізатор.

Дослідження⁴¹ підтверджують високу здатність коріння буркуну жовтого поглинати у ризосфері важкі метали: хром, мідь, нікель, цинк, в той час, як поглинання листям є низьким.

Автори⁴⁹ зазначають, що буркун білий накопичує у своїй біомасі цезій та інші метали, але

в той же час виробляє нектар і пилок з безпечно низьким рівнем ^{137}Cs , тому ця культура є безпечною для бджільництва в зоні забруднення ^{137}Cs . Вирощування *M. albus* протягом двох років на піщано-дерново-підзолистому ґрунті в Житомирській області призвело до збільшення легкогідролізованого N у ґрунті на 29,9% та зниження вмісту рухомого P на 18,2%, рухомих форм Cd на 38,5%, Hg на 25%, Pb на 24,5%, Cu на 18,5%, Zn на 14,9%, ^{137}Cs на 8%, що свідчить про високий потенціал буркуну білого для очищення ґрунту від важких металів.

M. officinalis може використовуватись не лише для рекультивації ґрунтів забруднених важкими металами, але й забруднених як важкими металами, так і вуглеводнями⁵⁰⁻⁵³, в тому числі поліароматичними⁵⁴⁻⁵⁷. При використанні *M. officinalis* для фіторе mediaції ґрунтів, комплексно забруднених важкими металами Zn, Pb, Cd та нафтою, спостерігається подібна здатність буркуну поглинати метали з ґрунту, що відповідає ряду: $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cd}$ та ілюструє найменшу ймовірність переходу свинцю від коренів до пагонів. При цьому досягається очищення ґрунту від Zn на 25,1%, Pb на 27,9%, Cd на 23,2%³⁴.

Стійкість буркуну до нафтового забруднення та його фіторекультиваційну роль можна пояснити здатністю рослини засвоювати азот з атмосфери і тим самим досягати балансу C:N, який порушено в нафтозабрудненому ґрунті^{58,59}. Дослідження мікробних взаємовідносин в ризосфері буркуну на нафтозабруднених піщаних ґрунтах вказує, що рослини *M. albus* мають здатність збирати певні ґрунтові бактеріальні консорціуми. В той час, як *Proteobacteria* домінують в ендосфері, *Acidobacteria* та *Gemmatimonadetes* обмежені ризосферою. Причому спільнота бактерій в ризосфері буркуну білого більш багата та різноманітна у порівнянні з компартментами ендосфери і включає *Rhizobiaceae*: *Sinorhizobium* і *Rhizobium*, *Pseudomonas* і *Pantoea*⁶⁰. Очевидно, ці бактеріальні консорціуми у ризосфері буркуну розкладають вуглеводні нафти, чим і пояснюється висока фіторекультиваційна роль цієї рослини. Культивовані з ризосфери *M. officinalis* мікробні спільноти, що розкладають пірен, показали, що багато мікробних консорціумів, що розкладають поліароматичні вуглеводні складаються із сумішей видів бактерій, які не здатні самостійно розщеплювати пірен²⁹, що ще раз підтверджує специфічність бактеріальних консорціумів у ризосфері буркуну.

Відмічається також стрімке зростання кількості мікробів-деструкторів у ризосфері рослини. Популяції мікробів-деструкторів поліароматичних вуглеводнів у досліді за участю *M. officinalis* у 100 разів більші, ніж у нерослинному контролі⁵⁵, що сприяє 60-75% деградації цих сполук.

Специфічну схильність до розвитку на коренях буркуну мають бактерії *R. meliloti*, що дозволяє виду *Melilotus* рости на ґрунтах, бідних азотом^{32,34}. У бобово-ризобіальному симбіозі бульбчкові бактерії вступають в тісні сигнальні взаємодії з макросимбіонтом, забезпечуючи їх азотним харчуванням. Обидва компоненти симбіотичної системи постачають один одного матеріалами і енергією в формах, необхідних для кожного з них, і в цілому складають єдину систему вуглецевого і азотного живлення рослин⁶¹. Бактерії отримують від бобових утворені ними в процесі фотосинтезу вуглеводи та інші сполуки і, в свою чергу, забезпечують рослину азотом, в основному у вигляді амонію, фіксованого ними з повітря. Азот, що фіксується в бульбах, надходить в тканини рослини-господаря і залишається в складі його біомаси. Хоча частина азоту, утвореного в результаті фіксації, і використовується мікросимбіонтом для зростання і підтримки його клітин, більша частина азоту експортується в клітини господаря⁶², і може, таким чином, бути використана для підтримки його ростових процесів.

Доведена ефективність штамів вільноживучих азотфіксуючих бактерій *S. meliloti* у формуванні активного симбіозу з буркуном білим *M. albus*, яка сприяє збільшенню фітомаси та висоти рослини³⁵. Бульбчкові бактерії *S. meliloti* виділені із кореневих природних біоценозів Полісся України³⁵, а тому при посіві буркуну на землях України самовільно виникатимуть симбіотичні зв'язки *Melilotus* з вільноживучими азотофіксуючими мікроорганізмами, що сприятиме оптимальному зростанню фіторе mediaнта.

Підтверджено активну роль ризосфери *M. officinalis* у процесі деградації нафтових вуглеводнів³⁴. Рослинні ферменти, що виділяються коренями, будучи джерелом росту ризосферних мікроорганізмів, опосередковано сприяють деградації нафтових вуглеводнів^{44,50,52,55,63,64}. Проведення 6-місячної фіторе mediaції ґрунтів, комплексно забруднених нафтовими вуглеводнями і важкими металами, за використання *M. officinalis*, підкріпленого удобренням "Амофоскою", показує зниження вмісту вуглеводнів у ґрунті для фракції C_{12} - C_{18} на 11,2-33,3 %, для C_6 - C_{12} на 10,9-29,1 % та C_{18} - C_{25} на 8,8-28,8 %. Вміст інших вуглеводнів із діапазону C_{25} - C_{36} зменшується в меншій мірі і складає 5,2-18,5%. Вміст поліароматичних вуглеводнів знижується на 31,5-49,9%. Найбільший ступінь відновлення досягнуто для нафталіну, антрацену та хризену 37,5-51,1%, тоді як для решти поліароматичних вуглеводнів в межах 24,0-30,6%³⁴.

Коріння *M. officinalis* продукує значну кількість кумарину, який стимулює ко-метаболізм забруднюючих речовин, у тому числі поліхлоро-

ваних біфенілів і поліароматичних вуглеводнів⁶⁵. Результати, отримані авторами^{54,55}, вказують на позитивний зв'язок між розвитком біомаси *M. officinalis* та біодеградацією поліароматичних вуглеводнів. Результати канадських дослідників підтверджують високий ремедіаційний потенціал рослин *M. officinalis*, які здатні проростати і виживати в нафтозабрудненому ґрунті з вмістом нафти 0,1 %, 0,5 %, 1 % і 5 %, а їхня біомаса не зазнає такого негативного впливу забруднення, як інші досліджувані види⁵⁰.

Запропоноване умовне значення фіторемедіаційного потенціалу, яке включає оцінку стійкості рослини до нафтового забруднення, здатності збагачувати ризосферний ґрунт мікроорганізмами та біодоступним мінеральним азотом, а також знижувати концентрацію нафтових вуглеводнів у ґрунті, дозволило ранжувати досліджувані фіторемедіанти в 11 класів. Серед них *M. officinalis* віднесено до другого рангу, *M. albus* – до десятого⁵², що свідчить про високу ремедіаційну здатність *M. officinalis* для рекультивації нафтозабруднених ґрунтів.

Незважаючи на відносну стійкість буркуну до нафтового забруднення, його високий ремедіаційний потенціал, як азотофіксуючої рослини, питання фіторекультиваційних схем вирощування *Melilotus* в умовах нафтозабрудненого ґрунту мало вивчені. Не відомо також про розроблені фітотехнології за участі *Melilotus* для повоєнного відновлення ґрунтів України. Найвні поодинокі дослідження^{66,67} впливу агентів ремедіації: сорбентів-меліорантів (тирси, сухих трав'яних решток/сіна, лушпиння соняшника), добрив (мінеральних $(\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{K}_2\text{HPO}_4$, органічних – Агробелуму) і гуматів (гуміфілду форте) на ріст рослин *M. officinalis* в умовах нафтового забруднення ґрунту (вміст нафти 5 %). З'ясовано, що за сумісного використання комплексу: лушпиння соняшника + мінеральні добрива + гуміфілд форте, – висота пагона рослин збільшується на 104,5% та зростає біомаса *M. officinalis*. Однак, це питання перебуває лише на початковому етапі наукового вивчення і потребує подальшого розширеного дослідження.

Обговорення

Підсумовуючи відомості сучасних наукових джерел щодо фіторемедіаційного потенціалу буркуну білого та буркуну жовтого (рис.1) слід зазначити наступне.

Буркун білий і буркун жовтий широко розповсюджені в Україні бобові трави, які утворюють симбіотичні взаємовідносини із бульбочковими бактеріями *R. meliloti*³², *S. meliloti*³³ і здатні рости на збіднених азотом ґрунтах³⁴.

R. meliloti та *S. meliloti* виділені із кореневих природних біоценозів України³⁵, а тому при використанні буркуну в фіторемедіаційних тех-

нологіях самовільно виникатимуть симбіотичні зв'язки фіторемедіанта з вільноживучими азотофіксуючими мікроорганізмами, що оптимізуватиме його зростання.

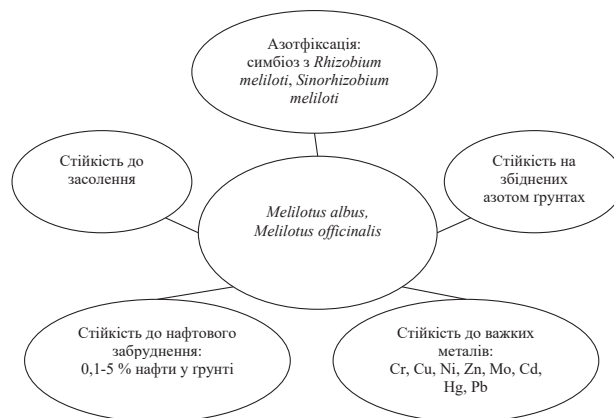


Рис. 1. Фіторемедіаційний потенціал буркуну білого (*Melilotus albus*) та буркуну жовтого (*Melilotus officinalis*)

Melilotus – незамінна бобова трав'яниста рослина для освоєння засолених земель, закріплення відкосів ярів різної крутизни. Своїм глибоко проникаючим корінням він скріплює ґрунт, чим створює кращі умови водопроникності, а надземна частина рослини запобігає його змиванню дощовою водою на схилі²⁵.

Розгалужена коренева система буркуну здатна поглинати поживні речовини з шару ґрунту 2,5-3м, що робить *Melilotus* стійким до ґрунту, забрудненого важкими металами: Cr, Cu, Ni, Zn⁴¹, Mo^{40,46}, Cd, Hg, Pb⁴⁹. Діючи як фітостабілізатор, *M. officinalis* накопичує метали переважно в коренях³⁴, тому подальше використання його надземної рослинної біомаси є безпечним.

M. albus в зоні забруднення 137Cs виробляє нектар і пилок з низьким рівнем 137Cs, а тому ця культура є безпечною для бджільництва⁴⁹.

M. officinalis стійкий до умов нафтозабрудненого ґрунту з концентрацією нафти 0,1-5 %⁵⁰ і має здатність збирати у ризосфері специфічні ґрунтові бактеріальні консорціуми^{29,60}, які, очевидно, беруть участь у розкладанні нафти, чим можна пояснити високу фіторекультиваційну роль цієї рослини – зниження вмісту вуглеводнів в ґрунті на 8,8-51,1%.

В умовах нафтового забруднення ґрунтів фіторемедіаційний потенціал *M. officinalis* в рази вищий, ніж у *M. albus*⁵², а умови здійснення рекультивації впливають на результат⁶⁶.

Висновки

Melilotus є перспективним фіторемедіантом для відновлення порушених ґрунтів, забруднених важкими металами, нафтою та її похідними. Сільськогосподарські та інші землі України, що

екологічно постраждали внаслідок воєнних дій, можуть бути відновлені фітотехнологіями за використання *Melilotus albus* і *Melilotus officinalis*.

В Україні наявні селекційні центри буркуну, а отже присутня відносно дешева насіннева база

для реалізації фіторекультивацийних технологій повоєнного відновлення постраждалих земель.

Розроблення фітотехнологій за участі *Melilotus* для повоєнного відновлення ґрунтів України є на часі.

Література

- (1) Дідух, Я. П. Екосистемний підхід до оцінки збитків, завданих воєнними діями. *Вісник Національної Академії Наук України*. **2022**, (6), 16–25. <https://doi.org/10.15407/vsn2022.06.016>
- (2) Роман Л.Ю. Аналіз екологічних загроз об'єктів ПЗФ України у воєнний період. *Екологічні науки*. **2022**, № 3(42), 84 – 88. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.3-42.13>
- (3) Flathman, P. E.; Lanza, G. R. Phytoremediation: Current Views on an Emerging Green Technology. *Journal of Soil Contamination*. **1998**, 7 (4), 415–432. <https://doi.org/10.1080/10588339891334438>.
- (4) Schnoor, J. L. *Phytoremediation. Technology Evaluation Report TE-98-01*. Groundwater Remediation Technologies Analysis Center. Pittsburgh, PA, 1997. https://www.clu-in.org/download/toolkit/phyto_e.pdf
- (5) Schröder, P.; Harvey, P. J.; Schwitzguébel, J.-P. Prospects for the phytoremediation of organic pollutants in Europe. *Environmental Science and Pollution Research*. **2002**, 9 (1), 1–3. <https://doi.org/10.1007/bf02987312>.
- (6) Banks, M. K.; Kulakow, P.; Schwab, A. P.; Chen, Z.; Rathbone, K. Degradation of Crude Oil in the Rhizosphere of *Sorghum bicolor*. *International Journal of Phytoremediation*. **2003**, 5 (3), 225–234. <https://doi.org/10.1080/713779222>.
- (7) Gerhardt, K. E.; Huang, X.-D.; Glick, B. R.; Greenberg, B. M. Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: Potential and challenges. *Plant Science*. **2008**, 176 (1), 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2008.09.014>.
- (8) Wang, J.; Zhang, Z.; Su, Y.; He, W.; He, F.; Song, H. Phytoremediation of petroleum polluted soil. *Petroleum Science*. **2008**, 5 (2), 167–171. <https://doi.org/10.1007/s12182-008-0026-0>.
- (9) Li, C.; Zhou, K.; Qin, W.; Tian, C.; Qi, M.; Yan, X.; Han, W. A review on Heavy Metals Contamination in soil: Effects, sources, and remediation techniques. *Soil and Sediment Contamination an International Journal*. **2019**, 28 (4), 380–394. <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1592108>.
- (10) Chen, Z. On selection of remediation plants for heavy metal polluted soil. *Chemical Engineering Transactions*. **2018**, 66, 649–654. <https://doi.org/10.3303/cet1866109>.
- (11) Sharma, J. K.; Kumar, N.; Singh, N. P.; Santal, A. R. Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. *Frontiers in Plant Science*. **2023**, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>.
- (12) Priya, A. K.; Muruganandam, M.; Ali, S. S.; Kornaros, M. Clean-Up of Heavy Metals from Contaminated Soil by Phytoremediation: A Multidisciplinary and Eco-Friendly Approach. *Toxics*. **2023**, 11 (5), 422. <https://doi.org/10.3390/toxics11050422>.
- (13) Sabreena, N.; Hassan, S.; Bhat, S. A.; Kumar, V.; Ganai, B. A.; Ameen, F. Phytoremediation of Heavy Metals: an indispensable contrivance in green remediation technology. *Plants*. **2022**, 11 (9), 1255. <https://doi.org/10.3390/plants11091255>.
- (14) Kulyk, M. I.; Galytska, M. A.; Samoylik, M. S.; Zhornyk, I. I. Phytoremediation aspects of energy crops use in Ukraine. *Agrology*. **2019**, 2 (1), 65–73. <https://doi.org/10.32819/2617-6106.2018.14020>.
- (15) Джура, Н.М., Романюк, О.І. Гонсьор, Я., Цвілинюк, О.М., Терек, О.І. Використання рослин для рекультивациі ґрунтів, забруднених нафтою і нафтопродуктами. *Екологія та ноосферологія*. **2006**, 17(1-2), 55-60. http://www.uenj.cv.ua/17_tom-1_2/Djura_W.pdf
- (16) Brandt, R.; Merkl, N.; Schultze-Kraft, R.; Infante, C.; Broll, G. Potential of vetiver (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash) for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils in Venezuela. *International Journal of Phytoremediation*. **2006**, 8 (4), 273–284. <https://doi.org/10.1080/15226510600992808>.
- (17) Kaimi, E.; Mukaidani, T.; Tamaki, M. Screening of twelve plant species for phytoremediation of petroleum Hydrocarbon-Contaminated soil. *Plant Production Science*. **2007**, 10 (2), 211–218. <https://doi.org/10.1626/pps.10.211>.
- (18) Adam, G.; Duncan, H. The effect of diesel fuel on common vetch (*Vicia sativa* L.) plants. *Environmental Geochemistry and Health*. **2003**, 25 (1), 123–130. <https://doi.org/10.1023/a:1021228327540>.
- (19) Merkl, N.; Schultze-Kraft, R.; Infante, C. Assessment of tropical grasses and legumes for phytoremediation of Petroleum-Contaminated soils. *Water Air & Soil Pollution*. **2005**, 165 (1–4), 195–209. <https://doi.org/10.1007/s11270-005-4979-y>.

- (20) Романюк, О. І. Шевчик, Л. З., Терек, О. І. Спосіб очищення техногенних ґрунтів, забруднених нафтою. Патент України 86572, Січ 10, 2014.
- (21) *Еколого-біологічні особливості та господарська цінність малопоширених культурних та природних рослинних ресурсів*: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів; Бурлака, В. А., Ред.; Вид-во ЖНАЕУ, Житомир, 2005. http://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/4482/1/Ekologo-biological_features_2011_102.pdf
- (22) Зінченко О. І. *Кормовиробництво*, Навчальне видання. 2-е вид.; Вища освіта: Київ, 2005. <https://buklib.net/books/34611/Кормовиробництво>
- (23) Вожегова, Р., Влащук, А., Дробіт О., Белов, В. Удосконалення агротехніки вирощування буркуну білого однорічного в умовах Південного Степу України. *Вісник аграрної науки*. **2022**, 100(2), 5-10. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202202-01>.
- (24) Новгородська, Н. В., Разанова, О.П., Лютка, Г.І. Оптимізація забезпечення безперервного нектароносного конвеєра у бджільництві *Сільське господарство та лісівництво*. **2021**, (22), 72-84. DOI 001:10.37128/2707-5826-2021-3-6.
- (25) Захлебаєв, М.В. Формування продуктивності буркуну білого в сумісних посівах в Правобережному Лісостепу. Дисертація канд. наук, ННЦ «Інститут землеробства НААН», Чабани, 2019. https://zemlerobstvo.com/wp-content/uploads/2019/04/Disertatsiya_Zahlyebayev.pdf
- (26) Буркун. *Фармацевтична енциклопедія*, 2-ге вид.; МОПІОН: Київ, 2010. <https://www.pharmacencyclopedia.com.ua/article/2005/burkun>.
- (27) Самохвалова, В. Л.; Фатєєва, А. І.; Зуза, С. Г.; Погромська, Я. А.; Зуза, В. О.; Панасенко, Є. В.; Горпинченко, П. Ю. Фіторе mediaція техногенно забруднених ґрунтів. *Агроекологічний журнал*. **2015**, (1), 92-100. http://nbuv.gov.ua/UJRN/agrog_2015_1_13.
- (28) Vozhegova, R.; Lavrinenko, Yu.; Vlaschuk, A.; Drobit, A.; Vlaschuk, O. Influence of elements of technology on formation of structural indicators of one year old clover. *Journal of science. Lyon*. **2021**, 24, 7–11. <https://www.joslyon.com/>
- (29) Nogues, I.; Passatore, L.; Bustamante, M. Á.; Pallozzi, E.; Luz, J.; Traquete, F.; Ferreira, A. E. N.; Silva, M. S.; Cordeiro, C. Cultivation of *Melilotus officinalis* as a source of bioactive compounds in association with soil recovery practices. *Frontiers in Plant Science*. **2023**, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1218594>.
- (30) Song, X.; Fang, C.; Lal, R.; Yuan, Z.; Ke, W.; Huang, F.; Wei, Y.; Li, F.; Sardans, J.; Penuelas, J. Identifying a suitable revegetation method for soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus sequestration: A 16-year in situ experiment on abandoned farmland in a semiarid area of the Loess Plateau, China. *Land Degradation and Development*. **2022**, 33 (13), 2366–2378. <https://doi.org/10.1002/ldr.4313>.
- (31) Лаврик, М.О.; Павличенко, А.В. Фіторе mediaція засоленних ґрунтів вугледобувних регіонів України. *Геотехнічна механіка*. **2013**, Вип. 111, 77-85. http://nbuv.gov.ua/UJRN/gtm_2013_111_11.
- (32) Дідур, І.М.; Шевчук, В.В. Підвищення родючості ґрунту в результаті накопичення біологічного азоту бобовими культурами. *Сільське господарство та лісівництво*. **2020**, (16), 48-60. DOI: 10.37128/2707-5826-2020-1.
- (33) Van Riper, L. C.; Larson, D. L. Role of invasive *Melilotus officinalis* in two native plant communities. *Plant Ecology*. **2008**, 200 (1), 129–139. <https://doi.org/10.1007/s11258-008-9438-6>.
- (34) Steliga, T.; Kluk, D. Assessment of the Suitability of *Melilotus officinalis* for Phytoremediation of Soil Contaminated with Petroleum Hydrocarbons (TPH and PAH), Zn, Pb and Cd Based on Toxicological Tests. *Toxics*. **2021**, 9 (7), 148. <https://doi.org/10.3390/toxics9070148>.
- (35) Пати́ка, В.П.; Овсієнко, О.Л.; Калініченко, А.В. Селекція штамів *Sinorhizobium meliloti* для ефективно́ї бактеризації *Melilotus albus* Medik. *Мікробіологічний журнал*. **2014**; 76(3), 18-23. <https://microbiolj.org.ua/ua/archiv/2014-tom-76/3-may-jun-tom-76/2014-76-3-03>.
- (36) Мазур, А.Ю.; Кучеревський, В.В.; Шоль, Г.Н.; Баранець, М.О.; Сіренко, Т.В.; Красноштан, О.В. Біотехнологія рекультиваци́ї залізорудних відвалів шляхом створення стійких трав'янистих рослинних угруповань. *Наука та інновації*. **2015**, 11(4), 41-52. <http://dx.doi.org/10.15407/scin11.04.041>.
- (37) Гаврюшенко О.О. Вивчення та обґрунтування динаміки деяких едафічних характеристик рекультивованих земель при довготривалій фітомеліорації на прикладі Нікопольського марганцеворудного басейну. *Таврійський науковий вісник*. (84), 37-41. http://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/84_2013/10.pdf.
- (38) Verma, S.; Dubey, R. S. Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. *Plant Science*. **2003**, 164 (4), 645–655. [https://doi.org/10.1016/s0168-9452\(03\)00022-0](https://doi.org/10.1016/s0168-9452(03)00022-0).
- (39) Soleimani, M.; Afyuni, M.; Hajabbasi, M. A.; Nourbakhsh, F.; Sabzalian, M. R.; Christensen, J. H. Phytoremediation of an aged petroleum contaminated soil using endophyte infected and non-infected grasses. *Chemosphere*. **2010**, 81 (9), 1084–1090. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.09.034>.

- (40) Ghazaryan, K. A.; Movsesyan, H. S.; Minkina, T. M.; Sushkova, S. N.; Rajput, V. D. The identification of phytoextraction potential of *Melilotus officinalis* and *Amaranthus retroflexus* growing on copper- and molybdenum-polluted soils. *Environmental Geochemistry and Health*. **2019**, 43 (4), 1327–1335. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00338-y>.
- (41) Petriccione, M.; Di Patre, D.; Ferrante, P.; Papa, S.; Bartoli, G.; Fioretto, A.; Scortichini, M. Effects of *Pseudomonas fluorescens* Seed Bioinoculation on Heavy Metal Accumulation for *Mirabilis jalapa* Phytoextraction in Smelter-Contaminated Soil. *Water Air & Soil Pollution*. **2013**, 224 (8). <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1645-7>.
- (42) Wolf, J. J.; Beatty, S. W.; Seastedt, T. R. Soil characteristics of Rocky Mountain National Park grasslands invaded by *Melilotus officinalis* and *M. alba*. *Journal of Biogeography*. **2004**, 31 (3), 415–424. <https://doi.org/10.1046/j.0305-0270.2003.00983.x>.
- (43) Nedjimi, B. Phytoremediation: a sustainable environmental technology for heavy metals decontamination. *SN Applied Sciences*. **2021**, 3 (3). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04301-4>.
- (44) Fernández, R.; Bertrand, A.; García, J. I.; Tamés, R. S.; González, A. Lead accumulation and synthesis of non-protein thiolic peptides in selected clones of *Melilotus alba* and *Melilotus officinalis*. *Environmental and Experimental Botany*. **2011**, 78, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.12.016>.
- (45) Kluk, D.; Steliga, T. Ocena zmian toksyczności gleby skażonej niklem i substancjami ropopochodnymi w procesach fitoremediacji. *Nafta-Gaz*. **2016**, 72 (4), 230–241. <https://doi.org/10.18668/ng.2016.04.02>.
- (46) Han, Y.; Wu, X.; Gu, J.; Zhao, J.; Huang, S.; Yuan, H.; Fu, J. Effects of organic acids on the photosynthetic and antioxidant properties and accumulations of heavy metals of *Melilotus officinalis* grown in Cu tailing. *Environmental Science and Pollution Research*. **2016**, 23 (18), 17901–17909. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6920-x>.
- (47) Morariu, F.; Măsu, S.; Lixandru, B.; Popescu, D. (2013). Restoration of ecosystems destroyed by the fly ash dump using different plant species. *Scientific Papers: Animal Science & Biotechnologies / Lucrări Stiintifice: Zootehnie și Biotehnologii*. **2013**, 46 (2), 180. <https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Aagd%3A3%3A10640723/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3A>.
- (48) Andresen, E.; Peiter, E.; Küpper, H. Trace metal metabolism in plants. *Journal of Experimental Botany*. **2017**, 69 (5), 909–954. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx465>.
- (49) Robson, D. B.; Knight, J. D.; Farrell, R. E.; Germida, J. J. Ability of Cold-Tolerant plants to grow in Hydrocarbon-Contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*. **2003**, 5 (2), 105–123. <https://doi.org/10.1080/713610174>.
- (50) Robson, D. B.; Germida, J. J.; Farrell, R. E.; Knight, J. D. Phytoremediation of hydrocarbon-contaminated soil using native plants. In *Soils and Crops Workshop*; Harvest: Saskatoon, SK, 2001; pp. 551–556. <https://harvest.usask.ca/server/api/core/bitstreams/d7663399-d2af-4f78-866e-c14d9096c45a/content>
- (51) Robson, D. B.; Knight, J. D.; Farrell, R. E.; Germida, J. J. Ability of Cold-Tolerant plants to grow in Hydrocarbon-Contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*. **2003**, 5 (2), 105–123. <https://doi.org/10.1080/713610174>.
- (52) Panchenko, L.; Muratova, A.; Dubrovskaya, E.; Golubev, S.; Turkovskaya, O. Dynamics of natural revegetation of hydrocarbon-contaminated soil and remediation potential of indigenous plant species in the steppe zone of the southern Volga Uplands. *Environmental Science and Pollution Research*. **2017**, 25 (4), 3260–3274. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0710-y>.
- (53) Godheja, J.; Shekhar, S. K.; Modi, D. R. Bacterial rhizoremediation of Petroleum hydrocarbons (PHC). In *Springer eBooks*; **2017**; pp 495–519. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6593-4_20.
- (54) Parrish, Z. D.; Banks, M. K.; Schwab, A. P. Effectiveness of phytoremediation as a secondary treatment for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in composted soil. *International Journal of Phytoremediation*. **2004**, 6 (2), 119–137. <https://doi.org/10.1080/16226510490454803>.
- (55) Parrish, Z. D.; Banks, M. K.; Schwab, A. P. Effect of root death and decay on dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere of yellow sweet clover and tall fescue. *Journal of Environmental Quality*. **2005**, 34 (1), 207–216. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0207>.
- (56) Muratova, A. Yu.; Dmitrieva, T. V.; Panchenko, L. V.; Turkovskaya, O. V. Phytoremediation of Oil-Sludge-Contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*. **2008**, 10 (6), 486–502. <https://doi.org/10.1080/15226510802114920>.
- (57) Olson, P. E.; Castro, A.; Joern, M.; DuTeau, N. M.; Pilon-Smits, E. a. H.; Reardon, K. F. Comparison of plant families in a greenhouse phytoremediation study on an aged polycyclic aromatic Hydrocarbon-Contaminated soil. *Journal of Environmental Quality*. **2007**, 36 (5), 1461–1469. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0371>.
- (58) Mitter, E. K.; De Freitas, J. R.; Germida, J. J. Bacterial root microbiome of plants growing in oil sands reclamation covers. *Frontiers in Microbiology*. **2017**, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00849>.

- (59) Романюк, О.І.; Борецька, І.Ю.; Шевчик, Л.З.; Ощиповський І.В. Розробка фітореMediaційних композицій для очистки ґрунтів, забруднених нафтою та її похідними. *Екологічні науки*. **2022**, № 4(43), 94-99. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.15>.
- (60) Balcom, I. N.; Crowley, D. E. Isolation and Characterization of Pyrene Metabolizing Microbial Consortia from the Plant Rhizoplane. *International Journal of Phytoremediation*. **2010**, 12 (6), 599–615. <https://doi.org/10.1080/15226510903390437>.
- (61) Draghi, W. O.; Del Papa, M. F.; Barsch, A.; Albicoro, F. J.; Lozano, M. J.; Pühler, A.; Niehaus, K.; Lagares, A. A metabolomic approach to characterize the acid-tolerance response in *Sinorhizobium meliloti*. *Metabolomics*. **2017**, 13 (6). <https://doi.org/10.1007/s11306-017-1210-2>.
- (62) Fedonenko, Y. P.; Konnova, O. N.; Zatonsky, G. V.; Shashkov, A. S.; Konnova, S. A.; Zdrovenko, E. L.; Ignatov, V. V.; Knirel, Y. A. Structure of the O-polysaccharide of the lipopolysaccharide of *Azospirillum irakense* KBC1. *Carbohydrate Research*. **2004**, 339 (10), 1813–1816. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2004.05.013>.
- (63) Agnello, A. C.; Bagard, M.; Van Hullebusch, E. D.; Esposito, G.; Huguenot, D. Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation, phytoremediation, bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation. *The Science of the Total Environment*. **2015**, 563–564, 693–703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.061>.
- (64) Haichar, F. E. Z.; Santaella, C.; Heulin, T.; Achouak, W. Root exudates mediated interactions belowground. *Soil Biology and Biochemistry*. **2014**, 77, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.06.017>.
- (65) Krzciuk, K.; Gałuszka, A. Prospecting for hyperaccumulators of trace elements: a review. *Critical Reviews in Biotechnology*. **2014**, 35 (4), 522–532. <https://doi.org/10.3109/07388551.2014.922525>.
- (66) Борецька, І.Ю.; Романюк, О.І.; Джура, Н.М. Використання гуматів для підвищення стійкості енергетичних культур на нафтозабруднених ґрунтах. *Acta Carpathica*. **2023**, (2). doi:10.32782/2450-8640.2023.2.10.
- (67) Долецька, А.С.; Борецька, І.Ю.; Романюк, О.І.; Шевчик-Костюк, Л.З.; Джура, Н.М. Оцінка ефективності технологій для оптимізації вирощування *Melilotus officinalis* (L.) Pall. на нафтозабрудненому ґрунті. *Екологічні науки*. **2023**, № 5(50), 15-19. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.2>