

ВІДНОВЛЕННЯ ГРУНТОВОГО ПОКРИВУ І РОСЛИННИХ УГРУПОВАНЬ ПОСТТЕХНОГЕННИХ ЛАНДШАФТІВ СІРЧАНОГО КАР'ЄРУ

Шибанова А.М., Руда М.В., Джумеля Е.А., Панчук П.Г.
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. Степана Бандери, 12, 79000, м. Львів
alla.m.shybanova@lpnu.ua, mariia.v.ruda@lpnu.ua,
elvira.a.dzhumelia@lpnu.ua, pavlo.panchuk.pi.2022@lpnu.ua

Одним з актуальних питань є дослідження особливостей відновлення девастрованих земель після видобування сірки, їх ефективного та раціонального використання. Колишня діяльність гірничо-хімічного підприємства характеризується різноманітною дією на геологічне середовище: відбуваються зміни природного стану його компонентів поверхневих і підземних вод, ґрунтів, рельєфу, гірничих порід. Ці зміни можуть призвести до значних, непередбачених негативних наслідків. Техногенні ландшафти характеризуються повільним відновленням екологічних функцій рослинності. Під час проведення рекультивативних робіт в техногенних екотопах часто доводиться стикатися з тим, що рослинність там вже певним чином сформувалася внаслідок природних сукцесійних процесів. Необхідно оцінити рівень такого самовідновлення і на основі отриманих даних визначити необхідність і напрямок фітормеліорації щодо конкретних екотопів. Мета дослідження – визначення можливості створення фітормеліоративних лісових насаджень на посттехногенних ландшафтах сірчаного кар'єру шляхом впровадження технологій мікоризації садивного матеріалу деревних і чагарникових порід з використанням арбускулярних мікоризних (АМ) грибів. Грунтовідновні процеси на девастрованих землях зумовлені взаємодією природних чинників і техногенезу. Формування рослинності на девастрованих землях Яворівського ДГХП «Сірка» обумовлено в першу чергу інтенсивністю ґрунтоутворювальних процесів. Грунтовий покрив посттехногенних територій представлений просторовими комбінаціями різних типів ембріоземів. Визначено основні комплекси мікроміцетів, що сформувалися на зональних ґрунтах та на ембріоземах Яворівського сірчаного кар'єру. Встановлено позитивний вплив обробки проростків споровим препаратом арбускулярних мікоризних грибів на збільшення приросту у висоту досліджуваних порід та на збільшення вмісту у них азоту, фосфору та калію. *Ключові слова:* постіндустріальні ландшафти, мікоризні гриби, гірничо-хімічне підприємства, відновлення екосистеми.

Restoration of the soil cover and plant communities of the post-technological landscapes of the sulphur quarry. Shybanova A., Ruda M., Dzhumelia E., Panchuk P.

One of the urgent issues is the study of the features of restoration of devastated lands after sulphur mining, their effective and rational use. The former activity of the mining and chemical enterprise is characterized by various effects on the geological environment: there are changes in the natural state of its components of surface and underground waters, soils, terrain, and mining rocks. These changes can lead to significant, unanticipated negative consequences. Man-made landscapes are characterized by slow restoration of ecological functions of vegetation. During reclamation works in man-made ecotopes, we often have to face the fact that vegetation has already formed there in a certain way due to natural succession processes. It is necessary to assess the level of such self-restoration and on the basis of the obtained data the need and direction of phytoreclamation in relation to specific ecotopes. The purpose of the research is to determine the possibility of creating phytoremedial forest plantations on the post-technological landscapes of sulphur quarries by implementing mycorrhization technologies of planting material of tree and shrub species using arbuscular mycorrhizal (AM) fungi. Soil restoration processes on devastated lands are determined by the interaction of natural factors and technogenesis. The formation of vegetation on the devastated lands of the Yavoriv SMCE «Sirka» is caused primarily by the intensity of soil-forming processes. The soil cover of post-technological territories is represented by spatial combinations of different types of embryozems. The main complexes of micromycetes that formed on zonal soils and on embryozems of the Yavoriv sulphur quarry were determined. A positive effect of treatment of seedlings with the spore preparation of arbuscular mycorrhizal fungi on increasing the growth in height of the investigated species and on increasing their content of nitrogen, phosphorus and potassium was established. *Key words:* post-industrial landscapes, mycorrhizal fungi, mining and chemical enterprises, ecosystem restoration.

Постановка проблеми. Техногенне забруднення довкілля досягло тієї межі, за якою саме існування людства поставлено під загрозу. Масштаби і спектр техногенних забруднень безперервно зростають. Однією з причин значного посилення екологічних проблем в Україні є виведення з експлуатації великої кількості родовищ самородної сірки.

Типовим прикладом є Яворівське ДГХП «Сірка», яке містить на своїй території величезну кількість промислових відходів. Колишня діяльність гірничо-хімічного підприємства характеризується

різноманітною дією на геологічне середовище: відбуваються зміни природного стану його компонентів поверхневих і підземних вод, ґрунтів, рельєфу, гірничих порід. Ці зміни можуть призвести до значних, непередбачених негативних наслідків. Техногенні ландшафти характеризуються повільним відновленням екологічних функцій рослинності. Грунтовідновні процеси на девастрованих землях зумовлені взаємодією природних чинників і техногенезу. Формування рослинності на девастрованих землях Яворівського ДГХП «Сірка» обумовлено

в першу чергу інтенсивністю ґрунтоутворювальних процесів. Перспективним є відновлення посттехногенних ландшафтів з використанням мікоризації садивного матеріалу.

Актуальність дослідження. Одним з актуальних питань є дослідження особливостей відновлення дегазованих земель після видобування сірки, їх ефективного та раціонального використання. Українськими науковцями проводились дослідження стану ґрунтового та рослинного вкриття на порушених внаслідок видобування сірчаної руди територіях [1–6]. Однак, не вирішеною частиною проблеми залишається впорядкування порушених територій сірчаних кар'єрів та покращення їх екологічного стану шляхом створення фітомеліоративних лісових насаджень.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Формування рослинного покриву на дегазованих землях Яворівського ДГХП «Сірка» зумовлене насамперед інтенсивністю ґрунтоутворюючих процесів. Ландшафти територій, порушених внаслідок видобування самородної сірки, формуються внаслідок трансформації автохтонного ґрунтового покриву: механічного (накопичування розкритих порід, улаштування хвостосховищ), фізичного (деформація мезорельєфу, зміна структури ґрунту при гідромеханізації) та хімічні (забруднення відходами і викидами в місцях підземної виплавки сірки, флотації сірковмісних порід).

Усі аспекти авторського доробку спрямовано на вирішення важливих наукових і практичних завдань у галузях екології, лісового господарства, рекультивациі і відновлення природних екосистем, а також сприяють покращенню стійкості та продуктивності рослинних популяцій в умовах зміни клімату та забруднення навколишнього середовища.

Дослідження мікоризи та її вплив на ріст і приживленість рослин на техногенно-забруднених та деградованих ґрунтах є ключовим для розуміння можливостей відновлення природної продуктивності цих ґрунтів. Це важливо для покращення екологічної ситуації в областях, які піддаються антропогенному забрудненню.

Використання спорових препаратів мікоризи для інокуляції сіянців дерев і чагарників може покращити приживленість та зростання рослин, особливо на бідних ґрунтах. Це має велике значення для лісового господарства та садівництва, оскільки дозволяє підвищити врожайність та витривалість рослин.

Використання мікоризи для ревіталізації порушених ландшафтів є важливим екологічним інструментом. Цей підхід може допомогти відновити різноманітність рослин і поліпшити якість ґрунту, сприяючи відновленню природних екосистем.

Дослідження мікоризи допомагає зрозуміти, як ця симбіотична взаємодія може зробити рослини більш стійкими до стресових умов, таких як забруднення ґрунту, висихання, чи низькі температури.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Спроби активного відновлення рослинності на ландшафтах після видобутку здійснювалися з 1940-х років [7]. Однак питання створення рослинних угруповань після видобутку ландшафтів залишається проблемним до наших днів, а звичайні методи відновлення часто є недостатньо ефективними [8]. Крім того, незбалансовані методології, які зосереджуються на рослинах, але нехтують мікробіомами, пов'язаними з рослинами, були визначені як фактор, що пояснює невдачу відновлення рослинності на посттехногенних ландшафтах [9]. АМ гриби забезпечують рослини поживними речовинами [10], наприклад, фосфором та азотом [11] і підвищують їх стійкість до біотичних і абіотичних факторів [12, 13]. Мікориза покращує ріст і життєздатність рослин, а також може захистити рослини від токсичних сполук [14, 15].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Мета дослідження – визначення можливості створення фітомеліоративних лісових насаджень на посттехногенних ландшафтах сірчаних кар'єрів шляхом впровадження технологій мікоризації садивного матеріалу деревних і чагарникових порід з використанням арбускулярних мікоризних (АМ) грибів.

Відповідно до мети сформульовано наступні завдання: дослідити процеси природного відновлення рослинного покриву на дегазованих землях Яворівського сірчаного кар'єру; встановити мікологічні характеристики дегазованих земель; дослідити особливості трансформації сірки мікроміцетами; з'ясувати вплив мікоризаційного препарату, створеного на основі ґрунтових міксоміцетів на ефективності вирощування лісових культур на дегазованих землях.

Наукова новизна. Авторами розроблено науково обґрунтовані рекомендації з ефективного використання дегазованих земель сірчаного кар'єру шляхом застосування біоценологічних властивостей міксоміцетів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Для виявлення властивостей симбіотичних грибів стабілізували едатою в умовах підвищеного вмісту в ґрунті сполук сірки. Проведено визначення особливостей локалізації та трансформації сірки в клітинах *Oidiodendron echinulatum*. Дослідний мікроміцет *Oidiodendron echinulatum* вирощували на середовищі Чапека. Склад середовища (г/л): KCl – 0,5, MgSO₄ – 0,5, KН₄PO₄ – 1,0, FeSO₄ – 0,01, (1 мл 1% розчину). Оскільки грибок виділено з територій у яких вміст сірки перевищував норму у 10 разів, було збільшено кількість FeSO₄ до 0,1 тобто 10% розчину, NaNO₃ – 2,0, сахароза – 20,0, H₂O дист.; pH – 7,0. У складі FeSO₄ введено мічений ізотоп сірки ³⁵S у середовище, де вирощувався грибок. Використовуваний метод ізотопних індикаторів базується на положеннях, що хімічні властивості різних ізотопів одного елемента практично однакові, завдяки чому їх поведінка в проце-

сах, які вивчаються, не відрізняється від поведінки інших атомів того ж елементу, а по-друге, радіоактивні ізотопи у кількостях, що застосовуються у якості мітки, не чинять біологічної дії на живі організми. Таким чином, отримано можливість спостерігати міграцію та накопичення сірки в грибній культурі. Резистентність мікроміцету *Oidiodendron echinulatum* пов'язано з наявністю меланіну, який показав діючі властивості в якості транспортера енергії для обміну. Окрім того, відмічено зростання гіф в напрямку іонізуючого випромінювання ізотопу ^{35}S . Отримані знання покладено в основу розробки способів використання гриба *Oidiodendron echinulatum* в сильватизації забруднених сіркою ембріоземів ЯСК та у технології вирощування садивного матеріалу фітомеліоративних порід, для підвищення приживлюваності та ефективності вирощування лісових культур на девастованих сірчаними виробтками земель.

Виклад основного матеріалу. Ландшафти, що формуються на територіях, підданих видобутку сірки, виникають через зміни у природному покриві ґрунту. Ці зміни включають механічні аспекти, такі як складування та використання порід, будівництво хвостосховищ; фізичні зміни, такі як деформація мезорельєфу та зміна ґрунтової структури під час гідромеханізації; і хімічні зміни, які включають забруднення відходами та викидами під час обробки сірковмісних порід підземним виплавленням та флотацією.

Швидкість формування нових ґрунтів на відвалах Яворівського сірчаного кар'єру природним чином є невеликою і залежить від розподілу рослинності, який визначається різноманітністю джерел насіння, висотою відвалів, їх розмірами, складом порід, видом рослинності та іншими факторами.

Результати морфологічного обстеження пошкоджених земель ЯСК показують, що ґрунти на досліджуваній території є біогенно-нерозвинутими. Вони формуються на рихлих породах, які складаються з третинних глин, і відносяться до класу ембріоземів. Ці ґрунти утворюються природним шляхом, через самовідновлення ґрунтів та рослинного покриву.

Посттехногенний ґрунтовий покрив на цих територіях представлений різними комбінаціями емб-

ріоземів, таких як ембріоземи ініціальні, органо-акумулятивні, гумусово-акумулятивні та дернові. Основними діагностичними ознаками, які вказують на класифікаційну приналежність, є присутність у профілях відповідних діагностичних горизонтів.

У частині, що стосується ембріозему дернового, важливо відзначити фрагментарний або фронтальний дерновий горизонт Hd. Органо-акумулятивний ембріозем характеризується наявністю фронтального органогенного горизонту HO, який включає напіврозкладені і частково нерозкладені оторфовані рештки рослин. Для гумусово-акумулятивного ембріозему характерно виражений морфологічний гумусовий горизонт H товщиною 0–3 см і фрагментарний перехідний горизонт H(h)D товщиною 3–6 см.

На техногенних територіях найпоширенішими є ембріоземи органо-акумулятивні, які формуються на відвалах порід, гідровідвалах і хвостосховищах флотації. Оскільки цей тип ґрунту еволюційно виникає після ембріоземів ініціальних, можна припустити, що процес первинного ґрунтоутворення на досліджуваній території знаходиться на етапі накопичення органічної речовини у поверхневому шарі ґрунту.

Глинисто-мергельні ембріоземи зони відкритої виробки Яворівського сірчаного кар'єру відрізняються низьким вмістом гумусу порівняно з типовими світло-сірими лісовими та слабо-дерново-підзолистими ґрунтами, відносяться до категорії дуже бідних ґрунтів.

Щодо флори на пошкоджених землях Яворівського сірчаного кар'єру, зареєстровано 155 видів вищих рослин, представлених 1 відділом, 5 класами, 35 порядками, 38 родинами та 104 родами. Покритонасінні рослини визначаються як провідний елемент з 22 порядками, 24 родинами та 108 видами. Серед родин видовим різноманіттям видається *Asteraceae* (21 рід, 30 видів). Перші шість родин об'єднують 73 види та 45 родів, що становить велику частку флори. Найбільше видів мають трав'яні рослини (132 види або 85,16%), із них трав'яні монокарпики складають 98 видів, а полікарпики – 34 види. Лісо-чагарникові та агро-рудеральні флороценокомплекси визначають флору адвентів.

Також зауважено, що апохори (92,62%) переважають серед рослин, які поширюються під впливом

Таблиця 1

Морфологічна будова ембріоземів Яворівського ДГХП «Сірка»

Тип ембріозему	Діагностичні горизонти	
	тип	характерні ознаки
Ініціальний	Відсутні	Неоднорідний субстрат
Органо-акумулятивний	Органогенний HO	Фронтальний або фрагментарний потужністю 0–1 (3) см
	Перехідний hD	Окремі темно-сірі плями
Дерновий	Дерновий Hd	Фрагментарний або фронтальний
Гумусово-акумулятивний	Гумусовий H	Фронтальний потужністю 0–3 см
	Перехідний H(h)D	Фрагментарний потужністю 3–6 см

різноманітних додаткових сил, в той час як автохорі (7,38%) розповсюджуються за допомогою специфічних пристосувань без впливу зовнішніх агентів. Встановлено, що до типових домінуючих видів у посттехногенних ландшафтах ЯСК відносяться сім мікроміцетів. Це, зокрема, види з відміченням просторової та тимчасової частоти трапляння у %: *Oidiodendron echinullatum* – 73, 74, *Cladosporium cladosporioides* – 66, 70, *Trichoderma lignorum* – 88, 61, *Trichoderma viride* – 63, 68, *Trichoderma terreus* – 65, 68, *Penicillium citrinum* – 72, 70, *Aureobasidium pullulans* – 77, 54. Вісім видів ґрунтових грибів визначено як типові часті мікроміцети. Це, відповідно в %, *Penicillium brevicompactum* – 58, 51, *Aspergillus fumigatus* – 53, 48, *Fuzarium oxysporum* – 58, 50, *Humicola grisea* – 49, 41, *Zugomicets sp.* – 46, 40, *Monilia cinerea* – 36, 38, *Rhizopus oryzae* – 35, 45 та *Aureobasidium tenuisima* – 31, 40. П'ятнадцять видів грибів – домінантні та часті, формують основу структурних особливостей девастрованих ґрунтів.

У результаті аналізу рослинних описів на ембріоземах Яворівського сірчаного кар'єру виокремлено кілька типів фітоценозів: болотно-рудеральний, болотний, лучно-болотний, лучний, чагарниково-лучно-рудеральний, чагарниковий та лісовий. Кожен з цих типів фітоценозів характеризується унікальними рисами, такими як мікрорельєф формування, механічний склад ґрунтового субстрату та вплив негативних антропогенних та екологічних факторів. Кожен фітоценоз має специфічну горизонтальну та просторову структуру розташування рослинних компонентів у просторі.

Дослідження лісових земель, що прилягають до території Яворівського сірчаного кар'єру, показує наявність двох типів лісорослинних умов – свіжого сугрудка та вологого сугрудка грудуватого підтипу. Свіжий сугрудок розташований на вирівняних та

дещо випуклих формах рельєфу, в той час як вологий сугрудок грудуватого підтипу поширений на схилах і пониженнях. У цих лісорослинних умовах відбувається формування насаджень різних типів лісу, таких як свіжа дубово-соснова судіброва, волога буково-соснова судіброва, волога буково-соснова судіброва грудуватого підтипу і свіжа грабово-соснова судіброва. Вони характеризуються насамперед умовно-одновіковими деревостанами з трьома ярусами. Деревостани високобонітетні, особливо в свіжих сугрудах грудуватого підтипу, де сосна і дуб досягають I бонітету.

Визначення значимості видів-мікроміцетів.

На основі розрахунків визначено основні комплекси мікроміцетів, що сформувалися на зональних ґрунтах (рис. 1) та на ембріоземах Яворівського сірчаного кар'єру (рис. 2).

Упродовж періоду 2019–2021 років результати кореляційного аналізу біоти мікроміцетів у кожному з екоотопів свідчать про формування примітивних грибних комплексів у ембріоземах. Ці комплекси переважно складаються з видів світлого забарвлення та відзначаються високим рівнем схожості ($r = 1,0; 0,95; 0,89$). Їх можна віднести до замкнених тричленних та лінійних плеяд. Серед структурно важливих родів у цих комплексах виділяються *Oidiodendron*, *Penicillium*, *Aspergillus* та *Trichoderma*.

Також в зональних ґрунтах виявлено стійкі грибні комплекси. Кореляційні плеяди, які відображають їх структуру на рівні $r = 1,0$, включають типи «зірка-сітка» і «квадрат», тричленні плеяди. Грибні комплекси зональних ґрунтів вирізняються переважанням структурних видів світлого забарвлення, таких як *Penicillium ochro-chlorum*, *Fuzarium oxysporum*, *Aspergillus niger*, *Trichoderma lignorum*, *Paecilomyces lilacinus*, *Penicillium citrinum*, *Trichoderma terreus*. Деякі види меланінвмісних родів грибів також

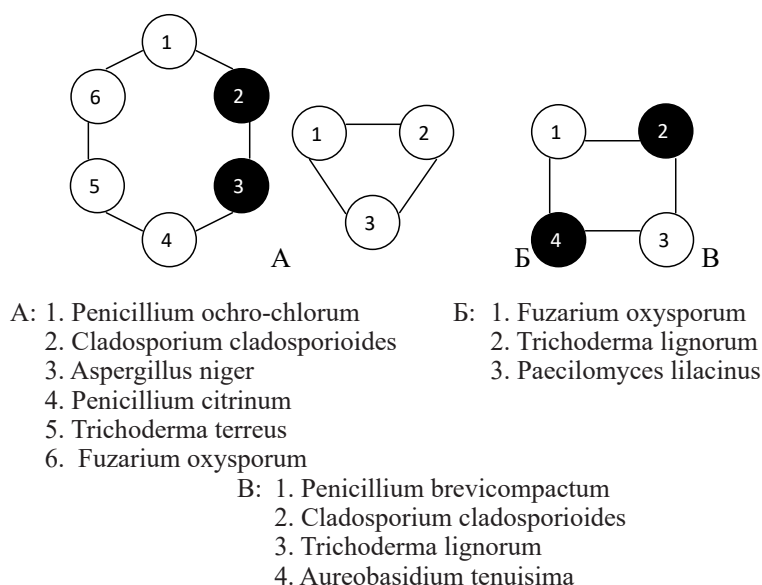


Рис. 1. Комплекси ґрунтових організмів, що сформувались на зональних типах ґрунту

Таблиця 2

Індекси екологічного різноманіття угруповань ґрунтових мікроміцетів моніторингових ділянок ґрунтів Яворівського сірчаного кар'єру

Варіанти	Сезон	N	Індекс видового різноманіття Соренсена	Індекс домінування Сімпсона	Індекс Шеннона	Індекс Післу
Ембріоземи	2011	21	9,34	0,011	1,02	0,38
	2012	24	9,47	0,014	1,03	0,34
	2013	27	11,24	0,102	2,37	0,73
Зональні ґрунти	2011	35	13,56	0,087	2,76	0,79
	2012	40	16,64	0,066	3,07	0,79
	2013	41	16,91	0,068	3,12	0,84

екологічних функцій наближеного до природи лісу є можливим заходами з інокуляції препаратами на основі мікоризи [18, 19]. Вище зазначено, що ембріоземи ЯСК характеризуються дефіцитом поживних речовин, високим вмістом сірчанних сполук, високою щільністю ґрунтів та іншими обмежувальними факторами навколишнього середовища. Все це сприяє формуванню несприятливого середовища для росту і розвитку рослин [20-22].

В умовах напівконтрольованого середовища було проведено експеримент з вирощування садивного матеріалу. Використовували сіянці дерев та чагарників, що поширені у фітомеліорації: *Quercus robur* L., *Pinus sylvestris* L., *Betula pendula* Roth., *Sorbus aucuparia* L., *Prunus divaricata* Ledeb., *Robinia pseudoacacia* L., *Hippophae rhamnoides* L., *Rosa canina* L. В експерименті інокулювали корені рослин споровим препаратом мікоризи. Контролем слугували сіянці, висаджені без інокуляції.

Результати дворічного експерименту, спрямованого на вивчення впливу арбускулярних мікоризних грибів на приживленість та ріст рослинного матеріалу в умовах Яворівського сірчаного кар'єру, свідчать про перспективи використання мікоризи для поліпшення умов для росту дерев'яних та чагарникових рослин на техногенних ґрунтах з високим вмістом сірки та інших обмежувальних факторів (табл. 3) [18-22]. Отримані дані підтверджують, що використання мікоризних грибів може слугувати

ефективним інструментом для прискорення процесу відновлення природної продуктивності та екологічних функцій техногенних територій.

Враховуючи дефіцит поживних речовин, високий вміст сірки та щільність ґрунтів в ембріоземах Яворівського сірчаного кар'єру, застосування мікоризи стає важливим кроком у створенні сприятливих умов для рослинного росту в цих екстремальних умовах. Найбільший приріст у висоту та приживленість спостерігається у випадку дуба звичайного, сливи розлогої, робінії псевдоакації та обліпихи крушинової. Ці результати свідчать про потенційну ефективність використання мікоризи для відновлення рослинності на техногенних територіях, піддаючись впливу антропогенних чинників.

Отримані результати свідчать про ефективність використання арбускулярних мікоризних грибів (АМ грибів) для покращення приживленості та росту дерев'яних та чагарникових сіянців в умовах Яворівського сірчаного кар'єру, який характеризується дефіцитом поживних речовин, високим вмістом сірки та щільністю ґрунтів.

У результаті обробки сіянців АМ грибами, спостерігається значне збільшення приживленості у порівнянні з немікоризованими сіянцями. Цей ефект зафіксовано як у 2019 році (приблизно в 3,1 рази більше), так і у 2021 році (приблизно в 3,4 рази більше). Дослідження показали, що вплив

Таблиця 3

Відношення приживлюваності фімеліоративних культур оброблених і необроблених препаратом арбускулярних мікоризних грибів, рази

Видова назва сіянців	Відношення (оброблених / необроблених)	
	2019 рік	2021 рік
Дуб звичайний	4,1	4,3
Сосна звичайна	2,7	2,4
Робінія псевдоакація	2,7	4,0
Береза повисла	3,2	3,0
Слива розлога (алича)	3,6	4,5
Горобина звичайна	2,6	2,8
Обліпиха крушинова	3,1	4,3
Шипшина собача	3,0	2,9

АМ грибів позитивно впливає на процеси приживленості та росту сіянців.

Хімічний аналіз також підтвердив позитивний вплив мікоризи на харчовий статус сіянців. Сіянці, оброблені АМ грибами, містять значно більше азоту, фосфору та калію порівняно з немікоризованими. Це свідчить про те, що мікориза допомагає рослинам

здобувати більше поживних речовин з ґрунту, що є важливим для їхнього здоров'я та росту.

Отримані результати підкреслюють значення використання мікоризи для поліпшення умов для росту рослин на техногенних ґрунтах та сприяють прискоренню процесу відновлення природних екосистем в умовах антропогенного впливу (табл. 4).

Таблиця 4

Хімічний склад оброблених і необроблених препаратом АМ грибів сіянців сосни звичайної

№	Показник	Сіянці		Достовірність досліджу
		оброблені	необроблені	
1	Сира маса, мг	1242	598	P > 0,01
2	Абсолютно-суха маса, мг	345	155	P > 0,01
3	Азот, % до абсолютно-сухої маси	1,78	1,88	P > 0,01
4	Азот в одному сіянці, мг	5,75	2,87	P > 0,01
5	Фосфор, % до абсолютно-сухої маси	0,185	0,097	P > 0,01
6	Фосфор в одному сіянці, мг	0,60	0,15	P > 0,01
7	Калій, % до абсолютно-сухої маси	0,66	0,62	P > 0,01
8	Калій в одному сіянці, мг	2,17	0,96	P > 0,01

Висновки. Встановлено, що оброблення сіянців споровим препаратом арбускулярних мікоризних грибів має позитивний вплив на приріст у висоту досліджених порід, що в середньому сягає 2,7 рази у порівнянні з контролем. Генетична обумовленість реакції конкретної породи на інокуляцію відображається у різниці приросту сіянців у висоту від 2,1 до 3,7 разів, де листяні породи виявилися більш активними у відповідь на внесення спорового препарату мікоризи, порівняно з сосною звичайною.

Мікоризовані рослини відрізнялися кращим виглядом, більшою висотою і масою, а також мали удвічі більше коротких корінців. Крім того, мікоризована сіянка містила в 2 рази більше азоту, фосфору та калію, ніж немікоризована.

У процесі ревіталізації порушених ландшафтів за допомогою мікоризації садивного матеріалу, спостерігається тенденція до відновлення та зростання фіторізноманіття на флористичному і ценотичному рівнях. Зазначено, що частка синантропних видів в цьому процесі вища, ніж в умовах залуження вільних і антропогенних територій. Очищення трав'яних фітоценозів відбувається швидше, ніж лісових і чагарникових, оскільки останні мають тривалий період ремедіації та формування типових лісових фітоценозів та їх фіторізноманіття через свою довговічність та нівелюючу властивість.

Перспективи використання результатів дослідження. Висновок авторів вказує на те, що концептуальна модель інокулювання рослин на забруднених ґрунтах включає в себе оптимізацію ґрунтового середовища та поліпшення властивостей ґрунтової системи, забезпечення біодетоксикації та біодеконтамінації шляхом розширення популяцій ґрунтових мікроорганізмів та використання рослин фітомеліорантів з одночасним впливом на біологічні та косні складові ґрунту.

Також вказується на можливість створення фітомеліоративних лісових насаджень на території сірчанних кар'єрів. Ця можливість пов'язана з використанням природної сукцесії мікомеліорантів (організмів, що покращують ґрунтове середовище) та впровадження технологій мікоризації садивного матеріалу деревних і чагарникових порід. Цей підхід має на меті активувати процеси відновлення та покращення якості ґрунту в забруднених територіях.

Подяка

Цю роботу підготовлено завдяки грантовій підтримці Національного Фонду Досліджень України, реєстраційний номер проєкту 0123U103529 (2022.01/0009) «Оцінювання та прогнозування загроз відбудові та сталому функціонуванню об'єктів критичної інфраструктури» за конкурсом «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

Література

1. Назаровець У.Р., Марискевич О.Г. Фізико-хімічні та агрохімічні властивості ґрунтів Подорожненської копальні. *Науковий вісник НЛТУ: збірник науково-технічних праць*. 2013. Вип. 23.1. С. 110–118.
2. Назаровець У.Р., Тарас У.М., Оліферчук В.П. Різноманіття мікроміцетів ґрунтів девастованих земель. *Агроекологічний журнал*. 2014. № 1. С. 98–102. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/agrog_2014_1_20.
3. Марискевич О. Г., Шпаківська І. М., Дідух О. І. Формування ґрунтів у межах техногенного ландшафту Яворівського ДГХП Сірка. *Наук. вісник Чернівецького унів. Серія Біологія*. 2008. Вип. 24. С. 78–82.
4. Панас Р. Рекультывація земель. Львів : Новий світ, 2005. 224 с.

5. Левик В. Про актуальність вивчення біотичної активності ґрунтів в сукцесійних екосистемах техногенних екоотопів. *Сучасний стан та перспективи розвитку біо- і агроценозів в умовах постійного техногенного забруднення*: Мат. міжнар. наук.-практ. конф., 19–20 жовтня 2006 Трускавець : Дрогобич, 2006. С. 56–59.
6. Копилов Є. П. Ґрунтові гриби як біотичний чинник впливу на рослини. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2012. Вип. 15–16. С. 7–28. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smik_2012_15-16_3.
7. Limstrom, G. A. A revised bibliography of strip-mine reclamation. Columbus, Ohio : The Station, 1962.
8. Tischew, S., Kirmer, A. Implementation of basic studies in the ecological restoration of surface-mined land. *Restoration Ecology*. 15. 2007. P. 321–325. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2007.00217.x>
9. Koziol, L., Bever, J. D. The missing link in grassland restoration: Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation increases plant diversity and accelerates succession. *Journal of Applied Ecology*. 54. 2017. P. 1301–1309. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12843>.
10. Spatafora, J. W., Chang, Y., Benny, G. L., Lazarus, K., Smith, M. E., Berbee, M. L., Stajich, J. E. A phylum-level phylogenetic classification of zygomycete fungi based on genome-scale data. *Mycologia*. 108. 2016. P. 1028–1046. <https://doi.org/10.3852/16-042>
11. Smith, S. E., Read, J. D. Mycorrhizal symbiosis: 3rd ed. Cambridge, UK: Academic Press, 2008.
12. Pozo, M. J., Lopez-Raez, J. A., Azcon-Aguilar, C., & Garcia-Garrido, J. M. Phytohormones as integrators of environmental signals in the regulation of mycorrhizal symbioses. *New Phytologist*. 205. 2015. P. 1431–1436. <https://doi.org/10.1111/nph.13252>
13. Sikes, B., Powell, J.R., Rillig, M. Deciphering the relative contributions of multiple functions within plant–microbe symbioses. *Ecology*. 91. 2010. P. 1591–1597. <https://doi.org/10.1890/09-1858.1>
14. H. Bothe et al. The potential role of arbuscular mycorrhizal fungi in protecting endangered plants and habitats. *Mycorrhiza*. 2010. Vol. 20. № 7. P. 445–457. DOI: 10.1007/s00572-010-0332-4.
15. J. Tyburska et al. Mycorrhizal status of forest trees grown in urban and rural environments in Poland. *Ecological Questions*. 2013. Vol. 18. P. 49–57. DOI: 10.2478/ecoq-2013-0005.
16. Hendrychová M., Kabrna, M. An analysis of 200-year-long changes in a landscape affected by large-scale surface coal mining: History, present and future. *Appl. Geog.* 2016. 74. P. 151–159.
17. Cueva V.P. Knowledge about mine legacies, international best practice standards and mine closure regulation in the USA and El Salvador. *An Assessment of Mine Legacies and How to Prevent Them* / Cham, Switzerland : Springer International Publishing. 2017. P. 5–12.
18. Nyéki A., Neményi M. Crop Yield Prediction in Precision Agriculture. *Agronomy*. 2022. 12. 2460. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102460>.
19. Koziol L., Schultz P.A., House G.L., Bauer J.T., Middleton E.L., Bever J.D. The plant microbiome and native plant restoration: The example of native mycorrhizal fungi. *BioScience*. 2018. 68. P. 996–1006. <https://doi.org/10.1093/biosci/biy125>.
20. Revillini D., Gehring C.A., Johnson N.C. The role of locally adapted mycorrhizas and Rhizobacteria in plant–soil feedback systems. *Funct. Ecol.* 2016. 30. P. 1086–1098.
21. Vahter T., Bueno C.G., Davison J., Herodes K., Hiiesalu I., Kasari Toussaint L., Öpik M. Co-introduction of native mycorrhizal fungi and plant seeds accelerates restoration of post-mining landscapes. *J Appl Ecol.* 2020. 57. P. 1741–1751. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13663>.
22. Parra A., Conesa E., Zornoza R., Faz Á., Gómez-López M.D. Decision Pattern for Changing Polluted Areas into Recreational Places. *Agronomy*. 2022. 12. 775. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040775>.