

ВПЛИВ N-МЕТИЛ-N'-НІТРО-N-НІТРОЗОГУАНІДИНУ НА АВЕРМЕКТИНСИНТЕЗУЮЧУ ЗДАТНІСТЬ *STREPTOMYCES AVERMITILIS* УКМ АС-2179 ТА ПОЯВУ АУКСОТРОФНИХ МУТАНТІВ

Н.М. СЕРГІЙЧУК,

аспірант кафедри екобіотехнології та біорізнноманіття
Національний університет біоресурсів і природокористування України,
<https://orcid.org/0000-0001-6690-0114>

Л.О. БІЛЯВСЬКА,

завідувач відділу загальної та ґрунтової мікробіології
Інститут мікробіології та вірусології імені Д.К. Заболотного НАН
України,

<https://orcid.org/0000-0002-8785-4361>

Ю.В. КОЛОМІЄЦЬ,

професор кафедри екобіотехнології та біорізнноманіття
Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: julyja12345@gmail.com,

<http://orcid.org/0000-0002-1919-6336>

Л.В. ЗІНЧЕНКО,

провідний інженер відділу загальної та ґрунтової мікробіології
Інститут мікробіології та вірусології імені Д.К. Заболотного
НАН України

<http://orsid.org/009-006-9200-3111>

Н.А. ІЛЮК,

доцент кафедри мікробіології, сучасних біотехнологій, екології та імунології
Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

<https://orcid.org/0000-0002-3296-4790>

Анотація. Важливим шляхом переходу до екологічно безпечних агротехнологій є відмова від хімічних засобів захисту рослин і перехід на біологічні. Ефективність використання хімічних засобів захисту рослин поступово знижується, що пов'язано з появою резистентних популяцій шкідників та збудників хвороб. Метою представленої роботи було дослідження впливу N-метил-N-нітро-N-нітро-

зогуанідину на виживання та виділення високоактивних варіантів *S. avermitilis* УКМ Ас-2179, авермектинсинтезуюча активність яких була б вищою за таку вихідного штаму.

У роботі використано біохімічні методи визначення авермектинсинтезуючої активності, якісну оцінку здатності культури до синтезу авермектинів проводили методом ТШХ, концентрацію авермектинів в етанольних екстрактах визначали колориметричним методом. Досліджено вплив *N*-метил-*N*-нітро-*N*-нітрозогуанідину на життєздатність та антибіотичну активність продуцента авермектинового комплексу *S. avermitilis* УКМ Ас-2179. Встановлено, що оптимальними для отримання клонів з підвищеною антибіотичною активністю є тривалість обробки 15 хв *N*-метил-*N*-нітро-*N*-нітрозогуанідину, при яких виживає 30% спор досліджуваного штаму, а біосинтетична активність зростала у 2,7 рази. Для виявлення клонів *S. avermitilis* УКМ Ас-2179 з підвищеним синтезом природних авермектинів можна використовувати метод індукованого МННГ-мутагенезу.

Ключові слова: *Streptomyces avermitilis*, авермектини, *N*-метил-*N*-нітро-*N*-нітрозогуанідин, мутант

Вступ.

На сьогодні все більше уваги приділяється вивченню екологічної ролі та біосинтетичної активності ґрунтових мікроорганізмів (Saccá et al., 2017; De Jesus Sousa et al., 2017; Dholakiya et al., 2017; Golinska et al., 2015). Стрептоміцети – група ґрунтових мікроорганізмів, які синтезують ряд біологічно-активних речовин, відіграють провідну роль у перетворенні органічних сполук і формуванні ефективної родючості ґрунту (Harir et al., 2018; Alam et al., 2022; Klementz et al., 2016; Valli et al., 2012). Створені на основі стрептоміцетів препарати є перспективною складовою інтегрованої системи захисту сільськогосподарських культур, а в деяких випадках – альтернативою хімічним засобам (Bilyavska, 2018; Alam et al., 2022; Jones, 2023; Cheng et al., 2016; Hamed et al., 2015; Iutynska et al., 2011; Pastor et al., 2013).

Останнім часом все більшого поширення набувають препарати на

основі макролідного антибіотика авермектину, що продукується ґрунтовим стрептоміцетом *Streptomyces avermitilis* (Bilyavska, 2018; El-Saber Batiha et al., 2020; Wang et al., 2023; Iutynska et al., 2017) препарат проявляє інсектицидну, акарицидну, нематоцидну та фунгіцидну дію, тому має широке використання.

Важливим завданням виробництва мікробних препаратів є підвищення біосинтетичної активності штамів-продуцентів. Для вирішення цього завдання можна застосовувати індукований мутагенез з використанням хімічних та фізичних мутагенів, таких як органічні кислоти, амінокислоти і ін. Зокрема

N-метил-*N*-нітро-*N*-нітрозогуанідину (нітрогуанідин, МННГ) – мутагенний агент, який сприяє появі мутації переважно в точці реплікації ДНК, що може призводити до появи варіантів з підвищеною біосинтетичною активністю (Jones, 2023; Petruk et al., 2004; Dashwood, 2021; Martín, 2020; Vinogradov et al., 2020).

Співробітниками відділу загальної та ґрунтової мікробіології Інституту мікробіології та вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України у 1999 році було виділено з ґрунту два штами *S. avermitilis*. В результаті селекції шляхом спонтанної мінливості та індукованого мутагенезу отримано штам *S. avermitilis* УКМ Ас-2179 із здатністю утворювати від 900 до 1600 мкг авермектину в 1 мл етанольного екстракту (Petruck et al., 2004; Iutynska et al., 2017). Авермектинвмісний комплекс, який синтезує цей штам отримав назву аверком. З часом, активність штамів продуцентів поступово втрачається, а тому залишається актуальним питання вивчення шляхів підтримання та підвищення продуктивності штаму *S. avermitilis* і створення на його основі поліфункціональних мікробних препаратів, які знаходять застосування у різних галузях медицини, сільського господарства та промисловості.

Метою роботи було дослідження впливу N-метил-N-нітро-N-нітрозогуанідину на виживання та виділення високоактивних варіантів

S. avermitilis УКМ Ас-2179, авермектинсинтезуюча активність яких була б вищою за таку вихідного штаму.

Матеріали та методи дослідження.

В роботі був використаний штам *S. avermitilis* УКМ Ас-2179 селекціонований у відділі загальної і ґрунтової мікробіології Інституту мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного з використанням N-метил-N'-нітро-N-нітрозогуанідину (МННГ) за впливу на природний штам *Streptomyces avermitilis* виді-

лений з чорноземного ґрунту Попельнянського району Житомирської області (Iutynska et al., 2017).

Культивування стрептоміцетів здійснювали на агаризованих органічному та мінеральному середовищах (поверхневим способом). Склад картопляно-глюкозного агару (КГА) повноцінний: очищена картопля 200 г/л; CaCO_3 3 г/л; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,2 г/л; агар-агар 15 г/л; глюкоза 20 г/л (рН 6,8-7,2). Стерилізацію середовища здійснювали при 0,5 атм впродовж 20 хв. Синтетичне середовище Цімбуркової (ССЦ): агар-агар 15 г/л; NaCl 2 г/л; K_2HPO_4 0,5 г/л; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0,8 г/л; CaCO_3 5 г/л; глюкоза 70 г/л; мікроелементи: FeSO_4 5 г/л; MgSO_4 10 г/л; MnSO_4 5 г/л; ZnSO_4 5 г/л (рН 7,4) (Petruck et al., 2004). Стерилізацію середовища здійснювали при 0,75 атм протягом 2 год (Chen et al., 2016). Використовували чашки Петрі чи пробірки (по 15-20 мл середовища у кожную) або скляні плоскі флакони (матраци) об'ємом 1,5 л (по 150 мл середовища). Культивування проводили за температури +28°C впродовж 1-10 діб в залежності від мети досліджу.

Матеріалом слугувала суспензія спор *S. avermitilis* УКМ Ас-2179, яку готували шляхом змивання спор з поверхні агаризованого органічного середовища водним розчином 20%-го гліцерину. В матрац, що містить 2-тижневу культуру стрептоміцету на скошеному агарі, вносили 50 мл гліцерину і за допомогою стерильної бактеріальної петлі знімали повітряний міцелій (ПМ). Одержану суспензію спор і фрагментів фільтрували через стерильний ватно-марлевий фільтр, щоб звільнити її від агрегатів та залишків середовища. Одержана таким чином суспензія зберігалась за

температури +4°C і була використана для відповідних маніпуляцій в роботі. Контроль за стерильністю спорової суспензії та визначення її титру здійснювали шляхом висіву відповідних розведень на живильне середовище (Petruk et al., 2004; Alef, 1995).

Моноспорову суспензію вносили в стерильні, хімічно чисті пробірки. Вихідний розчин МННГ (6 мг/мл) готували безпосередньо перед дослідом, розчиняючи НГ в цитратному 0,1 М буфері (рН 5,5). Склад цитратного буферу: 0,1 г цитрат натрію; 10,5 г лимонної кислоти; 4,4 г NaOH. В якості контролю використовували 1 мл цитратного буферу, до якого додавали 0,5 мл вихідної суспензії, в експерименті додавали по 0,5 мл цитратного буферу, 0,5 мл суспензії та 0,5 мл розчину МННГ. Обробку МННГ проводили протягом 15, 30, 45, 60 хв (Petruk et al., 2004; Fedorenko et al., 2007). Оброблені спори осаджували з реакційної суміші шляхом центрифугування (4000 об/хв., 30 хв). Отриманий осад спор ресуспендували в мінімальній кількості 0,6-1 мл цитратного буферу.

Кожну порцію обробленої суспензії після ряду десятикратних розведень висівали на КГА. Після вирощування впродовж 10 діб за температури +28°C проводили оцінку виживання спор культури. На 14-у добу проводили відсів моноізолятів з подальшим визначенням їхньої здатності синтезувати авермектин.

Вміст авермектинів визначали у спиртовому екстракті з міцелію УКМ Ас-2179 (Petruk et al., 2004; Bilyavska, 2018).

За вирощування культури на поверхні КГА впродовж 10 діб, екстракцію проводили, заливаючи 5 мл 96 %-го етанолу у пробірку з куль-

турою, за допомогою бактеріальної петлі знімали спори і міцелій, добре струшували і відстоювали 30 хв. Екстракт фільтрували через паперовий фільтр.

Якісну оцінку здатності культури до синтезу авермектинів проводили методом ТШХ в системі гексан-ацетон-етанол (56:24:4). Хроматографію проводили на сілікогелевих пластинках Sorbfil (виробник ТОВ "Сорб-полімер-Аналітик"). Хроматограми проявляли шляхом їх обробки 0,75%-вим розчином перманганату калію впродовж 5 хв. Контролем слугував стандартний розчин авермектинів "Аверсектин С" для хроматографії. За плямами, що утворились на хроматографічних пластинках, встановлювали наявність авермектинів в досліджуваних екстрактах (Bilyavska, 2018).

Концентрацію авермектинів в етанольних екстрактах визначали колориметричним методом, в основі якого лежить кольорова реакція Біалія – процес зміни інтенсивності поглинання світла за $\lambda = 630\text{-}640$ нм продуктом взаємодії авермектинів з орцином (Petruk et al., 2004). Розчини для визначення: розчин №1 – орцин (10 мкг на 1 пробу) розчиняли в краплі етилового спирту (готують безпосередньо перед вимірюванням); розчин №2 – 90 мл концентрованої HCl та 0,1 г $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; розчин №3 – на кожні 10 мкг орцину 2 мл розчину №2. До 2-х мл етанольного екстракту додавали 1 мл етилового спирту і 2 мл розчину №3. Суміш ретельно перемішували, нещільно закривали та витримували 15-20 хв на водяній бані за температури +80-81°C, потім охолоджували під струменем холодної води. Інтенсивність поглинання визначали на фотоелектрокалориметрі КВК-3 за $\lambda = 630\text{-}640$ нм.

Здатність до продукування авермектинів оцінювали за кількістю авермектинів (мкг) в 1 мл етанольного екстракту з одиниці біомаси міцелію стрептоміцету. Вміст авермектинів оцінювали за інтенсивністю поглинання, використовуючи калібрувальний графік, побудований за різними концентраціями препарату авермектинів фірми "Merck" (США). Ауксотрофність отриманих мутантів з використанням МННГ визначали згідно методики (Fedorenko et al., 2007).

Розрахунки і статистичну обробку даних виконували за допомогою комп'ютерних програм Statistica 6.0 та Microsoft Office Excel 10.

Результати та їх обговорення

Популяція штаму *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 після обробки його спорової суспензії мутагеном, виявилась досить гетерогенною. За дії МННГ на актиноміцети, спостерігається виражена зміна культурально-морфологічних ознак 10-добових колоній, які вирости на ГКА, і були віднесені до трьох типів:

I тип. Добре споруючі колонії зі складчастою або опуклою поверхнею, край валикоподібний з вузьким білим обідком, в центрі помітна кратероподібна впадина; колонії помітно

виступають над поверхнею середовища. Повітряний міцелій сіро-коричневого кольору з білими вкрапленнями або без них; субстратний міцелій темно-коричневий; розчинний пігмент відсутній. Така властивість може бути пов'язана з підвищеною здатністю до синтезу авермектинів.

II тип. Колонії добре опушені з валикоподібним краєм і кратероподібною впадиною посередині. Повітряний міцелій білий, субстратний міцелій коричневий, розчинний пігмент відсутній.

IV тип. Колонії плоскі або опуклі, інколи з кратероподібною впадиною; Повітряний міцелій відсутній, субстратний міцелій бежевого кольору, розчинний пігмент відсутній.

В популяції *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 кількість колоній I-го типу становила 32,5%, колоній II-го типу було 43,0% і колоній IV типу – 24,5% від загального числа одержаних колоній.

Залежність виживання спор культури стрептоміцету від тривалості дії МННГ та його концентрації представлені в таблиці 1.

Як свідчать отримані дані, навіть короткочасна обробка спор культури *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 МННГ впродовж 15 хв призводила до зниження виживання більше, ніж у 3 рази (рис. 1). Зниження цього показ-

1. Вживання спор *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 в залежності від тривалості їх обробки МННГ

Тривалість обробки спор МННГ, хв	Титр спор в суспензії, КУО	Вживання, %
Контроль (0)	$1,3 \cdot 10^7$	100,0
15	$4,2 \cdot 10^6$	30,0
30	$1,2 \cdot 10^6$	8,8
45	$4,5 \cdot 10^5$	4,2
60	$3,4 \cdot 10^4$	2,6

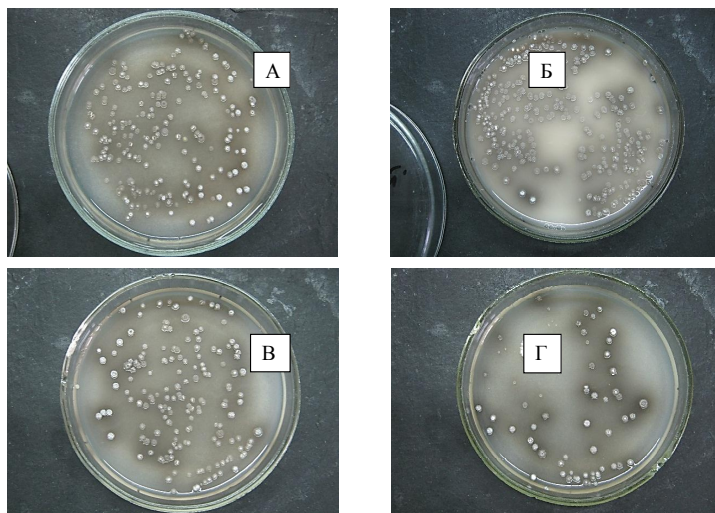


Рис. 1. Зниження виживання спор культури *S. avermitilis* після дії МННГ (за експозиції А-15 хв, Б-30 хв, В-45 хв, Г-60 хв.)

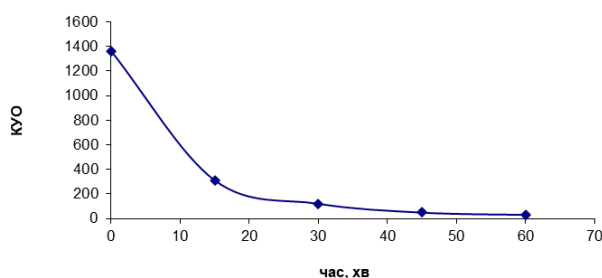


Рис. 2. Виживання спор *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 в залежності від тривалості їх обробки МННГ

ника спостерігалось і при збільшенні тривалості обробки до 60 хв. Більш тривала експозиція МННГ призвела до подальшого зниження виживання (рис. 2).

В результаті МННГ-мутагенезу було отримано мутанти, які і перевіряли на авермектин синтезуючу здатність. Серед них відмічено появу як плюс- (30%), так і мінус (70%) варіантів.

Плюс-варіанти були в основному ті, що змінювали забарвлення сере-

довища. Біосинтетична активність окремих варіантів зростала, зокрема у варіанта №54 вона була у 2,7 рази вищою (на 200%) від такої вихідного штаму УКМ Ас-2179. Біосинтетичні властивості мутантів *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 наведені в таблиці 2.

Таким чином, популяція *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 виявилась досить чутливою до мутагенних факторів. З використанням індукованого мутагенезу вдалося

2. Біосинтетичні властивості мутантів *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179

Варіанти (мутанти)	Авермектин синтезу- вальна здатність, (мкг/мл)	% до контролю
2179 (вихідний)	957 ± 10,3	100
2179(1)	1320 ± 12,1	138
2179(54)	2650 ± 17,2	277
2179(10)	1589 ± 13,3	166
2179(75)	2364 ± 16,2	247

отримати варіанти, авермектин синтезуюча здатність яких перевищувала активність вихідного штаму у 2,7 рази.

Варіант № 54 штаму *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 в цілому зберіг усі типові ознаки природного штаму УКМ Ас-2161. Основні з них наведено нижче.

Мікроморфологічні ознаки: в умовах поверхневого вирощування на агаризованих середовищах (рН 6,8-7,4; температура 28 °С) стрептоміцет утворює спорофори у вигляді невеликих спіралей (до 3-5 завитків), які при суцільному рості з віком розташовуються так тісно, що приймають вигляд клубочків. Оболонка спор гладка.

Макроморфологічні ознаки: за тих же умов росту протягом перших семи діб окремі колонії плоскі на вигляд і, зазвичай, мають невеликі розміри (3-5 мм у діаметрі, а, іноді, і менше); з віком (7-14 діб) колонії збільшуються у діаметрі до 1,0 см. У центрі колоній з'являється підвищення, на якому можна спостерігати більш-менш виразну складчастість. При суцільному рості складчастість або бугорчастість проявляються лише по краях росту.

Культуральні ознаки: на КГА стрептоміцет росте добре, з віком змінюється від бурюватого кольору до

темно-коричневого з червонуватим відтінком. ПМ також добре розвинений, у 7-добовому віці він має білувато-сіре забарвлення з коричнюватим відтінком; у 14-добовому віці білий відтінок зникає, проте до забарвлення додається слабкий жовтуватий відтінок, розчинний пігмент відсутній.

Таким чином, встановлено, що культура *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 є гетерогенною популяцією з досить великою кількістю варіантів, відмінних між собою як за типами колоній, так і за рівнем біосинтетичної активності. Така варіабельність підвищує ймовірність одержання позитивних результатів при проведенні подальших селекційних робіт з метою відбору високопродуктивних варіантів. Шляхом індукованого мутагенезу вдалося підвищити активність вихідного штаму *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 з 957 мкг/мл до 2650 мкг/мл та відібрати варіант для подальшої роботи.

Із літературних джерел відомо (Dashwood, 2021; Rütten et al., 2022), що під впливом того чи іншого мутагенного фактору можна ізолювати варіанти, активність яких перевищує таку вихідну на 20-40 % і більше відсотків. Застосовуючи ступінчасту схему відбору можна підвищити ак-

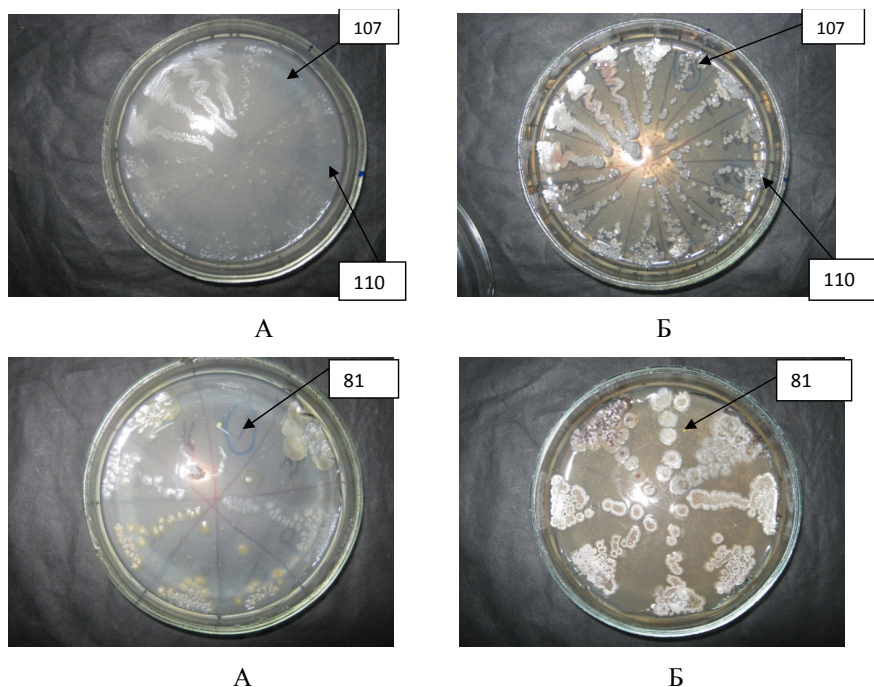


Рис. 3. Перевірка варіантів *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 на ауксотрофність (А – мінімальне середовище, Б – КГА)

тивність певного продуцента в десятки і сотні разів.

З іншої сторони, застосовуючи мутагенний агент нітрозогуанідин, можна отримати досить повний набір ауксотрофних мутантів, які можуть бути використані в генетичних схрещуваннях. Прототрофні рекомбінанти від таких схрещувань часто мають підвищену біосинтетичну активність (Jones, 2023; Dashwood, 2021).

В даній роботі колонії стрептоміцета, які були отримані після МННГ-мутагенезу, перевірялися тотальним методом на ауксотрофність.

В досліді була визначена експозиція, або час дії МННГ, тобто, 15, 30, 45 та 60 хв. Це дозволило, крім того, побудувати криву виживання спор *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179

після дії МННГ. Знаючи виживання після кожної експозиції, можна було відбирати немало кількість колоній на чашці при їхній наступній перевірці. Так, було перевірено близько 1500 колоній *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179. Серед них було відмічено 9 варіантів (№101, 103, 107, 110, 54, 81, 1, 96, 99) які не росли на мінеральному мінімальному середовищі (рис. 3).

Частота появи цих варіантів на первинному етапі відбору становила 0,006 %. Дані варіанти після реізоляції і повторної перевірки на середовищі того ж самого складу, можна було вважати ауксотрофними мутантами і були придатними до ідентифікації їх ростових потреб.

Важливим шляхом переходу до екологічно безпечних агротехнологій

є відмова від хімічних засобів захисту рослин і перехід на біологічні. Як показують результати багаторічних спостережень, ефективність використання хімічних засобів захисту рослин поступово знижується, що пов'язано з появою резистентних популяцій шкідників та збудників хвороб. Літературні дані свідчать про те, що авермектини є досить перспективними сполуками при створенні екологічно безпечних високоефективних препаратів для лікування паразитарних захворювань тварин і людини та засобів боротьби із шкідниками сільськогосподарських культур (Bilyavska, 2018; El-Saber Batiha et al., 2020; Wang et al., 2023; Iutynska et al., 2017).

Зважаючи на це, отримання вітчизняного конкурентоспроможного штаму – продуценту авермектинів та його підтримка на високому біосинтетичному рівні є актуальним та вкрай необхідним завданням.

У відділі загальної та ґрунтової мікробіології ІМВ НАН України був виділений та селекціонований штам *S. avermitilis*, зареєстрований та депонований в Українській Колекції мікроорганізмів ІМВ НАН України під номером УКМ Ас-2179 з вихідною активністю 1600 мкг/мл, але з часом вона знизилась до 957 мкг/л, що знижує його конкурентноздатність для впровадження в промислове виробництво, а тому потребує постійної підтримки і селекції (Petruck et al., 2004). Проведена нами робота по підвищенню біосинтетичної активності штаму *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 дала змогу збільшити шляхом індукованого мутагенезу активність вихідного штаму *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 в 2,7 разів.

Популяція *Streptomyces avermitilis*

УКМ Ас-2179 виявилась досить чутливою до мутагенних факторів, зокрема, після обробки його спорової суспензії МННГ спостерігається виражена зміна культурально-морфологічних ознак. Встановлено залежність виживання спор культури стрептомицету від тривалості дії МННГ та його концентрації.

Як свідчать отримані дані, навіть короточасна обробка МННГ спор культури *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 впродовж 15 хв призводила до зниження виживання більш ніж у 3 рази. В результаті МННГ-мутагенезу було отримано мутанти, які і перевіряли на авермектинсинтезуючу здатність. Серед них відмічено появу як плюс (30%), так і мінус (70%) варіантів. Плюс-варіанти були в основному ті, що змінювали забарвлення середовища, продукуючи розчинний пігмент темно-коричневого кольору. Біосинтетична активність окремих варіантів зростала, зокрема у варіанта №54 вона була майже у 3 рази вищою від такої вихідного штаму *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179.

Таким чином, встановлено, що штам *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 являє собою гетерогенну популяцію з досить великою кількістю варіантів, відмінних між собою як за типами колоній, так і за рівнем біосинтетичної активності. Така варіабельність підвищує ймовірність одержання позитивних результатів при проведенні подальшої селекційної роботи з метою відбору високопродуктивних варіантів. Шляхом мінливості вдалося підвищити активність природного штаму *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 з 957 мкг/мл до 2650 мкг/мл та відібрати варіант для подальшої роботи.

Висновки і перспективи.

Популяція штаму *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 після обробки його спорової суспензії мутагеном, виявилась досить гетерогенною. За дії МННГ на актинобактерії, спостерігається виражена зміна культурально-морфологічних ознак. Частота появи ауксотрофних мутантів на первинному етапі відбору становила 0,006%. Дані варіанти після реізоляції були придатними до ідентифікації їх ростових потреб та можуть бути використані в генетичних схрещуваннях. Прототрофні рекомбінанти від таких схрещувань часто мають підвищену біосинтетичну активність. З використанням індукованого мутагенезу вдалося підвищити активність вихідного штаму *Streptomyces avermitilis* УКМ Ас-2179 у 2,7 рази та відібрати варіант для подальшої роботи.

References

1. Saccà M.L., Barra Caracciolo A., Di Lenola M., Grenni P. Ecosystem services provided by soil microorganisms. In: Lukac, M., Grenni, P., Gamboni, M. (eds) Soil Biological Communities and Ecosystem Resilience. Sustainability in Plant and Crop Protection. Springer, Cham. 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63336-7_2
2. De Jesus Sousa JA, Olivares FL. Plant growth promotion by streptomycetes: ecophysiology, mechanisms and applications. Chem. Biol. Technol. Agric. 2017; 24:239–252. DOI:10.1186/s40538-016-0073-5
3. Dholakiya RN, Kumar R, Mishra A, Mody KH, Jha B. Antibacterial and antioxidant activities of novel Actinobacteria strain isolated from Gulf of Khambhat, Gujarat. Front Microbiol. 2017; 8:2420. doi:10.3389/fmicb.2017.02420
4. Golinska P, Wypij M, Agarkar G, Rathod D, Dahm H, Rai M. Endophytic actinobacteria of medicinal plants: diversity and bioactivity. Antonie Van Leeuwenhoek. 2015;108(2):267-89. doi: 10.1007/s10482-015-0502-7.
5. Harir M, Bendif H, Bellahcene M, Fortas and Rebecca Pogni Z. Streptomyces Secondary Metabolites [Internet]. Basic Biology and Applications of Actinobacteria. IntechOpen; 2018. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.79890>
6. Alam K, Mazumder A, Sikdar S, Zhao Y-M, Hao J, Song C, Wang Y, Sarkar R, Islam S, Zhang Y, Li A. Streptomyces: The biofactory of secondary metabolites. Front. Microbiol. 2022, 13:968053. doi: 10.3389/fmicb.2022.968053
7. Klementz D, Döring K, Lucas X, Telukunta KK, Erxleben A, Deubel D, Erber A, Santillana I, Thomas OS, Bechthold A, Günther S. StreptomeDB 2.0--an extended resource of natural products produced by streptomycetes. Nucleic Acids Res. 2016; 44(D1):D509-14. doi: 10.1093/nar/gkv1319.
8. Valli S, Suvathi SS, Aysha OS, Nirmala P, Vinoth KP, Reena A. Antimicrobial potential of Actinomycetes species isolated from marine environment. Asian Pac J Trop Biomed. 2012; 2(6):469-73. doi: 10.1016/S2221-1691(12)60078-1.
9. Bilyavska LO. Actinobacteria of the genus Streptomyces and their metabolites in the bioregulation of plants: dissertation. ... doc. biological Sciences: 03.00.07. Kyiv, 2018. 485 p.
10. Jones GH. Streptomyces RNases – Function and impact on antibiotic synthesis. Front. Microbiol. 2023; 14:1096228. doi: 10.3389/fmicb.2023.1096228
11. Cheng J, Park SB, Kim SH, Yang SH, Suh JW, Lee CH, Kim JG. Suppressing activity of staurosporine from Streptomyces sp. MJM4426 against rice bacterial blight disease. J Appl Microbiol. 2016; 120(4):975-

85. doi: 10.1111/jam.13034
12. Hamed J, Mohammadipanah F. Biotechnological application and taxonomical distribution of plant growth promoting actinobacteria. *J Ind Microbiol Biotechnol*. 2015; 42(2):157-71. doi: 10.1007/s10295-014-1537-x.
13. Iutynska GO, Tytova LV, Leonova NO, Antypchuk AF, Brovco IS, Eakin D, Valahurova HV, Kozrytska VE, Biliavska LO, Petruk TV, Ponomarenko S.P, Yamborko NA, Pindrus AA Complex preparations based on microorganisms and plant growth regulators. In: Iutynska GO, Ponomarenko SP (eds). *New plant growth regulators: basic research and technologies of application*. Kyiv: Nichlava; 2011:161-208.
14. Pastor V, Luna E, Mauch-Mani B, Ton J, Flors V. Primed plants do not forget, *Environmental and Experimental Botany*. 2013; 94:46-56. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.02.013>.
15. El-Saber Batiha G, Alqahtani A, Ilesanmi OB, Saati AA, El-Mleeh A, Hetta HF, Magdy Beshbishy A. Avermectin Derivatives, Pharmacokinetics, Therapeutic and Toxic Dosages, Mechanism of Action, and Their Biological Effects. *Pharmaceuticals (Basel)*. 2020;13(8):196. doi: 10.3390/ph13080196.
16. Wang L., Yan X., Li Y, Gao C, Liu J. Preparation and Characterization of Avermectin B2 Microcapsules and Effective Control of Root-Knot Nematodes. *ACS Omega*. 2023; 8(14): 13038-13047. DOI: 10.1021/acsomega.3c00244
17. Iutynska GO, Biliavska LO, Kozrytska VE. Development strategy for the new environmentally friendly multifunctional bioformulations based on soil streptomycetes. *Micro. J*. 2017; 79(1):22-33. DOI:10.15407/microbiolj79.01.022
18. Petruk TV, Biliavs'ka LO, Kozryts'ka Vle, Mukvykh MS. Increasing biosynthesis of avermectins of *Streptomyces avermitilis* UCM Ac 2161 under the effect N-methyl-N'-nitro-N-nitrosoguanidine. *Mikrobiol Z*. 2004; 66(6):24-30. Ukrainian. PMID: 15765867.
19. Dashwood RH. Cancer interception by interceptor molecules: mechanistic, preclinical and human translational studies with chlorophylls. *Genes and Environ*. 2021; 43:8. <https://doi.org/10.1186/s41021-021-00180-8>
20. Martín JF. Molecular mechanisms for the control by phosphate of the biosynthesis of antibiotics and other secondary metabolites. *Regulation of Secondary Metabolism in Actinomycetes*. 2020:213-237. <https://doi.org/10.1201/9781003068600-6>
21. Vinogradov AA, Suga H. Introduction to thiopeptides: biological activity, biosynthesis, and strategies for functional reprogramming. *Cell Chemical Biology*. 2020; 27(8):1032-1051. <https://doi.org/10.1016/j.chembiol.2020.07.003>.
22. Chen J, Liu M, Liu X, Miao J, Fu C, Gao H, Müller R, Zhang Q, Zhang L. Interrogation of *Streptomyces avermitilis* for efficient production of avermectins. *Synthetic and Systems Biotechnology*. 2016; 1(1):7-16. <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2016.03.002>.
23. Alef K, Nannipieri P. Soil respiration. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. New York: *Academic Press*; 1995. 214–218.
24. Fedorenko VO, Ostash BO, Gonchar MV, Rebets YuV. Large workshop on genetics, genetic engineering and analytical biotechnology of microorganisms. Lviv: Ivan Franko LNU Publishing Center, 2007. 279 p.
25. Rütten A, Kirchner T, Musiol-Kroll EM. Overview on Strategies and Assays for Antibiotic Discovery. *Pharmaceuticals*. 2022; 15(10):1302. <https://doi.org/10.3390/ph15101302>

**Serhiychuk N., Biliavska L., Kolomiets Yu., Zinchenko L., Ilyuk N. (2024)
THE INFLUENCE OF N-METHYL-N'-NITRO-N-NITROSOGUANIDINE ON AVER-
MECTIN SYNTHESIS ABILITY OF STREPTOMYCES AVERMITILIS UKM AS-2179
AND APPEARING AUXOTROPHIC MUTANTS.**

BIOLOGICAL SYSTEMS: THEORY AND INNOVATION, 15(2): 5-16.

<https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Biologiya/article/view/49736>

[http://dx.doi.org/10.31548/biologiya15\(2\).2024.001](http://dx.doi.org/10.31548/biologiya15(2).2024.001)

Abstract. An important way to transition to ecologically safe agrotechnologies is the abandonment of chemical means of plant protection and the transition to biological ones. The effectiveness of the use of chemical means of plant protection is gradually decreasing, which is connected with the emergence of resistant populations of pests and pathogens. The aim of the presented work was to study the influence of N-methyl-N-nitro-N-nitrosoguanidine on the survival and isolation of highly active variants of *S. avermitilis* UKM As-2179, the avermectin-synthesizing activity of which would be higher than that of the original strain.

Biochemical methods of determining avermectin-synthesizing activity were used in the work, the qualitative assessment of the culture's ability to synthesize avermectins was performed by the TLC method, and the concentration of avermectins in ethanol extracts was determined by the colorimetric method. The influence of N-methyl-N-nitro-N-nitrosoguanidine on the viability and antibiotic activity of the avermectin complex producer *S. avermitilis* UKM As-2179 was studied. It was found that the optimal time for obtaining clones with increased antibiotic activity is 15 minutes of treatment with N-methyl-N-nitro-N-nitrosoguanidine, during which 30% of the spores of the studied strain survive, and the biosynthetic activity increases by 2.7 times. To identify clones of *S. avermitilis* UKM As-2179 with increased synthesis of natural avermectins, the method of induced MHHF mutagenesis can be used.

Key words: *Streptomyces avermitilis*, avermectins, N-methyl-N-nitro-N-nitrosoguanidine, mutant.

ЕКОСИСТЕМНІ ПОСЛУГИ, ЯК ОБ'ЄКТ ТРАНСДИСЦИПЛІНАРНОЇ КОЛАБОРАЦІЇ

А.В. ЖУК,

кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології та біомоніторингу

ORCID - 0000-0002-0405-8037

E-mail: a.zhuk@chnu.edu.ua

*Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
м. Чернівці, Україна*

Анотація. Концепція екосистемних послуг являє собою одночасно світоглядний зміст, предмет фундаментальних досліджень, методологічну основу для реалізації прикладних проєктів, практичний підхід до управління природокористуванням, платформу для співпраці міжнародних урядових і неурядових організацій, засіб продукування нових знань. У статті представлені результати систематичного аналізу літературних праць, спрямованого на з'ясування ключових трендів досліджень в галузі екосистемних послуг, які потребують посиленої уваги та розвитку, і виокремлення перспективних напрямів трансдисциплінарної колаборації у сфері реалізації екосистемних послуг та управління їх виробництвом. Методи дослідження включали ітеративний інформаційний пошук, аналіз наукової літератури та огляд сучасних методологічних підходів. На основі опрацьованих джерел виокремлено сім комплексних напрямів досліджень екосистемних послуг та двадцять самостійних відгалужень. Екосистемні послуги охарактеризовані як граничний об'єкт. Основні результати вказують на потребу в інтеграції наукових дисциплін, залученні широкого кола стейкхолдерів та консолідації перспектив розвитку різних сфер діяльності для досягнення компромісу у використанні та збереженні екосистемних послуг. Показана роль граничних організацій у досягненні цих цілей. Виявлено недостатню інтеграцію між соціальними та екологічними дисциплінами в українській науці та названі вірогідні причини такої ситуації. Висновки підкреслюють важливість трансдисциплінарного підходу до дослідження екосистемних послуг. Перспективи подальших досліджень включають розширення співпраці між науковцями та практиками, а також удосконалення методологічних підходів для комплексного вивчення екосистемних послуг.

Ключові слова: екосистемні послуги, граничні об'єкти, трансдисциплінарні дослідження, наукова методологія, інтеграція знань.

Вступ.

Концепція екосистемних послуг визнана міжнародною спільнотою, як важливий інструмент для прийняття науково обґрунтованих рішень щодо навколишнього середовища та стійкого розвитку. Її постулати дедалі більше враховуються в політичних програмах на різних рівнях управління та просуваються міжнародними організаціями, такими як ООН, Світовий банк, міжурядова платформа IPBES, міжнародні організації WWF, CGIAR, тощо. Вбачається тісний зв'язок між Цілями сталого розвитку і концепцією екосистемних послуг через спільний фокус на ефективно-му використанні природних ресурсів для забезпечення добробуту людей і збереження природного середовища для майбутніх поколінь.

Зважаючи на безперечну актуальність галузі, зростає кількість наукових публікацій, доступних інформаційних банків та баз даних, а також інструментів, придатних для всебічного вивчення екосистемних послуг. За період з 2000 по 2020 роки лише в наукових журналах, що включені до наукометричної бази Web of Science Core Collection, з напряму опубліковано 4949 статей (Gangahagedara et al., 2021). Аналіз головних багаторічних трендів дослідження екосистемних послуг (Seppelt et al., 2011; Lautenbach et al., 2019; Wang et al., 2021) яскраво ілюструє полідисциплінарну природу концепції, що виникла у пошуках компромісу між дедалі зростаючими споживчими потребами суспільства і обмеженими можливостями екосистем у задоволенні цих потреб. Дослідники розглядають її як місток між: 1) природничими та соціальними дисциплінами

(Kumar, 2012); 2) станом довкілля і добробутом населення (Langemeyer et al., 2016); 3) науковцями, управлінням, підприємцями та місцевими громадами (García-Nieto et al., 2019); 4) регіонами, економічними кластерами, національними ринками (Allan et al., 2022) тощо.

Проблематика концепції екосистемних послуг та зростання інформаційних потоків в галузі породжують запит на трансдисциплінарність і партисипативність досліджень. Мета статті полягає у визначенні ключових напрямів досліджень в галузі екосистемних послуг, які потребують посиленої уваги та розвитку, і виокремленні перспективних спрямувань трансдисциплінарної колаборації у сфері реалізації екосистемних послуг та управління їх виробництвом.

Матеріали та методи дослідження.

Дослідження проведено із застосуванням пошукового якісного підходу в три етапи. На першому використано сервіс Mendeley для пошуку англomовної наукової літератури за запитами «ecosystem services» та сервіс Google Scholar – для аналізу вітчизняних літературних джерел за пошуковими запитами «екосистемні послуги», «екосистемні сервіси», «послуги екосистем». Другий етап полягав у ітеративному інформаційному пошуку з використанням бібліометричного сервісу Citation Gecko (<https://citationgecko.azurewebsites.net/>). Як пошукові ядра (англ. seed papers) використано низку найбільш цитованих праць українських та закордонних науковців, виділених під час попереднього етапу. З отриманого переліку пов'язаних докумен-

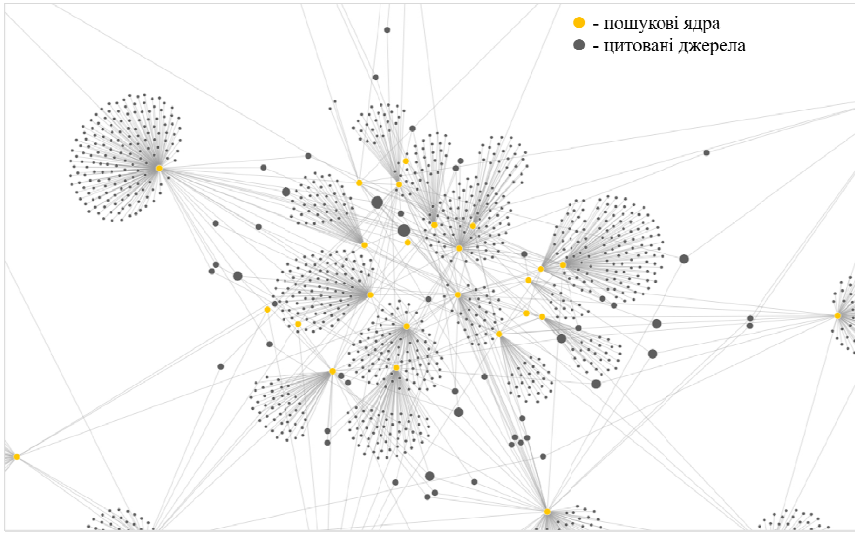


Рис. 1. Фрагмент мережі наукових праць, згенерованої за запитами в довідковому менеджері Citation Gecko

тів приєднано додаткові пошукові ядра. Джерела, які не відповідали умовам запиту, вилучено. Для визначення вторинних пошукових ядер проаналізовано переліки документів, які цитуються (англ. papers cited-by seed papers) та які цитують статті-ядра (англ. papers citing seed papers). Сформована у такий спосіб мережа релевантних запиту наукових праць (рис. 1) послугувала матеріалом третього етапу дослідження, виконаного методами систематизації та аналізу змісту літературних джерел, а також узагальнення та конкретизації.

Результати та їх обговорення

Аналіз змісту 277 україномовних та англійськомовних літературних джерел, доступних у наукометричних базах даних, дозволив виокремити провідні напрями дослідження екосистемних послуг (ЕП) (табл. 1), які паралельно розвиваються протягом двох остан-

ніх десятиліть: 1) уточнюється термінологія та розвивається теоретичне підґрунтя концепції; 2) вдосконалюються наявні методи дослідження екосистемних послуг і пропонуються нові підходи; 3) розширюється описова база екосистемних послуг на основі ситуаційного аналізу окремих екосистем та їхніх складових у конкретних умовах; 4) продовжує розвиватися напрям, спрямований на монетарну оцінку вартості екосистемних послуг у конкретних умовах та в глобальному вимірі; 5) соціоекологічні дослідження набувають більшої ваги, розширюється інструментарій їх здійснення; 6) здійснюється активний пошук шляхів і засобів імплементації положень концепції в державні та міжнародні програми задля прийняття ефективних управлінських рішень; 7) досліджуються різноманітні екологічні аспекти екосистемних послуг.

Сім комплексних напрямів досліджень екосистемних послуг у світо-

1. Головні напрями дослідження ЕП протягом 2000-х рр. (розроблено авторкою)

Напрямок дослідження	Зміст дослідження	Праці за напрямом
<i>Формування теоретичних засад концепції ЕП</i>	Концептуалізація, категоризація та класифікація	de Groot et al., 2002; Millennium Ecosystem Assessment (Program), 2005; Wallace, 2007; Costanza, 2008; Fisher & Kerry Turner, 2008; Kumar, 2012; Загвойська, 2013; Haines-Young & Potschin, 2013; Landers & Nahlik, 2013; van der Meulen et al., 2016 та інші
	Обґрунтування каскадної моделі формування ЕП і прийняття управлінських рішень	Haines-Young & Potschin, 2010; Dick & Turkelboom, 2013; Загвойська, 2014; Langemeyer et al., 2016; Costanza et al., 2017; Potschin-Young et al., 2018 та інші
	Аналіз ступеня дослідженості окремих категорій ЕП і виділення недостатньо висвітлених проблем	Seppelt et al., 2011; Haase et al., 2014; Howe et al., 2014; Lautenbach et al., 2019; Obiang Ndong et al., 2020 та інші
<i>Розробка методологічної бази дослідження ЕП</i>	Складання матриці ЕП та їх картування	de Chazal et al., 2008; Burkhard et al., 2009; Koschke et al., 2012; Burkhard et al., 2014; Kopperoinen et al., 2014; Malinga et al., 2015; Burkhard & Maes, 2017; Campagne & Roche, 2018; Campagne et al., 2020 та інші
	Обґрунтування індикаторів ЕП та розробка методів їх застосування у подальших дослідженнях	Kandziora et al., 2013; Brown et al., 2014; Hattam et al., 2015; Соловій, 2016; Mononen et al., 2016; Фурдичко та ін., 2019; Krellenberg et al., 2021 та інші
	Моделювання ЕП	Nelson et al., 2009; Crossman et al., 2013; Fu & Forsius, 2015; Olosutean, 2015; Duarte et al., 2016; Hamann et al., 2021 та інші
	Розробка методів монетарної оцінки ЕП	Bockstael et al., 2000; Barbier, 2007; Сотник & Могиленец, 2011a; Bateman et al., 2011; Сотник & Горобченко, 2012; Загвойська, 2014; Villa et al., 2014; Островський, 2018; Schild et al., 2018; Соловій & Кулешник, 2021 та інші
	Обґрунтування еколого-орієнтованих методів дослідження і оцінки ЕП	Jørgensen, 2010; Häyhä & Franzese, 2014; Remme et al., 2014; Дідух, 2018 та інші
<i>Ситуаційний аналіз</i>	Дослідження реалізації ЕП на прикладі конкретної екосистеми	Понад 400 закордонних статей. Вітчизняні дослідження за напрямом: Мішенін та ін., 2013; Дегтярь, 2014; Петрович, 2014; Загвойська та ін., 2015; Соловій, 2016; Васенко & Міланіч, 2018; Кучма & Томченко, 2019; Фурдичко та ін., 2019; Шищенко та ін., 2019; Андреева, 2021; Васютинська, 2021 та інші

Напрямок дослідження	Зміст дослідження	Праці за напрямом
<i>Еколого-орієнтовані дослідження ЕП</i>	Спостереження за реалізацією ЕП у динаміці	Rau et al., 2018; del Río-Mena et al., 2020; Xia et al., 2020; Munajati et al., 2021; Snäll et al., 2021 та інші
	Дослідження причин та наслідків деградації/втрат ЕП	Wen et al., 2013; Albrecht et al., 2014; Morino, 2014; Гавриленко & Циганок, 2018; Веклич, 2018; Гавриленко, 2019; Eguiguren et al., 2019; Malherbe et al., 2019; Aktürk & Güneröglu, 2021 та інші
	Аналіз взаємовпливу ЕП та пошуки шляхів їх гармонізації	Howe et al., 2014; Mouchet et al., 2014; Turkelboom et al., 2015; H. Lee & Lautenbach, 2016; Cord et al., 2017; Plieninger et al., 2019; Wu & Li, 2019 та інші
	Дослідження ЕП в контексті збереження біорізноманіття та заповідання	Chan et al., 2006; Egoh et al., 2007; Ingram et al., 2012; Liqueste et al., 2016; Гавриленко & Циганок, 2018; Evers et al., 2018; Watson et al., 2019, 2020 та інші
<i>Еколого-економічні дослідження</i>	Аналіз перспектив створення ринків ЕП	Соловій & Монастирська, 2005; Дучинська & Осаул, 2009; Bendor & Doyle, 2010; Соловій & Кулешник, 2011; Дегтярь, 2012; Bonn et al., 2014; Коморна, 2016, 2017; Fooks et al., 2016; Худолей & Сафонов, 2018 та інші
	Розробка економічних механізмів плати за споживання ЕП	Wunder S., 2005; Pagiola & Platais, 2007; Engel et al., 2008; Farley & Costanza, 2010; Остафійчук & Пилипів, 2017; Шапула та ін., 2019; Ільїна & Шпильова, 2020; Анісімова, 2021 та інші
<i>Еколого-соціальні дослідження</i>	Картування стейкхолдерів	Schirpke et al., 2014; Загвойська та ін., 2015; Raum, 2018; Reilly et al., 2018; García-Nieto et al., 2019
	Дослідження думки стейкхолдерів про ЕП	Бас & Загвойська, 2009; Hutchison et al., 2013; Загвойська та ін., 2015; Silva et al., 2016; de Meo et al., 2018; Almeida et al., 2021; Cabral et al., 2021; Fedoriak et al., 2021 та інші
	Аналіз готовності населення платити за ЕП	Загвойська & Копач, 2008; Соловій та ін., 2009; Spash et al., 2009; García-Llorente et al., 2012; Bernués et al., 2014; Соловій, 2016; Jo et al., 2021; Toledo-Gallegos et al., 2021 та інші
	Дослідження залежності місцевих громад від ЕП	Andersson et al., 2015; Жила та ін., 2016; Мельникович, 2018; Robinson et al., 2019; Degefu et al., 2021 та інші
<i>Шляхи і засоби імплементації концепції ЕП в управління</i>	Широке коло питань	Понад 600 закордонних статей. Вітчизняні дослідження за напрямом: Дегтярь, 2014; Горобченко & Горобченко, 2016; Максименко, 2016; Мішенін & Дегтярь, 2016; Гавриленко, 2018 та інші

вому масштабі представлені чисельними відгалуженнями. В Україні спостерігаємо відчутний дисбаланс з переважанням еколого-економічного напрямку, причому здебільшого авторами таких праць є науковці виключно економічного профілю, тоді як закордонні економісти проводять дослідження щонайменше в тандемі з екологами. Як наслідок, останні українські дослідження щодо екосистемних послуг характеризуються зміщенням акценту в бік їхньої монетарної оцінки та розробки механізмів плати за окремі послуги. Водночас соціоекологічна складова аналізується фрагментарно і, часто – відірвано від аналізу екосистемних процесів, економічних розрахунків та пошуку стратегії прийняття ефективних управлінських рішень. Причину такої ситуації у вітчизняній науці вбачаємо в слабких міждисциплінарних зв'язках та недостатньому досвіді сумісного виконання масштабних проєктів фахівцями з різних дисциплін.

Ми поділяємо думку закордонних авторів (Steger et al., 2018; Schutter & Hicks, 2021), котрі характеризують екосистемні послуги як граничні об'єкти (англ. boundary objects). За визначенням під граничним об'єктом розуміють центральний аналітичний концепт, який використовується стейкхолдерами з різними інтересами для міждисциплінарної співпраці та відповідає низці критеріїв. Перш за все, це поєднання достатньої інтерпретаційної пластичності, щоб адаптуватися до локальних потреб і обмежень кількох зацікавлених сторін, які його спільно використовують, із доволі жорсткою ідентичністю. Конструктивна співпраця стейкхолдерів можлива лише за умови спроможності упорядковувати, класифікувати,

структурувати і співставляти дані. Незважаючи на прийнятну множинність трактування сутності конкретного граничного об'єкта залежно від контексту, досвіду зацікавлених сторін, соціокультурного середовища та інших вагомих чинників, він повинен залишатися впізнаваним, незалежним від зовнішніх обставин. Зауважимо, що міждисциплінарні дослідження в галузі одночасно постають як кінцева мета, методологічна основа, практичний підхід і засіб продукування нових знань.

Концепт екосистемних послуг цілком відповідає зазначеним критеріям, адже є предметом спілкування та координації між різними соціальними групами і дисциплінами, зберігаючи водночас своє значення в кожній з цих груп. Так, біоекологи розглядають екосистемні послуги в площині біологічних і екологічних процесів, наприклад, запилення рослин, очищення води, регулювання клімату тощо. Економісти оцінюють екосистемні послуги у розрізі вартості природних ресурсів або монетарної вигоди від природних процесів. Громадські організації та активісти використовують поняття екосистемних послуг для популяризації неформальної екологічної освіти та залучення громадськості до охорони навколишнього середовища. Управлінці послуговуються знаннями про екосистемні послуги для розробки стратегій сприяння сталому розвитку громад та збереженню довкілля. Незважаючи на різні підходи та методи оцінки, концепт екосистемних послуг залишається зрозумілим та корисним для всіх зазначених груп стейкхолдерів. Це дозволяє знайти спільну мову для обговорення важливості збереження природних ресурсів. Більше

того, знання про екосистемні послуги створюють спільний простір для співпраці різних зацікавлених сторін. Наприклад, проекти з відновлення екосистем можуть залучати не лише науковців, але й місцевих жителів, землевласників, представників бізнес-сфери, урядовців, об'єднаних спільною метою збереження та поліпшення умов довкілля.

Робота з граничними об'єктами нерідко ускладнюється через відсутність універсального понятійного апарату, який задовольняв би потреби всіх задіяних сторін. Нині існує безліч визначень самого поняття «екологічні послуги», а пов'язаний із ними лексикон розширюється швидкими темпами. На нашу думку, це одна з важливих перешкод міжгалузевої колаборації українських науковців у предметній сфері дослідження екосистемних послуг. У вітчизняній науці сформований понятійно-категоріальний апарат і струнка методологія розглядаються як базовий пласт ієрархічної системи академічного пізнання, без якого подальший розвиток наукової галузі практично неможливий (Kostytskiy, 2014). Отож, цілком закономірним видається те, що значну кількість українських праць присвячено саме трактуванню ключових термінів, з'ясуванню парадигмальних засад концепції ЕП, класифікації, систематизації та каталогізації конкретних категорій послуг (Zahvoyska, 2014; Nestoriak, 2015; Arkhypova & Prykhodko, 2019; Navadzyn & Melnychuk, 2020 та інші).

Закордонні ж науковці (Steger et al., 2018) стверджують, що саме різноманітність визначень, класифікаційних систем, підходів до дослідження та визначають можливість залучення великої кількості зацікав-

лених осіб до плідної співпраці, що неможливо у випадку занадто структурованої в межах однієї дисципліни концепції. Як доказ можна навести широко знані приклади вдалого трансдисциплінарного співробітництва навколо концепції екосистемних послуг – міжнародні платформи IPBES (The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services) і LTSER (Long-Term Socio-Ecological Research). Діючи гнучко поза межами конкретної дисципліни, концепція екосистемних послуг дедалі більше структурується в межах окремих дисциплін. Отже, трансдисциплінарні дослідження екосистемних послуг варто розглядати як проблемно-орієнтовані, де насамперед, поставлена наукова, або практична мета визначатиме вибір конкретних підходів, методів і засобів її досягнення.

В академічному вимірі концепція екосистемних послуг виконує роль консолідуючого ядра для щонайменше 77 самостійних дисциплін. При цьому відносний вклад екології у її розвиток за 35 років знизився від 37 до 20 %. Натомість зросла варіативність і посилилися міждисциплінарні зв'язки в тандемі природничого та соціального спрямувань (Schutter & Hicks, 2021). Варто зауважити, що саме підгалузі екології виконують роль сполучного каналу між малодотичними за інших обставин науковими напрямками.

Девід Гастон (Guston, 2001) пропонує за аналогією до граничних об'єктів розглядати граничні організації (англ. boundary organizations) – специфічні кооперативні структури, які поєднують науковців, практиків і управлінців із метою прийняття компромісних рішень. Автор наголошує,

що граничні організації повинні відповідати трьом критеріям: 1) надавати можливості, а іноді й стимули для створення та використання граничних об'єктів; 2) залучати учасників із різними поглядами на граничний об'єкт та різними цілями, а також професіоналів, які виконуватимуть роль посередника; 3) формуватися на межі двох порівняно різних соціальних середовищ науки й управління, при цьому розділяти лінії відповідальності та механізми звітності для кожного з них.

Розвиваючи окреслений напрям, колектив швейцарських науковців (Honeck et al., 2021) доповнив цей перелік ще чотирма критеріями: 4) характеризуватися відносно сталим за кількістю та представленістю різних сторін складом, що сприятиме формуванню тісніших взаємозв'язків між учасниками з плином часу; 5) продукувати нові знання для прийняття дієвих управлінських рішень; 6) пропонувати багатоаспектні творчі ідеї (наприклад розширені природоохоронні знання, розширені можливості для партнерів і цільових аудиторій (мережі, навчання, ресурси), зміни поведінки партнерів і цільових аудиторій, включаючи структурні зміни в політиці, законодавстві та розподілі ресурсів, докази бажаного впливу на соціальні або системні зміни з часом і в запланованих масштабах тощо); 7) становити інтерес для зовнішніх партнерів. Отже, граничну організацію можна ідентифікувати як платформу для спільного продукування знань і формування новітнього суспільного строю. Мета створення нових інституцій із дослідження екосистемних полягає в об'єднанні фахівців у різних галузях науки з управліннями та практиками для співпраці

в розробці творчих ідей і рішень на місцях, поза рамками знань однієї дисципліни чи окремого вченого. Подібний формат співпраці дозволяє подолати бар'єри між різними соціальними середовищами, збалансувати протилежні інтереси, адаптувати граничні об'єкти до різних соціальних умов за межами організації.

Висловлюється думка (Johnson et al., 2016; Tengö et al., 2017 та багато інших), що вчення про екосистемні послуги виходить за межі академічної науки, оскільки може охоплювати й інші системи знань, наприклад, практичний досвід, набутий аборигенними спільнотами протягом тривалого осілого проживання в умовах конкретного ландшафту. Під системою корінних і місцевих знань розуміють світоглядно-культурну парадигму, яка розвивається в безпосередній взаємодії з оточуючим середовищем, управляється адаптивними процесами та передається з покоління в покоління.

Ми погоджуємося з твердженням: «проблеми реального світу не постають перед нами в коробках дисциплінарної форми, як і рішення, асоційовані з цими проблемами» (Costanza, 2008). Залучення корінних народів і місцевих громад до продукування нових знань надзвичайно важливе, оскільки способи пізнання явищ та процесів і знання, отримані в такий спосіб, в окремих випадках можуть виходити за межі класичної наукової картини. Вони відчутно доповнюють відомі науці факти за обсягом і змістом, а також пропонують альтернативні шляхи управління соціально-екологічними системами. Описана колаборація – явище не нове. Подібний симбіоз науки та знань місцевого населення покладений в основу ет-

ноботаніки. Концепція екосистемних послуг являє собою нову, розширену платформу для співпраці подібного зразка, а Дж. Т. Джонсон зі співавторами (Johnson et al., 2016) детально розглядають можливі її формати.

Поняття трансдисциплінарності передбачає глибоку інтеграцію не лише наукових теорій, методологічних принципів і систем знань, але й синтез теоретичного знання, технологій і способів практичної діяльності. Як влучно зауважує Д. І. Чорноморденко (Chornomordenko, 2015): *«Це, в свою чергу, вимагає комплексного підходу, в основі якого лежить феномен одночасного включення у проблемне поле кількох областей знання з метою підвищення ефективності шляхів вирішення складної проблеми»*. У результаті такої інтеграції винаходяться та впроваджуються інновації, здатні вирішити конкретні практичні проблеми. Розглядаючи екосистемні послуги, як об'єкт трансдисциплінарних досліджень, науковці наголошують, що задіяні до колаборації сторони переслідують різні кінцеві цілі. Успішною співпраця вважатиметься лише у випадку гарантії надання однакової ваги різним цілям і дисциплінарним аспектам. Особливо це важливо для трансдисциплінарних досліджень екосистемних послуг, орієнтованих на подальші управлінські дії (Steger et al., 2018).

Висновки і перспективи.

Показано значний внесок концепції екосистемних послуг у сучасну науку. На основі аналізу доступної наукової літератури виокремлено сім комплексних напрямів досліджень екосистемних послуг, пред-

ставлених щонайменше двадцятьма відгалуженнями. У контексті інтернаціоналізації вітчизняної науки в галузі виявлено прогалини в царині трансдисциплінарних комплексних досліджень соціальної та екологічної складових соціоекосистем різних ієрархічних рівнів.

Різні аспекти екосистемних послуг як граничного об'єкту рівноцінно актуальні й досліджуються в межах конкретних наукових дисциплін, а також на полідисциплінарному, міждисциплінарному та трансдисциплінарному рівнях. Як підсумок, на основі аналізу результатів проведеного дослідження окреслено такі тренди трансдисциплінарної співпраці в галузі екосистемних послуг:

- інтеграція наукових дисциплін та їхньої методології;
- злиття знань із різних джерел (наукових і ненаукових);
- залучення стейкхолдерів із різних сфер і щаблів (науковців, землевласників, користувачів екосистемних послуг, представників місцевих громад, підприємців, управлінців тощо);
- зведення всієї сукупності уявлень про екосистемні послуги різних зацікавлених сторін;
- об'єднання різних цілей для застосування концепції екосистемних послуг на практиці;
- консолідація перспектив розвитку різних сфер діяльності задля досягнення компромісу між використанням і збереженням екосистемних послуг.

References

1. Gangahagedara, R., Subasinghe, S., Lankathilake, M., Athukorala, W., & Gamage, I. (2021). Ecosystem services research trends: A bibliometric anal-

- ysis from 2000–2020. *Ecologies*, 2(4), 366–379. <https://doi.org/10.3390/ecologies2040021>.
2. Seppelt, R., Dormann, C. F., Eppink, F., Lautenbach, S., & Schmidt, S. (2011). A quantitative review of ecosystem service studies: Approaches, shortcomings and the road ahead. *Journal of Applied Ecology*, 48(3), 630–636. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01952.x>.
 3. Lautenbach, S., Mupepele, A. C., Dormann, C. F., Lee, H., Schmidt, S., Scholte, S. S. K., Seppelt, R., van Teeffelen, A. J. A., Verhaagen, W., & Volk, M. (2019). Blind spots in ecosystem services research and challenges for implementation. *Regional Environmental Change*, 19(8), 2151–2172. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1457-9>.
 4. Wang, B., Zhang, Q., & Cui, F. (2021). Scientific research on ecosystem services and human well-being: A bibliometric analysis. *Ecological Indicators*, 125, 107449. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.107449>.
 5. Kumar, P. (Ed.). (2012). *The economics of ecosystems and biodiversity: ecological and economic foundations*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849775489>.
 6. Langemeyer, J., Gómez-Baggethun, E., Haase, D., Scheuer, S., & Elmqvist, T. (2016). Bridging the gap between ecosystem service assessments and land-use planning through Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA). *Environmental Science & Policy*, 62, 45–56. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2016.02.013>.
 7. García-Nieto, A. P., Huland, E., Quintas-Soriano, C., Iniesta-Arandia, I., García-Llorente, M., Palomo, I., & Martín-López, B. (2019). Evaluating social learning in participatory mapping of ecosystem services. *Ecosystems and People*, 15(1), 257–268. <https://doi.org/10.1080/26395916.2019.1667875>.
 8. Allan, J. I., Auld, G., Cadman, T., & Stevenson, H. (2022). Comparative fortunes of ecosystem services as an international governance concept. *Global Policy*, 13(1), 62–75. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.13036>.
 9. Steger, C., Hirsch, S., Evers, C., Branoff, B., Petrova, M., Nielsen-Pincus, M., Wardropper, C., & van Riper, C. J. (2018). Ecosystem services as boundary objects for transdisciplinary collaboration. *Ecological Economics*, 143, 153–160. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2017.07.016>.
 10. Schutter, M. S., & Hicks, C. C. (2021). Speaking across boundaries to explore the potential for interdisciplinarity in ecosystem services knowledge production. *Conservation Biology*, 35(4), 1198–1209. <https://doi.org/10.1111/cobi.13659>.
 11. Kostytskyi, M. V. (2014). Logic as Methodology of Scientific Cognition (particularly in Jurisprudence). *Philosophical and Methodological Problems of Law*, (1), 3–13. (In Ukrainian)
 12. Zahvoyska, L. (2014). Theoretical approaches to determining economic value of forest ecosystems services: benefits of pure stand transformation into mixed stands. Scientific proceedings of the forestry academy of sciences of Ukraine, (12), 201–209. (In Ukrainian).
 13. Nestoriak, Yu.Yu. (2015). Some theoretical approaches to the economic valuation of forest area based on ecosystem services. *Scientific bulletin of UNFU*, 25(4), 82–88. (In Ukrainian).
 14. Arkhypova, L., & Prykhodko, M. (2020). Ecosystem services – Analysis of international experience of concept. *Ecological safety and balanced use of resources*, 2(20), 24–32. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-2\(20\)-24-32](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-2(20)-24-32) (In Ukrainian).
 15. Havadzyn, N., & Melnychuk, I. (2020). Improvement of tools for implementation of ecosystem service functions. *Market infrastructure*, 41, 215–220. <https://doi.org/10.32843/infrastructure41-35> (In Ukrainian).

16. Guston, D. H. (2001). Boundary Organizations in Environmental Policy and Science: An Introduction. *In Science, Technology, & Human Values* (Vol. 26, Issue 4). <https://doi.org/10.1177/016224390102600401>.
17. Honeck, E., Gallagher, L., von Arx, B., Lehmann, A., Wyler, N., Villarrubia, O., Guinaudeau, B., & Schlaepfer, M. A. (2021). Integrating ecosystem services into policy-making – A case study on the use of boundary organizations. *Ecosystem Services*, 49, 101286. <https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2021.101286>.
18. Johnson, J. T., Howitt, R., Cajete, G., Berkes, F., Louis, R. P., & Kliskey, A. (2016). Weaving Indigenous and sustainability sciences to diversify our methods. *In Sustainability Science* (Vol. 11, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s11625-015-0349-x>.
19. Tengö, M., Hill, R., Malmer, P., Raymond, C. M., Spierenburg, M., Danielsen, F., Elmqvist, T., & Folke, C. (2017). Weaving knowledge systems in IPBES, CBD and beyond – lessons learned for sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 26–27, 17–25. <https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2016.12.005>.
20. Costanza, R. (2008). Ecosystem services: Multiple classification systems are needed. *Biological Conservation*, 141(2), 350–352. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.12.020>.
21. Chornomordenko, D. I. (2015). Modern ecology and transdisciplinary research methodology. *Gileya: scientific herald*, (97), 247–252. (In Ukrainian).

Zhuk A. (2024)

ECOSYSTEM SERVICES AS THE OBJECT OF INTERDISCIPLINARY COLLABORATION.

BIOLOGICAL SYSTEMS: THEORY AND INNOVATION, 15(2): 17-27.

<https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Biologiya/article/view/49732>

[http://dx.doi.org/10.31548/biologiya15\(2\).2024.002](http://dx.doi.org/10.31548/biologiya15(2).2024.002)

Abstract. The concept of ecosystem services embodies an ideological framework, serves as a subject for fundamental research, provides methodological groundwork for applied projects, offers a practical approach to natural resource management, acts as a platform for international governmental and non-governmental collaboration, and serves as a means of knowledge production. The article presents the results of a systematic literature analysis focused on identifying key research trends in the field of ecosystem services that need further attention and development. It also highlights promising directions for transdisciplinary collaboration in the implementation and management of ecosystem services. Research methods involved iterative information retrieval, analysis of scientific papers, and review of contemporary methodological approaches. Based on the processed sources, seven comprehensive research directions of ecosystem services and twenty branches were identified. Ecosystem services are characterized as boundary objects. The main findings point to the need for integration of scientific disciplines, involvement of a wide range of stakeholders, and consolidation of development perspectives across various fields to achieve a compromise between ecosystem services utilization and conservation. The role of boundary organizations in achieving these goals is emphasized. An insufficient integration between social and ecological disciplines in Ukrainian science is identified along with probable reasons for this situation. The conclusions underscore the importance of a transdisciplinary approach to ecosystem services research. Future research prospects include expanding collaboration between researchers and practitioners, as well as refining methodological approaches for comprehensive ecosystem services study.

Key words: ecosystem services, boundary objects, transdisciplinary research, scientific methodology, knowledge integration

ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВУГЛЕЦЕВИХ СОРБЕНТІВ НА ОСНОВІ ТИРСИ РІЗНИХ ПОРІД ДЕРЕВ

О.М. КАЛІВОШКО,

доктор економічних наук, професор кафедри адміністративного
менеджменту та зовнішньоекономічної діяльності
alek-k@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0003-0417-4529>

О.І. НАУМОВСЬКА,

кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології
агросфери та екологічного контролю
naumovska@nubip.edu.ua

<https://orcid.org/0000-0002-8737-3568>

Є.М. БЕРЕЖНЯК,

кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології
агросфери та екологічного контролю
beregnyakem@nubip.edu.ua

<https://orcid.org/0000-0001-5945-1285>

С.П. ПАЛАМАРЧУК,

кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології
агросфери та екологічного контролю
spal@i.ua

<https://orcid.org/0000-0002-9083-6850>

С.Д. ПАВЛЮК,

кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології
агросфери та екологічного контролю
pavlyuksd@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0003-0025-3975>

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація. У роботі проаналізовано ефективність застосування вуглецевих сорбентів на основі тирси різних порід дерев у знешкодженні забруднень паливно-мастильними матеріалами. Обґрунтовано переваги застосування методу сорбції, як ефективного, поширеного, простого та доступного заходу для очищення від нафтопродуктів. Акцентовано увагу на якості сорбуючого матеріалу за використання вуглецевих сорбентів із тирси різних порід дерев. Дано структурні, фізико-хімічні, поглинальні й сорбційні характеристики вуглецевих сорбентів із рослинної сировини та показано ефективність їх

використання для очищення водного й ґрунтового середовища. Розкрито екологічні й економічні переваги очищення водного та ґрунтового середовища від нафтопродуктів вуглецевими сорбентами з рослинної сировини, порівняно з іншими методами та засобами очищення. Мета роботи полягала в аналізі ефективності дії вуглецевих сорбентів із тирси різних порід дерев у боротьбі із нафтовими забрудненнями. Методи досліджень – загальноприйняті.

Встановлено, що тирса сосни і грабу має велику нафтоємність і сорбційну здатність, яка у 2,1-2,5 рази вища, порівняно із вуглецевими сорбентами із тирси інших порід дерев, завдяки чому може ефективно використовуватися у знешкодженні нафтових розливів. Термічна обробка тирси активізує її сорбційну ємність та нафтоємність у 2,3-4,1 рази, що вказує на її екологічну ефективність у адсорбції паливно-мастильних матеріалів. Оптимальна температура процесу карбонізації тирси становить у межах 250-300°C, а тривалість – 9,0-10,5 хвилин. Відзначаємо також і економічну ефективність внесення вуглецевих сорбентів у 2,5-4,0 рази, порівняно із застосуванням звичайної тирси.

Ключові слова: нафтопродукти, вуглецеві сорбенти, тирса, карбонізація, деструкція полімерних ланцюгів, нафтоємність, енергетичні затрати.

Вступ.

Нафтопродукти, які у великих об'ємах використовуються транспортними засобами, поширене джерело забруднення природних ресурсів. Із загальної кількості паливно-мастильних матеріалів, які виробляються та використовуються, понад 2% потрапляє у навколишнє середовище. Стає очевидним, що небезпеку для довкілля становлять як самі нафтопродукти, так і домішки, які вони містять. Проникаючи у ґрунтову товщу та потрапляючи у водні об'єкти, нафтопродукти завдяки фізико-хімічним реакціям і біологічним взаємодіям, перетворюються у токсичні та шкідливі речовини для біоти. Тому очищення води та ґрунту від паливно-мастильних матеріалів методом сорбції є організаційно, технологічно, економічно й екологічно доцільним і необхідним. У зв'язку із цим особливі ролі, значення і поширення набувають вуглецеві сорбенти на основі

рослинної сировини. Дослідження суті процесів карбонізації, фізико-хімічних перетворень структурно-сорбційних властивостей вуглецевих сорбентів, сировиною яких є тирса різних порід дерев та процесів сорбції ними нафтопродуктів потребують подальшого вивчення та аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Забруднення води продуктами нафтопереробки негативно впливає на флору і фауну водойм, у результаті чого погіршуються умови їх існування, відбуваються порушення екологічної рівноваги у водних екосистемах, уповільнюються процеси самоочищення (Shahzad, A. at el, 2020; Karam, Q., 2021; Mohammad, A., 2021; Плаксієв Л.В., 2016). Нафтопродукти, які потрапляють до водного та ґрунтового середовищ, обумовлюють певні зміни у них (Cruz, 2013; Turner, N., 2021; Бондарюк Р. М. та ін., 2017;

UNEP, 2020), викликаючи шкідливе та небезпечне забруднення довкілля продуктами їх розкладу (Наконечний І. В. та ін., 2023). Компоненти нафти, зокрема різні смоли, парафіни, асфальтени закупорюють міжагрегатні та внутрішньо агрегатні пори ґрунту, міцно зв'язуючи ґрунтові частинки, цементуючи їх. Різноманіття методів і засобів боротьби із нафтовими забрудненнями визначається складом нафти і нафтопродуктів, а також процесами фізико-хімічних перетворень за їх потрапляння у навколишнє середовище.

Серед існуючих методів зменшення забруднення продуктами нафтових компонентів широко застосовується фізико-хімічний, принцип дії якого ґрунтується на сорбційній здатності очищення води від нафтопродуктів. Він є доволі швидким, ефективним та з мінімальним впливом на навколишнє середовище. У результаті використання сорбентів можна отримати менш токсичні або ж навіть нетоксичні сполуки (Mojžiš, M., 2019; Шевчик-Костюк Л. З. та ін., 2022). Відповідно ефективними, поширеними та доступними є сорбенти для очищення ґрунтових і водних екосистем із широким спектром дії від різних небезпечних забруднень.

Для ліквідації забруднень нафтового походження у світовому масштабі використовуються понад 200 видів сорбентів (Quyang, D., 2023; Meez, E., 2021; Головань Л. В. та ін., 2021). Усі вони різняться між собою за походженням, дисперсністю, призначенням та способами утилізації. Необхідно зауважити, що якість сорбентів визначається їх ємністю по відношенню до нафти, ступенем гідрофобності, плавучістю опісля поглинання нафти та нафтопродук-

тів, можливістю утилізації сорбенту. Однак у заходах з ліквідації наслідків нафтового поширення та відновлення порушених земель необхідно керуватися принципом мінімізації впливу на екосистеми, які уже зазнали забруднень (Khan et al, 2018).

В останні десятиліття сорбенти набувають широкого застосування, передусім для очистки ґрунтів та води від нафтопродуктів (Діюк В. Є., 2017). Оскільки різні галузі промисловості продовжують здійснювати техногенне навантаження на довкілля (Kucher et al, 2023), то варто відзначити, що вуглецеві сорбенти залишаються одними із найзатребуваніших матеріалів для поліпшення стану навколишнього середовища (Шендрік Т. Г., та ін., 2021). Вуглецеві сорбенти отримані на основі побічної продукції сільськогосподарського виробництва, а також деревообробної галузі – тирси, яка береться від основних порід дерев, які поширені у лісових екосистемах України (Beregnyak et al, 2023) суттєво різняться своїми властивостями й характеристиками (Калівошко М. Ф., 2021). Значний вплив на сорбційні показники абсорбентів мають технології і процеси, що відбуваються при отриманні вуглецевих сорбентів (Роговський І. Д. та ін., 2020).

Широкого застосування у якості сорбентів набули торфові сумішки, оскільки ця природна сировина є загальнодоступною, нетоксичною та відносно дешевою у добуванні. Використання торфової маси, як поглинач нафтових забруднень, визначається універсальністю властивостей його, як адсорбенту. Серед переліку адсорбентів слід звернути увагу на експлоатований графіт, який є екологічно чистим матеріалом. Він характеризується низькою щільністю, високою

пористістю, крім того досить легко утилізується. Завдяки своїй пористій структурі є добрим адсорбентом із високою сорбційною здатністю для ліквідації розливів нафти (Забулонов Ю. Л. та ін., 2021). Одним із дієвих варіантів щодо знешкодження нафтових забруднень є використання пінопласту. Згідно із дослідженнями Н. І. Глібовицької та Л. В. Плаксія (2019) середній час сорбції нафтової плями цим матеріалом становить 0,86 см/с.

Відмічається висока поглинальна здатність деревних відходів та їх ефективний прояв сорбційних властивостей. Зокрема, на основі лігніну опісля його термічної і хімічної обробки отримують ефективні екологобезпечні сорбенти широкого спектру дії. Так, тирса ефективно застосовується для вилучення іонів міді із промислових відходів (Бондаренко Л. Ю., 2021). Більшість органічних природних сорбентів (тирса, солома, зернове лушпиння, торф, листя) серед переваг мають біодеградацію та здатність вбирати нафту від 5 до 15 разів, що перевищує вагу самого сорбенту (Літвак С. М., Літвак О. А., 2023).

Нині, за умов воєнного стану в Україні, доволі частими є руйнування від ракетних обстрілів російської федерації нафтових комплексів, складів із паливно-мастильними матеріалами, знешкодження АЗС, тощо. Тому забруднені земельні ресурси, території потребують постійного всебічного знезараження та ефективних методів відновлення від взаємодії із поллютантами (Сплодитель А., 2023; Строкаль В. та ін., 2023; Макаренко Н. А. та ін., 2022). Знаходимо дані, що вуглецеві сорбенти на основі тирси, мають ліпші сорбційні й поглинальні характеристики, порівняно

із сорбентами, отриманими із іншої рослинної сировини (Калівошко М. Ф., 2021). За даними С. К. Назаренко та Л. В. Архипової (2016) коефіцієнт нафтопоглинання тирси становить 1:1, а ефективність очистки становить 67%. Так, будова, властивості, шляхи отримання та застосування вуглецевих сорбентів на основі рослинницької сировини суттєво різняться (Калівошко, 2021, 2022 і 2022, Діюк, Роговський). У той же час, сорбційні та поглинальні характеристики, фізико-хімічні властивості й процеси перетворення побічної продукції деревообробної промисловості, а саме використання тирси різних порід дерев, як вуглецевих сорбентів, з метою очищення водних і ґрунтових екосистем, проведення їх екологічної й економічної оцінки, ще недостатньо досліджені.

Мета досліджень. Метою досліджень було вивчення фізико-хімічних, структурних і поглинальних властивостей тирси різних порід дерев та отриманих із неї вуглецевих сорбентів. Також аналізували технічні і технологічні процеси, ступінь і повноту очищення отримання вуглецевих сорбентів з рослинної сировини, обґрунтовували екологічну та економічну доцільність використання вуглецевих сорбентів отриманих з тирси сосни та граба для очищення водного середовища та ґрунтів від нафтопродуктів.

Матеріали і методи дослідження.

У роботі було використано наступні методи досліджень. Сорбційну ємність (нафтоємність) визначали ваговим методом за різницею між насиченим і вихідним сорбентом. Статичну об'ємну ємність (СОЄ) – за до-

помогою фіксації наважки сорбенту з відповідним об'ємом NaOH з послідовним титруванням розчином HCl. Ексікаторний метод (вловлювання парів бензолу і води) застосовували для визначення сорбційного об'єму пор тирси різних порід дерев і рослинної продукції (солома, листя).

Результати дослідження та їх обговорення

Відходи рослинної сировини є ефективними сорбентами для очищення водного і ґрунтового середовищ від нафтопродуктів. Проведені дослідження показують, що утворена тирса, значні об'єми якої накопичуються у деревообробній галузі, від таких порід дерев, як сосна і граб має дещо кращі фізико-хімічні, структурні властивості, сорбційні й поглинальні характеристики, порівняно із іншими сорбентами рослинного походження (табл. 1).

За результатами власних досліджень та інших вчених підтверджується той факт, що сорбенти за ємності поглинання нафтопродуктів у межах 2-3 г мг-екв/г і більше вико-

ристовуються для очищення ґрунту і водного середовища. У той же час тирса таких порід дерев, як сосна, граб і горіх за природної вологості близько 50-60 % має ємність поглинання нафтопродуктів у межах 2,4-2,7 мг-екв/г, що відповідає необхідним вимогам й може використовуватися для сорбції ґрунтів забруднених нафтопродуктами. Разом з тим тирса, що отримана безпосередньо на виробництві, за своєї природної вологості внаслідок тривалого зберігання (навіть за дотримання усіх відповідних вимог), завдяки інтенсивним мікробіологічним процесам у вологому середовищі може псуватися, а тому потребує відповідних умов і правил зберігання.

З метою поліпшення структурних, фізико-хімічних і сорбційних властивостей рослинної сировини досить часто впроваджують процес карбонізації. Варто зауважити, що це ефективний засіб отримання вуглецевих сорбентів із рослинної сировини у процесі її термічної обробки, який розпочинається із нагрівання вихідної сировини за температури вище 110-120°C. Карбонізація лігні-

1. Поглинальні та сорбційні характеристики тирси різних порід дерев та побічної рослинної продукції за вологості 50-60 %

Розмір фракцій	Нафто-поглинання (масова адсорбційна нафтоємність) a , г/г	Статична об'ємна ємність (COE), мг-екв/г	Об'єм сорбційних пор за бензолом, $V_s(C_6H_6)$, см ³ /г	Об'єм сорбційних пор за водою, $V_s(H_2O)$, см ³ /г	Питома поверхня, Спит., м ² /г
Тирса сосни	2,7	2,6	0,07	1,0	8,4
Тирса горіха	2,3	1,9	0,03	0,5	7,9
Тирса берези	1,9	1,6	0,03	0,4	7,9
Тирса осики	2,1	1,7	0,03	0,4	7,9
Тирса граба	2,4	2,2	0,04	0,6	8,0
Солома	1,6	0,3	0,03	0,4	7,3
Листя	1,1	0,2	0,02	0,4	6,2

ну призводить до утворення вуглецевих матеріалів з розвинутою поруваною структурою (Галиш В. В., 2022). Завдяки карбонізації збільшується загальний об'єм пор, що позитивно сприяє сорбційній здатності вуглецевих матеріалів. Оскільки тирса дерев має ліпші властивості, порівняно із соломом злакових культур і листям дерев, ми досліджували технологічну сутність отримання вуглецевих сорбентів з неї та їх ефективність. Внаслідок того, що вуглеводна частина тирси більшості порід дерев складається із целюлози і геміцелюлози, а комплекс їх ароматичних речовин – із лігніну, то завдяки карбонізації відбуваються складні, послідовні і глибокі процеси деструкції їх полімерних ланцюгів із виділенням, як смолистих речовин досить складної будови, так і великої кількості летких речовин. Процеси карбонізації ми досліджували в діапазоні від 100 до 400 °C через кожні 50 °C.

За результатами досліджень встановлено, що процес карбонізації тирси різних порід дерев розпочинається за температури 120-130 °C. Зростання температур до 200-300 °C активізує реакції деструкції геміцелюлози, целюлози та лігніну, що супроводжується складними процесами перетворень, за яких відбувається виділення простих вуглецевих сполук, зокрема вуглекислого газу і оксиду вуглецю, зрідженої суміші та смол. На різних стадіях процесу карбонізації, що обумовлена температурними параметрами, інтенсивність та величина енергії активації деструктивних перетворень суттєво змінюється, тому що в межах певних температурних діапазонів відбувається розклад компонентів тирси різних порід дерев – геміцелюлози, а потім целюлози і лігніну. Отримані

результати карбонізації тирси дерев вказують на складність фізико-хімічних процесів розкладання та перетворення геміцелюлози, целюлози та лігніну.

За карбонізації тирси відбуваються процеси деструкції полімерних ланцюгів вихідної сировини із виділенням летких речовин (оксиду вуглецю (CO), вуглекислого газу, вуглеводнів насиченого, ненасиченого і ароматичного рядів, спиртів, кетонів, альдегідів і органічних кислот), а також смол і смолистих речовин. Внаслідок цього утворюються різного роду мікро- і мезопори у формі кратерів, розтріскування та формується пориста структура. Розвиток пористої структури у процесі карбонізації обумовлений як вигоранням окремих областей вихідної сировини, так і окисненням її поверхні продуктами, що виділяються, насамперед, водяною парою і вуглекислим газом. Пори створюють у твердому тілі вуглецевого сорбенту доволі значну внутрішню поверхню. Така розвинена й велика за площею пориста поверхня забезпечує доступність функціональних груп та швидкість реакцій, які на ній протікають.

Сорбенти, які характеризуються сорбційним об'ємом пор у межах 0,6-2,0 см³/г, досить суттєво обумовлюють зниження концентрації нафтопродуктів. Проведення карбонізації у низькотемпературному одностадійному режимі сприяє значному зростанню об'єму пористої структури карбонатів з тирси дерев. Максимальне значення сорбційного об'єму пор вуглецевих сорбентів з тирси різних порід дерев, які досліджувалися, має сорбент із тирси сосни, що був отриманий за оптимальних умов карбонізації.

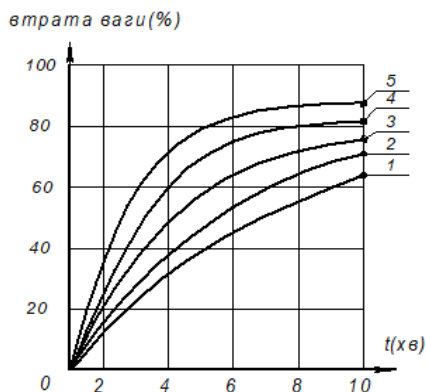


Рис. 1. Кінетичні криві карбонізації зразків тирси сосни при температурі (°C): 1 – 250, 2 – 300, 3 – 350, 4 – 400, 5 – 450

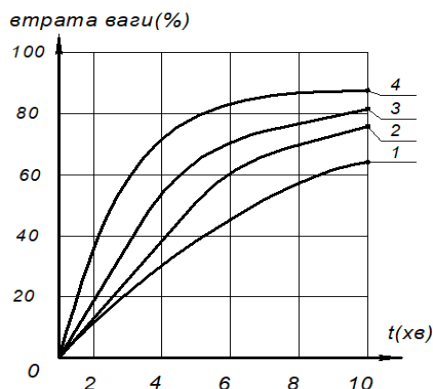


Рис. 2. Кінетичні криві карбонізації зразків тирси горіха при температурі (°C): 1 – 250, 2 – 300, 3 – 350, 4 – 450

Отже, отримані дані вказують на складність процесу карбонізації. Очевидно, що у цьому процесі беруть участь надзвичайно складні й елементарні радикальні реакції, які мають різні кінетичні параметри проходження та протікають у широкому діапазоні температурних областей. Процес карбонізації тирси різних порід дерев досліджували за температури 250-450°C із інтервалом у 50°C, а тривалість від 3-ої до 9-ої хвилини, через кожні 3 хвилини. Слід відмітити, що в результаті карбонізації вага тирси зменшується і цю закономірність досить чітко видно на рисунках 1 і 2.

Аналізуючи кінетичні криві втрат вологи (рис. 3-5) можна бачити, що за усіх досліджуваних режимів термообробки, карбонізацію тирси не доцільно здійснювати до випалу більше 70-75 %, оскільки зменшується вихід вуглецевих сорбентів та відбувається деструкція пористої структури. Встановлено, що за кожної досліджуваної температури, режим її карбоні-

зації має певне оптимальне значення тривалості за якого нафтосорбційна ємність отриманого вуглецевого сорбенту є максимальною.

Графіки показують (рис. 1-5), що найоптимальнішими умовами карбонізації тирси різних порід дерев слід вважати температуру у межах 250-300°C за тривалості процесу у межах 9,0-9,5 хвилини. Сорбенти, які характеризуються сорбційним об'ємом пор в межах 0,6-2,0 см³/г здатні суттєво знижувати концентрацію нафтопродуктів. Виявлено, що із зростанням сорбційного об'єму пор сорбенту збільшується пористість, а його насипна щільність (Δ , г/см³) зменшується (рис. 6). Для тих сорбентів, які брали участь в експерименті, така закономірність цілком підтверджується відповідними результатами досліджень.

Проведені дослідження показали (рис. 6), що для вибраних нами сорбентів ця залежність підтверджується. Таким чином, вуглецеві сорбенти, які отримані шляхом карбонізації

втрата ваги(%)

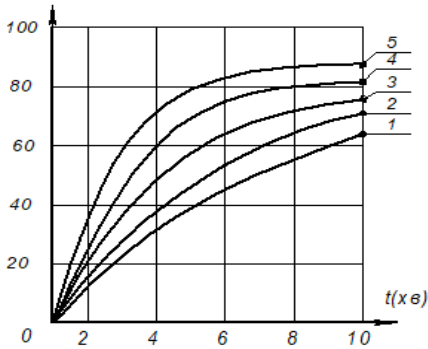


Рис. 3. Кінетичні криві карбонізації зразків тирси берези за температури (°C): 1 – 250, 2 – 300, 3 – 350, 4 – 400, 5 – 450

втрата ваги(%)

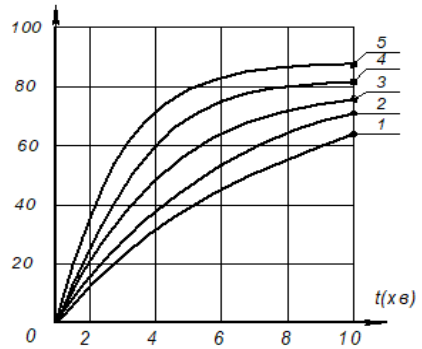


Рис. 4. Кінетичні криві карбонізації зразків тирси осики за температури, °C: 1 – 250, 2 – 300, 3 – 350, 4 – 400, 5 – 450

втрата ваги(%)

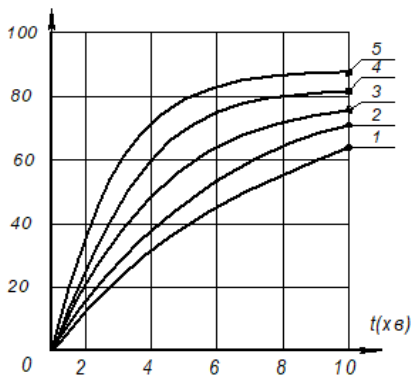


Рис. 5. Кінетичні криві карбонізації зразків тирси граба за температури (°C): 1 – 250, 2 – 300, 3 – 350, 4 – 400, 5 – 450

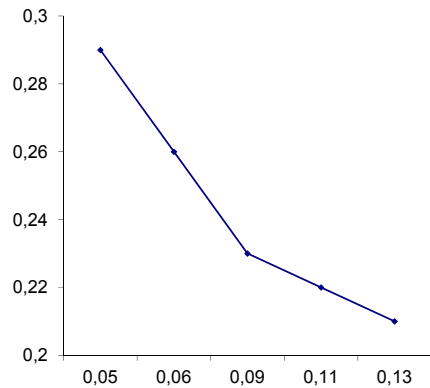


Рис. 6. Залежність між величиною сорбційного об'єму пор та значенням щільності вуглецевого сорбенту на основі тирси сосни

тирси різних порід дерев, мають кращі фізико-хімічні, структурні показники, нафтоємність, а величина сорбції до нафтопродуктів зростає у декілька разів, порівняно з вихідною продукцією (табл. 2).

Слід відзначити, що сорбційна ємність вуглецевих сорбентів з тирси осики та берези знаходиться у діапа-

зоні від 2,0 до 2,1 мг-екв/г. У той же час величина поглинання вуглецевих сорбентів із тирси горіха становить 2,3 мг-екв/г, а максимальні її показники спостерігаються у карбонатів з тирси граба та сосни відповідно 2,8 та 3,5 мг-екв/г. Доречно звернути увагу на те, що нафтоємність тирси різних порід дерев не дуже різнилася

2. Поглинальні і сорбційні характеристики вуглецевих сорбентів із тирси різних порід дерев за вологості 50-60%

Показник	Сосни	Горіха	Берези	Осики	Граба
Нафтоємність а, г/г	11,2	5,4	4,5	4,7	7,6
Об'єм сорбційних пор за бензолом, $V_s(C_6H_6)$, см ³ /г	0,09	0,05	0,04	0,04	0,07
Об'єм сорбційних пор за водою, $V_s(H_2O)$, см ³ /г	0,12	0,09	0,07	0,07	0,10
Статична об'ємна ємність (СОЄ), мг-екв/г	3,6	2,3	2,0	2,1	2,8
Питома поверхня, Спит, м ² /г	13,1	10,1	10,0	10,0	11,1
Зольність, %	1,0	2,1	1,0	1,0	2,5

між собою. Проте карбонати тирси сосни мали вищу нафтоємність у 2,1-2,5 рази, порівняно із вуглецевими сорбентами із тирси горіху, берези та осики і в 1,5 рази вищу, ніж із грабу.

З практичної точки зору важливе значення відіграє економічна ефективність використання сорбентів. У випадках застосування тирси у якості сорбентів, витрати будуть пов'язані із її внесенням, збиранням та утилізацією. Окрім зазначених витрат, їх отримання пов'язане із додатковими енергетичними затратами і, відповідно, зростанням собівартості сорбентів. Проте розрахунки показали, що вносити вуглецеві сорбенти із тирси є раціональнішим заходом, порівняно із звичайним застосуванням тирси. Вуглецеві сорбенти мають нафтоємність у 2,5-4,0 рази вищу, порівняно із вихідною сировиною, тому їх вносять меншу кількість, відповідно у 3-4 рази за тої самої сорбційної й нафтопоглинальної ефективності.

Внесення, а особливо збирання сорбентів після використання, є складним і затратним процесом. Сумарні затрати на карбонізацію тирси різних порід дерев та застосування меншого об'єму вуглецевих сорбентів для знезараження нафтопродуктів

не перевищують затрат, які пов'язані із використанням тирси. Слід врахувати також, що використання вуглецевих сорбентів для поглинання нафтопродуктів, пов'язане як з меншими затратами на застосування (у 3-4 рази менші об'єми їх внесення і збирання), так і на утилізацію, порівняно з побічною продукцією рослинного походження. Оптимальною температурою карбонізації тирси різних порід дерев є температура 300°C за тривалості процесу у межах 9,0-9,5 хвилин, а допустимою - 250°C за тривалості процесу у 10-10,5 хвилин.

Висновки.

1. Встановлено, що величини нафтоємності та сорбційної здатності тирси різних порід дерев, особливо сосни і грабу, є доволі високими і можуть використовуватися для поглинання паливно-мастильних матеріалів. Найкращим поглиначем нафтових забруднень була тирса сосни, нафтоємність якої становила 11,2 г/г, що у 2,1-2,5 рази вища, порівняно із вуглецевими сорбентами із тирси горіха, берези й осики та у 1,5 рази, ніж із тирси грабу. Для отримання вуглецевих сорбентів за відсутності тирси

сосни також доцільно використовувати тирсу грабу. Навіть той факт, що тирса грабу поступається своїми сорбційними властивостями карбонатам з тирси сосни, не зменшує вагомості її застосування і теж є ефективною у знешкодженні нафтових забруднень.

2. Процес термічної обробки тирси сприяє збільшенню сорбційної ємності отриманих вуглецевих сорбентів майже у 1,5 рази, а нафтоємність при цьому зростає у 2,3-4,1 рази. Карбонізацію тирси різних порід дерев доцільно проводити за температури 250-300°C протягом 9,0-10,5 хвилин, що підвищує структурно-сорбційні й поглинальні характеристики вуглецевих сорбентів, тим самим сприяючи ефективному видаленню нафтових забруднень.

3. Що стосується економічної ефективності застосування вуглецевих сорбентів, то їх внесення вважається кращим заходом, ніж поглинання нафтових забруднень звичайною тирсою. Відзначаємо, що вуглецеві сорбенти у 2,5-4,0 рази мають вищу нафтоємність, порівняно із вихідною сировиною. Це сприяє внесенню меншої кількості сорбенту у 3-4 рази за однієї і тої самої нафтопоглинальної ефективності, що є економічно й екологічно вигіднішим за застосування звичайної тирси різних порід дерев.

References

1. Shahzad, A., Siddiqui, S., Bano, A., Sattar, S., Hashmi, M. Z., Qin, M., & Shakoar, A. (2020). Hydrocarbon degradation in oily sludge by bacterial consortium assisted with alfalfa (*Medicago sativa* L.) and maize (*Zea mays* L.). *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05902-w>.
2. Karam, Q., & Al-Wazzan, Z. (2021). Toxicity of petroleum hydrocarbons to *Brachyuran* crabs: a review of deleterious effects of oil-related xenobiotics on life stages. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 101(3), 561-576. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0025315421000370>.
3. Mohammad, A. F., Mourad, A. A. I., Galiwango, E., Lwisa, E. G., Al-Marzouqi, A. H., El-Naas, M. H., ... & Al-Marzouqi, M. H. (2021). Effective and sustainable adsorbent materials for oil spill cleanup based on a multistage desalination process. *Journal of Environmental Management*, 299, 113652. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113652>.
4. Плаксієв, Л. В. (2016). Методологія оцінювання поверхневих вод в місцях впливу об'єктів нафтопроводного транспорту. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*, (2), 24-28. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ebzp_2016_2_5.
5. Cruz, J. M., Lopes, P. R. M., Montagnolli, R. N., Tamada, I. S., Silva, N. M., & Bidoia, E. D. (2013). Toxicity assessment of contaminated soil using seeds as bioindicators. *J Appl Biotechnol*, 1(1), 1-10. DOI: <http://dx.doi.org/10.5296/jab.v1i1.3408>.
6. Turner, N. R., Parkerton, T. F., & Renegar, D. A. (2021). Toxicity of two representative petroleum hydrocarbons, toluene and phenanthrene, to five Atlantic coral species. *Marine Pollution Bulletin*, 169, 112560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112560>.
7. Боднарчук Р. М., Вакерич М. М., Петросова В. І., Ніколайчук В. І., Гасинець Я. С. Вплив забруднення нафтопродуктами на мікробіоценоз ґрунту та фітотоксичний ефект в умовах Ужгородського району Закарпаття. (2017). *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія*, Випуск 42 (2017): 86-93. URL: <https://cutt.ly/fwNelg60>

8. Soil pollution a risk to our health and food security. United Nations Environment Programme (UNEP), 2020. URL: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/soil-pollution-risk-our-health-and-food-security>
9. Наконечний І. В., Літвак О. А., Літвак С. М., Маринець О. М. Аналіз чинників, що впливають на процес біоремедіації ґрунтів, забруднених нафтопродуктами (2023). *Екологічні науки* № 4(49). 114-122. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.15>
10. Sayed, K., Baloo, L., & Sharma, N. K. (2021). Bioremediation of total petroleum hydrocarbons (TPH) by bioaugmentation and biostimulation in water with floating oil spill containment booms as bioreactor basin. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 2226. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18052226>
11. Mojžiš, M., Bubeníková, T., Zachar, M., Kačíková, D., & Štefková, J. (2019). Comparison of natural and synthetic sorbents' efficiency at oil spill removal. *BioResources*, 14(4), 8738-8752. DOI: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.14.4.8738-8752>
12. Шевчик-Костюк Л. З., Романюк О. І., Ощиповський І. В. Особливості забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами: огляд (2022). *Acta Biologica Ukrainica*. № 1. С. 32–40. DOI: <https://doi.org/10.26661/2410-0943-2022-1-04>
13. Meez, E., Hosseini-Bandegharai, A., Rahdar, A., Thysiadou, A., Matis, K. A., & Kyzas, G. Z. (2021). Synthetic oil-spills decontamination by using sawdust and activated carbon from aloe vera as absorbents. *Biointerface Res Appl Chem*, 11(4), 11778-11796. DOI: <https://doi.org/10.33263/BRIAC114.1177811796>
14. Ouyang, D., Lei, X., & Zheng, H. (2023). Recent Advances in Biomass-Based Materials for Oil Spill Cleanup. *Nanomaterials*, 13(3), 620. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano13030620>
15. Головань Л. В., Бузіна І. М., Чуприна Ю. Ю. (2021). Екологічні методи відновлення земель, забруднених нафтопродуктами 60-63 <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-047-6-16>
16. Khan, M. A. I., Biswas, B., Smith, E., Naidu, R., & Megharaj, M. (2018). Toxicity assessment of fresh and weathered petroleum hydrocarbons in contaminated soil-a review. *Chemosphere*, 212, 755-767. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.094>
17. Діюк В. Є. (2017). Вуглецеві сорбенти. Одержання, будова та властивості: навчальний посібник. Київ, ВПЦ «Київський університет». 143.
18. Kucher, L., Krasnoshtan, I., Nedilska, U., Muliarchuk, O., Manzii, O., Menderetsky, V., ... & Myronycheva, O. (2023). Heavy Metals in Soil and Plants During Revegetation of Coal Mine Spoil Tips and Surrounded Territories. *Journal of Ecological Engineering*, 24(7). DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/164756>
19. Шендрік Т. Г., Тамко В. О., Шевкопляс В. М., Бован Л. А., Циба М. М. Міцні вуглецеві сорбенти з композиційної сировини на основі вугілля та побічних продуктів коксохімії. Фізико-органічна хімія, фармакологія та фармацевтична технологія біологічно активних речовин: збірник наукових праць / За заг. ред. А. Ф. Попова. - Київ: КНУТД, 2021. - Вип. 3. - С. 224-236. URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19980/1/FOCh_2021_V3_P224-236.pdf
20. Beregniak, E., Beregniak, M., Myronycheva, O., Balabak, A., Belava, V., Boroday, V., ... & Voitsekhivskyi, V. (2023). Ecological Analysis of the Current State of Forest Resources in Forest Steppe of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*, 24(1), 87-96. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/155951>
21. Калівошко О. М., Калівошко М. Ф. Техніко-страхова оцінка вуглецевих

- сорбентів на основі рослинної сировини для очищення нафтопродуктів. *Machinery&Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. Vol. 12 (2) (2021). P. 83-88. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.02>
22. Rogovskii, I. L., Kalivoshko, O. M., Voinash, S. A., ...Obukhova, I. A., Kebko, V. D. Research of absorbing properties of carbon sorbents for purification of aquatic environment from oil products .IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 2020, 548(6), DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/6/062040>
 23. Забулонов Ю.Л., Пугач О.В., Кисельов Ю.В., Одукалець Л.А., Буртняк В.М. (2021). Відновлення водойм, забруднених нафтопродуктами за допомогою сорбенту розширеного графіту. *Геохімія техногенезу*. 33. DOI: <https://doi.org/10.15407/geotech2020.33.094>
 24. Glibovyt'ska, N. I., & Plak'siy, L. V. (2019). Ефективність поглинання нафти сорбентами природного та штучного походження. *Науковий вісник НЛТУ України*, 29(6), 76-78. DOI: <https://doi.org/10.15421/40290615>
 25. Бондаренко Л. Ю. Використання деревної біомаси як добрива для поліпшення ґрунтів у садах. V Всеукраїнська науково-практична конференція «Плодовий сад – новітнє в теорії та практиці» 18 червня 2021 року. Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного. 2021. С. 60-64. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/tm/wp-content/uploads/sites/14/10.-vykorystannja-derevnoyi-biomasy-jak-dobryvo-dlja-polipshennja-hruntiv-u-sadah.pdf>.
 26. Літвак, С. М., & Літвак, О. А. (2023). Аналіз властивостей сорбентів для ліквідації розливів нафти на водних об'єктах. Режим доступу:<https://eir.nuos.edu.ua/handle/123456789/7325>.
 27. Сплодитель, А., Голубцов, О., Чумаченко, С., & Сорокіна, Л. (2023). Забруднення земель внаслідок агресії Росії проти України. Київ: ГО "Центр екологічних ініціатив «Екодія». URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii1.pdf>.
 28. Строкаль В. П., Бережняк Є. М., Наумовська О. І., Вагалюк Л. В., Ладика М. М., Сербенюк Г. А., Паламарчук С. П., Павлюк С. Д. Вплив російської агресії на стан природних ресурсів України: монографія // За заг. ред. В. П. Строкаль. К., Вид. центр НУБіП України, 2023. 218 с. <https://dglb.nubip.edu.ua/items/4d10546> <https://dglb.nubip.edu.ua/items/4d10546d-6fb3-4ebf-b29a-75f0335d008d>.
 29. Makarenko, N. A., Strokal, V. P., Berezhniak, Y. M., Bondar, V. I., Pavliuk, S. D., Vagaliuk, L. V., ... & Kovpak, A. V. (2022). Вплив російської воєнної агресії на природні ресурси України: аналіз ситуації, методологія оцінювання. *Наукові доповіді НУБіП України*, (4 (98)). URL: <http://dx.doi.org/10.31548/dopovid2022.04.003>.
 30. Калівошко О. М., Калівошко М. Ф. Техніко-економічна оцінка тирси різних порід дерев як сорбентів для очищення нафтопродуктів. *Machinery& Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2021, Vol. 12 (3) (2021). P. 137-142. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.02>.
 31. Назаренко, С. К., & Архипова, Л. М. (2016). Сучасні методи ліквідації аварійних розливів нафти на водних об'єктах суходолу. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*, (1), 72-79. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvif_2016_1_9.
 32. Калівошко О. М., Калівошко М. Ф. Техніко-економічне обґрунтування ефективності вуглецевих сорбентів на основі тирси сосни для очищення нафтопродуктів. *Machinery & Energetics*.

- Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. Vol. 13 (1) (2022). P. 49-53. DOI: [https://doi.org/10.31548/machenergy.13\(1\).2022.49-53](https://doi.org/10.31548/machenergy.13(1).2022.49-53).*
33. Будзуляк І. М., Вашинський В. М., Рочій Б. І. Адсорбційні властивості вуглецевих матеріалів, отриманих методом хімічної активності. ДВНЗ. Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника. 2015. Т.13, №1. С. 84-90. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/108647/12-Budzu-lyakNEW.pdf?sequence=1>.
34. Галиш, В. В., Дикуну, І. М., Трус, І. М., Радовенчик, В. М., & Гомеля, М. Д. (2022). Вуглецеві сорбенти з пероцтового лігніну. Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (3), 69–76. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2022.265362>.
-

Kalivoshko O., Naumovska O., Berezhnyak E., Palamarchuk S., Pavlyuk S. (2024) ECOLOGICAL AND ECONOMIC JUSTIFICATION OF THE EFFICIENCY OF CARBON SORBENTS BASED ON SAWWOOD OF DIFFERENT TREES

BIOLOGICAL SYSTEMS: THEORY AND INNOVATION, 15(2): 28-40.

<https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Biologiya/article/view/49739>

[http://dx.doi.org/10.31548/biologiya15\(2\).2024.003](http://dx.doi.org/10.31548/biologiya15(2).2024.003)

Abstract. *The paper analyzes the effectiveness of the use of carbon sorbents based on sawdust of various tree species in decontamination of fuel and lubricants. The advantages of using the sorption method as an effective, widespread, simple and affordable measure for cleaning oil products are substantiated. Attention is focused on the quality of the sorbent material for the use of carbon sorbents from sawdust of various tree species. The structural, physico-chemical, absorption and sorption characteristics of carbon sorbents from vegetable raw materials are given and the effectiveness of their use for cleaning water and soil environments is shown. The ecological and economic advantages of cleaning the water and soil environment from oil products with carbon sorbents from plant raw materials, compared to other cleaning methods and means, are revealed. The purpose of the work was to analyze the effectiveness of carbon sorbents from sawdust of various tree species in the fight against oil pollution. Research methods are generally accepted.*

It was established that sawdust of pine and hornbeam has a large oil capacity and sorption capacity, which is 2.1-2.5 times higher, compared to carbon sorbents from sawdust of other species of trees, thanks to which it can be effectively used in decontamination of oil spills. Thermal treatment of sawdust activates its sorption capacity and oil capacity by 2.3-4.1 times, which indicates its ecological efficiency in the adsorption of fuel and lubricant materials. The optimal temperature of sawdust carbonization is within 250-300°C, and the duration is 9.0-10.5 minutes. We also note the economic efficiency of the introduction of carbon sorbents in 2.5-4.0 times, compared to the use of ordinary sawdust.

Key words: *petroleum products, carbon sorbents, sawdust, carbonization, destruction of polymer chains, oil capacity, energy costs.*

УМОВИ ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ВОДИ ПРИ БІОЛОГІЧНОМУ МЕТОДІ ОЧИЩЕННЯ

В.О. УШКАРЕНКО,

д.с.-г.н. професор, академік НААНУ

Херсонський державний аграрно-економічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7319-1731>

В.О. ЧАБАН,

д.с.-г.н., професор кафедри безпеки життєдіяльності

та професійно-прикладної фізичної підготовки

Херсонська державна морська академія

E-mail: shabanvictor49@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4353-4374>

К.В. КИРИЧЕНКО,

кандидат технічних наук, доцент кафедри безпеки життєдіяльності

та професійно-прикладної фізичної підготовки

Херсонська державна морська академія

E-mail: kvklecturer@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0974-6904>

А.О. СОКОЛ,

старший викладач кафедри безпеки життєдіяльності

та професійно-прикладної фізичної підготовки

Херсонська державна морська академія

E-mail: alene.sokol@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8179-453X>

Анотація. Питання очищення забруднених промислових вод, останніми роками стало одним з найактуальніших – глобальне потепління, аридизація суходільних екосистем і пов'язане з ним обміління природних водойм висувають на перший план проблему очищення промислових стоків для зворотного використання води у виробничому процесі. Розроблені впродовж багатьох років різноманітні методи і способи очищення таких вод дають широкий спектр технік і технологій щодо механічного, хімічного, фізико-хімічного та біологічного очищення, проте найбільш перспективним, на погляд авторів, є розробка комплексних підходів до проблеми, зокрема виявленню нових компонентів очисних технологій з використанням водних макрофітів в якості основного компонента. Слід зазначити, що питання використання водних макрофітів не є

новою, але вивчення особливостей нових рослин в процесі біоремедіації стічних вод є вкрай важливим.

Ключові слова: стічні води, біологічний метод очищення, *Eichhornia crassipes*, (ейхорнія товстоножкова, водяний гіацинт, водна чума).

Актуальність.

Проблема очищення стічних вод є проблемою комплексною, яка включає окрім суто наукових питань ще й фінансові проблеми, зокрема, вартість обладнання та високі витрати на його експлуатацію. Цілком закономірним є пошук технологій, які при незначних фінансових затратах дозволять очистити водні ресурси. Такими технологіями є біологічні технології з використанням вищої водної рослинності – так звані біоплато (Mitchenko T., 1998). За таких технологій недостатньо очищені води, які мають підвищений вміст нітратів, важких металів, нафтових сполук та інших шкідливих речовин, досить легко можуть бути очищені до прийнятних показників забруднення. Тому подальше вдосконалення і розробка нових методів і технологій біологічного очищення не викликає запитань. Зокрема доволі перспективними є методи очищення скидних вод за допомогою ейхорнії товстоножкової *Eichhornia crassipes* (Mart.) (Radovenchik V.M., 2003).

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Більшість екологів сьогодні схильні до думки, що Дніпро майже вичерпав свої можливості до самоочищення, у зв'язку з чим його стан можна назвати критичним. І це про річку, з якої п'ють воду майже третина населення України. Не краща ситуація з

малими річками, у т.ч. і з притоками Дніпра. Особливе занепокоєння викликає стан річок, які протікають в промислових регіонах і води яких використовуються у виробничих процесах (Tavartkiladze I., 1999; Chaban V.O. et al., 2018).

Такою річкою є річка Інгулець, води якої забруднені високомінералізованими промисловими водами підприємств міста Кривий Ріг. Кожного року для створення безпечних умов відпрацювання рудних покладів відкачується до 20 млн. м³ шахтних і 16-18 млн. м³ кар'єрних вод. Ці води використовуються для поповнення зворотних систем водопостачання гірничо-збагачувальних підприємств, а їх надлишки збираються у накопичувачі балки Свистунова та в хвостосховищі Північного гірничо-збагачувального комбінату. Взагалі в накопичувачах та хвостосховищах акумулюється 40-50 млн. м³ високомінералізованих вод, мінералізація яких становить 5-40 г/дм³ (Chaban V.O., 2014).

Проектні режими роботи і правила експлуатації накопичувачів та хвостосховищ порушуються внаслідок їх переповнення надлишками шахтних та кар'єрних вод. Це негативно впливає на технічний стан гідротехнічних споруд, значно підвищує ризик негативних наслідків та небезпечних змін довкілля. Такі обставини викликають необхідність здійснення періодичних дозованих скидів високомінералізованих вод у річки Саксагань та Інгулець (Chaban

V.O., 2014). Згідно з регламентом, що затверджується Кабінетом Міністрів України, щорічно скидається 10-20 млн. м³ високомінералізованих вод. Внаслідок інтенсивної фільтрації солоних та забруднених вод з накопичувачів та хвостосховищ значно забруднюються підземні води. Таким чином, водні ресурси річки Інгулець зазнають значних негативних змін екологічного стану (Radovenchuk V., 2000; Chaika V.E., 2002).

З метою недопущення виникнення низки надзвичайних ситуацій і техногенних катастроф пов'язаних з відкачкою, використанням та тимчасовою акумуляцією значної кількості підземних вод, виникає необхідність у щорічному впровадженні заходів зі скиду надлишків зворотних вод в р. Інгулець. Нажаль, іншого, більш безпечного способу поводження з надлишками зворотних (шахтних вод), поки що не існує.

Суттєву долю в забрудненні скидних вод складають важкі метали які відносять до числа найбільш небезпечних для природного середовища і людини хімічних забруднювальних речовин. Відомо, що мідь, свинець, кадмій, цинк є небезпечними токсичними металами. Надлишок міді в організмі людини та інших теплокровних тварин призводить до змін у тканинах нирок, печінки і мозку (Konontsev S.V., 2006; Chaban V.O., 2012). Іони свинцю та його сполуки гальмують синтез порфірину, викликають порушення функцій центральної і периферичної нервової системи. Розчинні сполуки кадмію денатурують білки, що містяться в стінках травного каналу. Надходячи до крові, іони кадмію з'єднуються з сульфгідрильними групами ферментів, порушуючи їх функції. Токсичність цинку

не така велика, і він не акумулюється, а виводиться організмом, але прийом всередину сполук цинку може викликати гостре отруєння. Основним джерелом надходження до організму іонів міді, свинцю, кадмію та цинку є вода, водночас вміст важких металів у стічних водах в останні роки зростає (Chaban V.O., 2014).

Існують різні способи очищення вод, зокрема, і від важких металів: механічні, хімічні, фізико-хімічні та біологічні, але тільки комплексне використання всіх методів дозволить зробити цей процес не тільки ефективним, але й більш економічним і екологічним. Для біоремедіації очищення і доочищення стічних вод нині широко використовуються водні макрофіти. Зазначені рослини ефективно очищають водойми, занесені в список мертвих або знаходяться на межі вимирання, малі річки, стоки, відстійники промислового, господарсько-побутового та іншого походження; помітно знижують у стоках вміст більшості елементів і вже за тиждень повністю усувають неприємний запах (Leonov V.E. et al., 2008; Sozansky S., 1997). Ейхорнія, як і більшість вищих водних рослин, здатна в значних кількостях накопичувати в собі важкі метали (ТМ) (свинець, ртуть, мідь, кадмій, нікель, кобальт, олово, марганець, залізо, цинк, хром), а також радіонукліди і таким чином вилучати дані метали з води, роблячи її придатною для використання (Leonov V.E. et al., 2008; Leonov V. E. et al., 2009).

Мета дослідження – вивчити здатність рослин водяного гіацинта до затримання ряду важких металів (мідь, свинець, кадмій і цинк) в лабораторних умовах.

Матеріали і методи дослідження

Впродовж 2014-2020 рр. були проведені дослідження з вивчення можливості очищення стоків води з високим вмістом солей важких металів та фосфатів, що перевищували ГДК, які надходять від промислових об'єктів в річки Інгулець та Дніпро, за допомогою вищої водної рослинності, зокрема рогозу широколистого (*Typha latifolia* L., 1753), очерету звичайного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., 1841) та гіацинту водяного, або ейхорнії товстоножкової (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms).

Ейхорнія товстоножкова – типовий представник вищих рослин, добре пристосовується до умов та здатна інтенсивно вилучати органічні та неорганічні сполуки з водних розчинів. Водночас, концентруючись у великих кількостях, вона може ефективно мінералізувати детрит та контролювати чисельність мікроорганізмів. Перспективність культивування даного виду в очисних спорудах пояснюється також тим, що в процесі подібних методів очищення стічних вод утворюється надлишкова біомаса, яка нерідко є високопротеїновим продуктом та може слугувати додатковим джерелом кормового білка (Chelyadyn L.I., 2005; Chaban V.O., 2012). Застосування стічних вод як поживного середовища для отримання білкової біомаси може бути економічно виправданим, тому що, з одного боку, допомагає вирішенню проблеми боротьби із забрудненням довкілля, а з іншого, – сприяє розширенню виробництва кормових ресурсів. Отже, представники роду Ейхорнія можуть ефективно використовуватись у процесах біологічного очищення стічних

вод, забруднених органічними та неорганічними сполуками, що здатні легко окиснюватись.

Для вивчення якості очищення води від важких металів рослинами водяного гіацинта була створена модельна штучна екосистема. В якості поживного субстрату для рослин використовувалася тала снігова вода, в яку додатково вводили солі важких металів до розрахункового рівня при збереженні нейтрального значення кислотності. Висадка рослин проводилася з розрахунку: одна доросла рослина на літр води, що очищається, покриття водної поверхні становило 75%. Освітлення модельних систем проводилося лампами розжарювання (3 5QQ Лк) при 12-годинному світловому дні. Температура води в експериментах +20...24°C, навколишнього повітря +24...26°C. (Leonov V.E. et al., 2008; Leonov V. E. et al., 2009). В якості контролю було використано варіант без рослин зі сніговою водою з додаванням солей важких металів за тих самих умов, що і досліджувані варіанти. У міру споживання води гіацинтом і випаровування з поверхні в дослідних і контрольних посудинах проводився долив дистильованої води до початкового рівня.

Найбільш ефективними, простими і дешевими у виконанні методами є ботанічні (біологічні) методи, основу яких становить використання водних рослин, зокрема, ейхорнії (водного гіацинта). Натренована до окремого токсиканту рослина приймає стійкий характер по відношенню до даного токсиканту й у наступних поколіннях рослини (не менше 5-ї вегетації). Тренування рослини за конкретним стоком дозволяє пристосовувати стійкість наступних поколінь рослини до даного стоку. Показано, що ейхорнія

1. Основні параметри *E. crassipes* в умовах експерименту

Параметри рослин	min	max
Висота надводної частини, см	27±7	34±5
Діаметр надводної частини, см	37±8	45±5
Довжина підводної частини, см	35±5	43±3
Площа листової пластинки, см ²	27±3	43±7
Швидкість розмноження, шт/міс	9±3	13±3
Маса рослини, г	190±30	230±30
Продуктивність біомаси, т/га	900±300	1250±400

очищає водойми від шкідливих бактерій, органічних забруднень, нітратів, фосфатів, сульфідів, фенолів, нафтопродуктів, аміаку та інших токсикантів. Ефективність очищення залежить від кількості рослин на одиницю площі водної поверхні і температурного режиму. Попереднє тренування ейхорнії в процесі її вегетації можна проводити на стоці, підлягає очищенню розбавивши його чистою водою у співвідношенні 1: 4,1: 2,1: 1. Починають тренування з використанням найбільш розведеного стоку (1: 4).

Результати дослідження та їх обговорення.

У даній роботі наведені результати вивчення різноманітних схем очищення водних ресурсів забруднених різними токсичними речовинами; водночас, враховувалася кількість різних видів стічних вод, їхні витрати; можливості та економічна доцільність вилучення домішок зі стічних вод; вимоги до якості очищеної води від нафтових сполук, солей важких металів, які потрапили від несанкціонованих викидів промислових підприємств.

Рослини ейхорнії товстоножкової успішно адаптувалися до умов Південного регіону, свідченням чому є швидке збільшення їх фітомаси - за

місяць утворювалося до 8–15 дочірніх рослин. Найбільш активна вегетація рослин відбувалася у проточному режимі, де у водойму постійно надходила вода з підвищеною концентрацією інгредієнтів, серед яких було багато речовин органічного походження, які *E. crassipes* засвоює найкраще.

У лабораторних установках періодичного очищення цих речовин дещо менше, однак більше солей калію, кальцію, магнію та інших елементів. В експериментах рослини зростали в умовах проточного періодичного режиму. В цих умовах рослини набували від темно-зеленого до яскраво-зеленого кольору, діаметр рослин сягав 35 см, приріст рослин на одиницю розсади – 8–10 (табл. 1).

Середньомісячний приріст фітомаси рослин *E. crassipes* становить 39,2 г. Загальний приріст однієї рослини за 6 місяців складає 186–206 г. Максимальне значення місячного приросту становило 58 г у 6-місячних рослин та мінімальне – 27 г у 1-місячних рослин.

Склад зеленої маси *E. crassipes*, що використовувалася для очищення стоків з річки Інгулець характеризується досить високим вмістом вологи (94–88,9 %). Вміст протеїнів – 27,89–10,60 % і в перерахунку складає до 10–30 кг/т зеленої маси,

азоту – до 20–35 кг/т, фосфору – до 17 кг/т. Зелена маса характеризується високим вмістом каротину – до 40 кг/т. Хімічний склад *E. crassipes*, що використовувалася у процесах очищення СВ (за умови, що у стоках не було важких металів, радіонуклідів) відповідає ДСТУ 4685:2006 «Корма трав'яні штучно висушені. Технічні умови».

Вивчення залежності очищення модельних розчинів від кількості біомаси *Ейхорнії товстоножкової* засвідчило, що в період вегетації, нарощуючи зелену масу, *E. crassipes* видаляє з розчину численні інгредієнти, поліпшуючи, тим самим, якість стічної води. Для виявлення можливості застосування очищення СВ процес проводили у періодичному режимі впродовж 120 год за різної концентрації рослин *E. crassipes* (від 6 до 12 г/л за сухою речовиною) у воді. Як показали результати досліджень, за концентрації рослин 12 г/л, порівняно з початковою 6 г/л та 8 г/л було досягнуто більшого ступеня очищення стоків від ЗР – на 25,7 та 7,4 %, амонійного азоту на – 47,5 та 13,7 %, фосфатів – на 46,1 та 15,4 %, сульфатів – на 16,2 та 9 %, хлоридів – на 5,6 та 1,8 %, заліза – на 2,8 та 0,5 % відповідно. Вміст органічних забруднювачів в очищеній воді за концентрації рослин 12 г/л зменшився ще на 17,7 % за ХСК і на 18,3 % за БСК.

Результати проведених досліджень засвідчують підвищення ефективності очищення стоків і води водоєм *ейхорнією*, зокрема, можливість збільшення допустимого рівня вмісту токсикантів у воді, що очищується, наприклад, по іонах амонію більше, ніж удвічі, і розширення діапазону температури стоків, що очищаються, нижче 15°C (до 5°C) і вище 35°C (до 45°C). Процес

очищення води спрощується завдяки посадці нових рослин замість зів'ялих. За прототип беруть приготований стік води, що містить нафтопродукти в кількості 15 мг/дм³ (допустимо до 25 мг/дм³), іони амонію 100 мг/дм³ (допустимо до 60 мг/дм³), фосфати – 5 мг/дм³ (допустимо до 18 мг/дм³) (Leonov V.E. et al., 2008). Після 7 діб очищення рослини були яскравого, темно-зеленого кольору, продовжували вегетувати. Залишкова концентрація домішок у воді становила для нафтопродуктів – 2,0 мг/дм³, іонів амонію – 13 мг/дм³, фосфати були відсутні. За запропонованим способом в умовах при збільшенні початкового вмісту іонів амонію у воді, що очищується, до 150 мг/дм³ через 7 діб рослини добре вегетували (за 30 діб приріст склав 8...10 штук на одну рослину), залишковий вміст у воді нафтопродуктів склав 2,2 мг/дм³, іонів амонію – 21 мг/дм³. На другій стадії тренування вводять іони Cu^{++} в кількості 5 мг/дм³. Після 7 діб очищення води нафтопродуктів, іонів амонію і фосфатів виявлено не було. Рослини добре вегетували, мали рівномірний яскравий зелений колір тренування *E. crassipes* проводять на розбавленому стоці, що підлягає очищенню.

У промислово розвинутих країнах методи біологічного очищення вод вже допомогли вирішити глобальні проблеми по збереженню природних запасів без застосування різних хімічних речовин для доочищення та знезараження вод водночас (Chaban V.O., 2014). Тому нами було поставлено завдання по збереженню *E. crassipes* під час зниження температурного режиму води при досягненні температури води + 10...5°C у період за несприятливих температур для її росту, рослини вилучають з

водойми для очищення стоків і зберігають у додатковій водоймі в умовах температур $+10...5^{\circ}\text{C}$ з підведенням освітлення, яке може бути від люмінесцентних ламп і (або) до світлодіодних ламп у межах від $150\text{--}250\text{ Вт/м}^2$, а при настанні зовнішньої температури води $+10...5^{\circ}\text{C}$ рослини висаджують у водойму для очищення стоків без тренування на токсичні речовини в ній.

Найбільш ефективні в боротьбі із забрудненнями водойм рослини, що швидко розвиваються кореневою і вегетативною масою, зокрема, підгрупа рослин, що плавають на поверхні. Їх хорнія є представником цієї групи. За багатьма порівняльними даними вегетаційна продуктивність *E. crassipes* вища, ніж у інших рослин, практично всі водні рослини істотно поступаються в цьому *E. crassipes*. Інтенсивність розмноження і зростання рослин збільшують потребу в живленні для них, і, отже, підвищується споживання рослинами різних домішок з водних середовищ. Для процесу вегетації *E. crassipes*, отже, для очищення вод для рослин потрібні умови, сприятливі як для адаптації рослин, так і для їх життєдіяльності протягом усього періоду культивування. Значний вплив на повноту і ступінь доочищення має також і величина контакту рослин з водою. З цієї причини культивування *E. crassipes* для біодеструкції забруднювальних речовин оптимально проводити при максимальному контакті рослин в обсягах гідроботанічних зон із забезпеченням оптимальних кількостей рослин.

Основні вимоги, які необхідно забезпечити:

- температура води не менше 19°C , з можливим, але не бажаним короткостроковим зниженням до $+16^{\circ}\text{C}$,

найкраща температура від 22°C ;

- температура повітря в межах від $+18^{\circ}\text{C}$; низькі температури викликають тимчасове завмирання мікроорганізмів, цим і пояснюється їх деяка (до 1 доби) стійкість до короткострокового зниження температури, для більшості бактерій, які беруть участь у процесі перероблення, оптимальною є температура $22\text{--}27^{\circ}\text{C}$, взимку можливо трохи нижча;

- верхня межа температур $+40^{\circ}\text{C}$; температура вище $+40^{\circ}\text{C}$ може викликати незворотні зміни в колоїдному стані плазми (зміна структури ферментів і порушення біоактивності, тобто початок температурного інтервалу, можливості згортання крохмалю та білків);

- вміст поживних речовин для рослин в об'ємі вод;

- достатній ступінь освітленості (водний гіацинт дуже світлолюбний), при нестачі природнього освітлення застосовують спеціальні лампи, де достатній рівень освітленості по спектру і інтенсивності може бути забезпечений застосуванням, наприклад, ламп переважно синьої і червоної ділянок спектра і потужністю не менше 150 Вт/м^2 , світильників відповідних модифікацій для теплиць, наприклад, ЖСП36-600-002У5.

Зазначений технічний результат досягається способом гідроботанічного очищення забруднених водних середовищ у кліматичних умовах середніх широт, що включає застосування *E. crassipes* в якості рослини, що плаває в живильному розчині і завантаженням гідроботанічної зони, використання в якості поживного розчину гідроботанічних зон стічних або господарсько-побутових, або промислових вод, вегетацію *E. crassipes* в гідроботанічній зоні при

2. Результати аналізу показників забруднювальних речовин у воді залежно від застосування різних варіантів досліджень під кінець вегетації рослин (середнє за 2012–2018 рр.)

Контрольні показники води	Варіанти досліджень	
	Контроль (водойма без рослин)	Ейхорнія
ХСК, мгО ₂ /л	17,3	7,0
БСК, мгО ₂ /л	11,2	5,4
Жорсткість, мг-екв./л	2,4	2,0
Хлориди, мг/л	22,6	12,5
Сульфати, мг/л	57,0	39,1
Фосфати, мг/л	1,0	0,3
Нітрати, мг/л	3,9	0,25
Амонійний азот, мг/л	5,0	0,96
Завислі частинки мг/л	180,0	39,0
Сухий залишок, мг/л	380,5	10,4

температурі навколишнього повітря і води не менше 19°C з природним або штучним освітленням.

Натурне дослідження у водоймах передбачало порівняння вмісту токсикантів у контрольній ділянці (без рослин) з дослідною (з рослинами *E. crassipes*). Проводили аналіз води та в різні періоди розвитку рослин відбирали зразки на біохімічний аналіз.

Дослідження виявило пряму залежність концентрації у воді забруднювальних речовин та показників якості води з наявністю у водоймі рослин водяного гіacinта – хлориди у варіанті – з рослинами очерет та ейхорнія знижувалися відповідно до варіанту досліджень (табл. 2).

Висновки і перспективи.

1. Уперше в умовах півдня України були проведені наукові дослідження з очищення водної поверхні, яка мала у власному складі надлишкову кількість хлоридів, сульфатів, фосфатів, нітратів, нафтопродуктів, фено-

лів за допомогою очерету, рогузу, *E. crassipes*.

2. Як показали результати досліджень, найкращим очисником води від сторонніх домішок виявилась ейхорнія товстоножкова (водяний гіacinт) *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms).

3. Встановлена пряма залежність концентрації полютантів та показників якості води від наявності рослин. Найбільший ефект спостерігався за спільного використання *E. crassipes* та очерета.

4. Показано, що *E. crassipes* добре розвивається у забруднених водах. Загальний приріст однієї рослини за 6 місяців складає 186–206 г, що дає можливість розглядати цей вид як можливе додаткове джерело кормового протеїну для сільськогосподарських тварин.

References

1. Konontsev S.V. (2006). Technology of biological wastewater treatment of dairies: Theoretical issues (Dissertation. Ph.D,

- National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine).
2. Leonov V.E., Sherstyuk V.G. & Ben A.P. (2008). Wastewater treatment technology to protect the hydrosphere. Monograph edited by Doctor of Technical Sciences, Professor V.E. Leonova, 151.
 3. Leonov V.E., Chaban V.O. (2009). Influence of synthesized substances and salts of heavy metals on human life. Modern information technologies in transport. Materials of the International Scientific and Practical Conference. Volume 5 –, 2009.
 4. Mitchenko T. (1998). An effective method of water purification. Food and processing industry, 10, 24–25.
 5. Radovenchik V.M. Use of iron-containing sorbents for removal of chromates from wastewater. *Eco-technologies and resource conservation*. 2003. No. 2. P. 61–64.
 6. Radovenchik V. (2000). Wastewater treatment of waste paper recycling enterprises by magnetic sorption method. *Eco-technologies and resource conservation*, 4, 28–31.
 7. Sozansky S. (1997). Two-stage wastewater treatment. Food and processing industry, 6, 22–23.
 8. Tavartkiladze I. (1999). Economical wastewater treatment. Food and processing industry, 9, 26–27.
 9. Chaban V.O. (2014). Purification of the water environment with the help of Eichhornia centipedes. *Scientific journal*, 88, 314–319.
 10. Chaban V.O. (2012). Factors of pollution of the World Ocean and ways to reduce ecological disaster. *Scientific works: a scientific and methodical journal. "Ecology" series*, 127, 194, 206, 23–25.
 11. Chaban V.O. (2012). Ballast water treatment rules. Contemporary problems of hydrobiology, Perspectives, ways and methods of solutions, 368–371.
 12. Chaban V.O. (2014). Assessment of pollution of water bodies by sea transport and a biological method of cleaning the aquatic environment using Eichhornia spp. *Scientific journal Visnyk of Agrarian Science of the Black Sea Region*. Issue 2 (78), 112–114.
 13. Chaban V.O. (2014). New prospects for the biological treatment of sewage industrial waste with the help of Eichhornia centipede. *Scientific works: a scientific and methodical journal. "Ecology" series*, 220, 232, 89–91.
 14. Chaban V.O., Krugliy D.G. & Kamaev O.Yu. (2015). Energy-saving wastewater treatment technology. *Scientific works: a scientific and methodical journal. "Ecology" series*, 244, 256, 86–90.
 15. Chaban V.O., Bezukrovnyy V.A. & Kamaev O.Yu. (2018). The influence of the human factor on the environment. Modern energy installations on transport, technologies and equipment for their maintenance. Collection of materials of the 9th International Scientific and Practical Conference. Kherison State Maritime Academy, 196–199.
 16. Chaika V. E. (2002). *Ecology: Study guide*. Vinnytsia: Book-Vega.
 17. Chelyadyn L.I. (2005). Wastewater treatment of pulp and paper production and sludge processing. Chemical industry of Ukraine, 6, 51–32

Ushkarenko V., Chaban V., Kyrychenko K., Sokol A. (2024).

CONDITIONS FOR THE FORMATION OF WATER QUALITY WITH THE BIOLOGICAL CLEANING METHOD

BIOLOGICAL SYSTEMS: THEORY AND INNOVATION, 15(2): 41–50.

<https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Biologiya/article/view/49741>

[https://dx.doi.org/10.31548/biologiya15\(2\).2024.004](https://dx.doi.org/10.31548/biologiya15(2).2024.004)

Abstract. *In recent years, the issue of cleaning polluted industrial waters has become one of the most urgent - global warming, aridization of terrestrial ecosystems and the associated shallowing of natural reservoirs bring to the fore the problem of cleaning industrial effluents for the reverse use of water in the production process. Various methods and methods of cleaning such waters developed over many years provide a wide range of techniques and technologies for mechanical, chemical, physico-chemical and biological cleaning, but the most promising, in the opinion of the authors, is the development of complex approaches to the problem, in particular, the identification of new components of cleaning technologies with the use of aquatic macrophytes as the main component. It should be noted that the issue of using aquatic macrophytes is not new, but studying the characteristics of new plants in the process of bioremediation of wastewater is extremely important.*

Key words: *wastewater, biological treatment method, Eichhornia crassipes, (Eichhornia crassipes, water hyacinth, water plague).*

ЗАХИСТ І КАРАНТИН РОСЛИН

УДК 582.675.1:581.41

[http://dx.doi.org/10.31548/biologiya15\(2\).2024.005](http://dx.doi.org/10.31548/biologiya15(2).2024.005)

<https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Biologiya/article/view/49733>

БИОМОРФОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ *HELLEBORUS PURPURASCENS* WALDST. ET KIT.

І.В. БОЙКО,

*кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник відділу
трав'янистих рослин*

Національний дендрологічний парк «Софіївка» НАН України

E-mail: irinaivankovska@gmail.com

ORCID 0000-0002-4643-6315

І.П. ДІДЕНКО,

кандидат біологічних наук, завідувач відділу трав'янистих рослин

Національний дендрологічний парк «Софіївка» НАН України

E-mail: fritillaria2007@gmail.com

ORCID 0000-0002-4198-3432

О.Г. УСОЛЬЦЕВА,

*кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник відділу
трав'янистих рослин*

Національний дендрологічний парк «Софіївка» НАН України

E-mail: usoltseva.og@gmail.com

ORCID 0000-0001-9253-885X

В.О. ПОНОМАРЕНКО,

*кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник відділу
дендрології та паркобудівництва*

Національний дендрологічний парк «Софіївка» НАН України

E-mail: valentina1pohomarenko@gmail.com

ORCID 0000-0002-2872-6693

Л.Л. ДЖУС,

молодший науковий співробітник відділу трав'янистих рослин

Національний дендрологічний парк «Софіївка» НАН України

E-mail: lyudmiladzhus88@gmail.com

ORCID 0000-0003-3586-7432

Анотація. *Helleborus purpurascens* Waldst. et Kit. – цінна лікарська та декоративна рослина. Біоморфологічні дослідження, як складова всебічного вивчення виду є основою для розробки комплексу заходів задля збереження природних популяцій і для подальшого широкого прикладного застосування господарсько-цінних ознак рослин при їх культивуванні.

Досліджено онтоморфогенез *H. purpurascens* в умовах культури у Національному дендрологічному парку «Софіївка» НАН України. З'ясовано, що на всіх етапах віргінільного періоду онтогенезу відбувається моноподіальне наростання осьового пагону за домінування апікальної меристеми. Травматична елімінація апікальної меристеми на всіх етапах віргінільного періоду призводить до заміщення осьового пагону бічним, але не сприяє галуженню. При типовому ході онтогенезу генеративний період настає на четвертому році життя особин, після чого відбувається перехід до симподіальної моделі пагоноутворення. Монокарпічні пагони розвиваються за типом дициклічних, розвиток за типом неповних, оліго- чи поліциклічних є проявами поліваріантності. Описано особливості структурно-функціональної організації монокарпічних пагонів, охарактеризовано їх морфо-структурні зони. З'ясовано, що: нижня зона гальмування (НЗГ) представлена 2-3 метамерами з короткими міжвузлями та катафілами з дормінтивними бруньками в їх пазухах; зона поновлення (ЗП) – одним (2) метамером (метамерами) з коротким міжвузлем та катафілом з брунькою поновлення в його пазусі; середня зона гальмування (СЗГ) – одним (2-3) метамером з фотофільним типовим листком (листками) серединної формації; зона збагачення (ЗЗ) – суцвіттям цимоїдного типу.

За характером розташування окремих структурних елементів пагонової та кореневої сфери в межах дорослої особини *H. purpurascens* належить до моноцентричних, вегетативно нерухомих біоморф, руйнування осьової частини основного пагона у яких не призводить до природного вегетативного розмноження та збільшення кількості особин.

Ключові слова: онтоморфогенез, монокарпічні пагони, галуження, вікові стани.

Вступ.

Helleborus purpurascens Waldst. et Kit. (чемерник червонуватий) – третинний релікт, раритетний вид, в Україні розміщений на північно-східній межі свого ареалу та приурочений до Західного регіону (Melnyk, 2015). Рослини здавна відомі завдяки своїм лікарським властивостям, є джерелом цінної сировини для фармацевтичної промисловості. Тривалий період цвітіння (близько трьох місяців) та дуже ранній його початок

(з кінця лютого), наявність досить привабливих квіток вкупі з великими шкірястими темно-зеленими розсіченими листками, стійкість до уражень хворобами та шкідниками – властивості, що визначають цінність та перспективність виду у декоративному садівництві. Всебічні дослідження *H. purpurascens*, у тому числі онтогенетичні та біоморфологічні, необхідні як для розробки комплексу заходів задля збереження природних популяцій так і подальшого широкого прикладного застосування госпо-

дарсько-цінних ознак рослин при їх культивуванні.

Більшість дослідників виду в Україні займалися висвітленням питань пов'язаних із вивченням структури природних популяцій (Korotchenko, 2011;), станом їх збереження (Melnyk, 2015), дослідженням насінневої продуктивності (Tokariuk 2010), особливостей онтогенезу (Boiko et al., 2022). Вагомий вклад у вивчення *H. purpurascens* у межах родини *Ranunculaceae* Juss. належить Світлані Зиман. Велика кількість робіт вітчизняних та зарубіжних авторів присвячена фітохімічним та фармакологічним дослідженням (Grigore et al., 2021; Pilut et al., 2022; Segneanu et al., 2023), уточненню таксономії (Long et al., 2023). Але відомостей про *H. purpurascens* з позиції структурної фітоморфології на сьогодні все ще недостатньо.

Тому, з метою доповнення біоморфологічної характеристики *H. purpurascens*, було досліджено онтоморфогенез пагонів, охарактеризовано їх структурно-функціональні зони, з'ясовано особливості становлення біоморфи в процесі онтогенезу в умовах Правобережного Лісостепу України.

Матеріали та методика досліджень

Дослідження здійснювались на колекційній та «Тіньовій» ділянках Національного дендрологічного парку «Софіївка» упродовж 2017-2023 рр. У роботі використано насіння місцевої репродукції, матеріалом для досліджень стали різновікові особини *H. purpurascens*. Складовими біоморфологічного аналізу були: характеристика структурно-функціональних

зон монокарпічних пагонів, описана згідно уявлень (Troll, 1964; Prat цит. за Serebryakova, 1971) з доповненнями (Shherbakova and Rahmetov 2014) та (Berko, 2013) відповідно, моделі пагоноутворення за (Savihykh, et al., 2017), тип біоморфи – (Smirnova et al., 2002).

Результати дослідження та їх обговорення.

Проростання насіння надземне. Проростки *H. purpurascens* безепікотильні, гіпокотиль завдовжки 2-3 см. Пластинки сім'ядоль еліптично-продовгуватої форми з дещо звуженою основою та округлою верхівкою. Зародковий корінець ниткоподібний, починає галузитись вже на етапі проростків, але досягнувши довжини у 8-10 см, припиняє ріст. Втрапивши своє первинне значення, він зберігається у системі коренів ще впродовж 5-7 послідовних років. Перший справжній листок має тричі роздільну листову пластинку з сегментами витягнуто-ромбічної форми та крупнозубчастим краєм. Відмираючи, він не опадає, а тримається на особині до наступної весни, додатково захищаючи брунечку від дії низьких температур взимку. Ємність термінальної бруньки – 3-4 метамери (2 лускоподібних листки низової формації (катафіли) та зачатки 1-2 типових листків серединної формації).

Навесні наступного року, в іматурному віковому стані, пагін з укороченими міжвузлями продовжує моноподіальне наростання (рис 1.).

Катафіли відмирають впродовж 6-8 тижнів, після чого, стають помітними 1-2 аксілярні бруньки, закладені у їх пазухах. Вони недиференційовані або малометамерні слабо диференційовані, дормітив-



Рис.1. Моноподіальне наростання пагона *H. purpurascens* (іматурний віковий стан)



Рис. 2. Вимушено гемосимподіальне наростання пагону *H. purpurascens* (перевершинення) в іматурному віковому стані

ного типу. Травматична елімінація апікальної меристеми призводить до перевершення за рахунок пробудження однієї з бруньок та розгортанню бічного пагону, але не сприяє галузженню (рис. 2).

Асимілюючий листок зазвичай один, іноді два (другий менший за розміром). Черешок з фіолетовими штрихами у базальній частині, пластинка тричі-роздільна. В гіпокотильній зоні утворюються шнуроподібні додаткові корені у числі 2-4. Ємність термінальної бруньки – 3-5 метамерів (2-3 катафіли та 1-2 зачатки асимілюючих листків).

На третьому році життя особин, у віргінільному віковому стані, пагін з укороченими міжвузлями продовжує моноподіальне наростання (рис. 3).

Після його розгортання та відмирання катафілів, помітно 2-3 брунь-

ки, закладені в їх пазухах. Зазвичай вони також переходять у стан спокою або одна з них, розгортаючись, заміщує головний пагін при пошкодженні верхівкової меристеми (рис. 4).

При типовому ході онтогенезу у віргінільному періоді асимілюючі листки серединної формації у числі 1 (2-3), з пальчатороздільними пластинками, додатково перисторозсічені на сегменти 2-го порядку. Додаткові корені, у числі 9-12, закладаються в акропетальному напрямку. На початку літа відбувається генеративна диференціація апікальної меристеми термінальної бруньки та починається закладання генеративних структур.

Цвітіння та плодоношення, яке відбувається на четвертому році життя особин, знаменує завершення моноподіального наростання осового пагону та перехід до симподіальної



Рис. 3. Моноподіальне наростання пагона *H. purpurascens* (віргінільний віковий стан)



Рис. 4. Перевершинення осевого пагона *H. purpurascens*, внаслідок елімінації меристеми термінальної бруньки у віргінільному віковому стані

моделі пагоноутворення з утворенням латеральних модулів (монокарпічних пагонів) другого та послідовних порядків. Одним із проявів поліваріантності онтоморфогенезу є подальше закладання вегетативних структур впродовж ще деякого часу (іноді багатьох років), аж поки умови для початку цвітіння не стануть більш сприятливими. На середньовікових генеративних особинах за один вегетаційний сезон розгортається 6-7 квітконосних та 9-12 вегетативних пагонів. Особливістю сезонного розвитку є ранньовесняне цвітіння, яке дещо передуює розгортанню асимілюючих листків (розвиток за проантним типом).

Основною структурною одиницею пагонових систем більшості багаторічних трав'яних рослин є монокарпічні пагони, в яких закономірно поєднуються певні структурно-функ-

ціональні зони. У відповідності до концепції морфо-структурного зонування пагонів Prat та послідовників, монокарпічні пагони *H. purpurascens* можна розділити на три зони, що відрізняються за будовою, функціональним призначенням та тривалістю існування. Флоральні частини представлені спеціалізованими квітконосними пагонами, які по завершенню цвітіння та дисемінації повністю відмирають, залишивши характерні рубці. Префлоральні – укороченими метамерами з асимілюючими листками серединної формації, час існування яких зазвичай співпадає з тривалістю вегетаційного сезону та завершується з настанням несприятливих умов. Базальні частини монокарпічних пагонів після завершення малого циклу онтогенезу разом з розташованими на них додатковими коренями та дор-



Рис. 5. Система пагонів середньовікової генеративної особини *H. purpurascens* (корені видалені) а – вегетативні пагони; б – генеративні пагони; в – дормітивні бруньки; г – резиди у складі симподію

мінтивними бруньками продовжують існування у вигляді резидів у складі симподію (рис. 5).

Такий, утворений резидними (персистентними) пагонами та іншими невідмираючими взимку органами – зимуючими бруньками (геморезидами) та листками або залишками листків (фрондорезидами) комплекс, утворює резидний пагін або корезид.

Проаналізувавши структуру пагонів *H. purpurascens* за формулою, запропонованою Troll, доповнену та доопрацьовану іншими авторами, з'ясували що: нижня зона гальмування (НЗГ) представлена 2-3 метамерами з короткими міжвузлями і катафілами в пазухах яких знаходиться дормітивні бруньки; зона поновлення (ЗП) – одним (2) метамером з катафілом та брунькою (бруньками) поновлення; середня зона гальмування (СЗГ) – одним (2-3) метамером з фотофілімним типовим листком (листками) середньої формації; зона збагачення (ЗЗ)

представлена суцвіт'ям цимойдного типу (рис. 6).

Бруньки НЗГ перебувають у стані спокою тривалий час, часто аж до повного відмирання ділянки пагону, на якій вони розташовані. Діяльність меристеми таких бруньок зводиться до продукування 1-2 лускоподібних листків за рік, доки не припиняється повністю. Іноді ростові та органотворчі процеси посилюються, бруньки пробуджуються. До початку формування генеративних структур у розвитку таких пагонів зазвичай відбувається

зміна серій укорочених річних вегетативних приростів. Вбудовуючись у структуру пагонової системи, вони додатково сприяють її галуженню.

При типовому ході морфогенезу, монокарпічні пагони *H. purpurascens* розвиваються за дициклічним типом, послідовно проходячи такі фази: вегетативної бруньки, розеткового асимілюючого пагону, генеративної бруньки, спеціалізованого квітконосного пагону. По завершенню дисемінації, базальні ділянки ще довго, іноді десятки років, продовжують своє існування у фазі вторинної діяльності. Розвиток пагонів за неповним, оліго- чи поліциклічним типом є одним із проявів поліваріантності.

За класифікацією біоморф по характеру розташування окремих структурних елементів пагонової та кореневої сфери в межах дорослої особини визначаємо *H. purpurascens* як такий, що належить до моноцентричних, вегетативно нерухомих

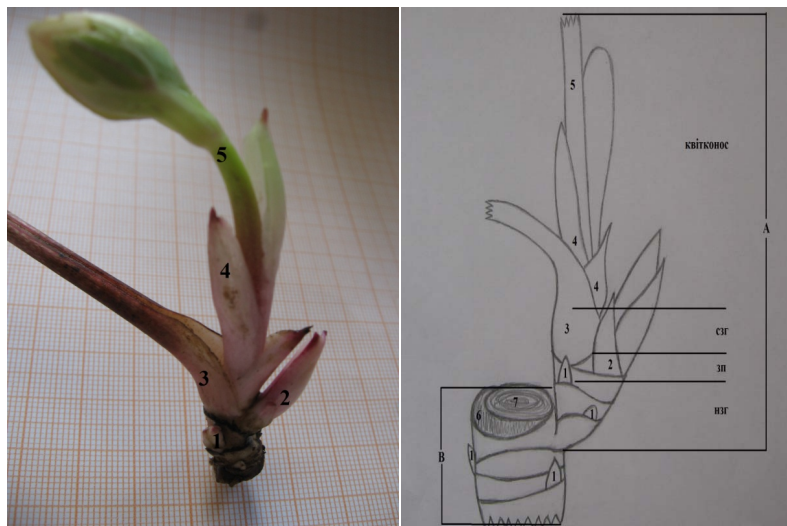


Рис. 6. Структурно-функціональні зони монокарпічного пагону *H. purpurascens*: 1 – сплячка брунька, 2 – брунька поновлення, 3 – минуло-річний листок, 4 – катафіли, 5 – квітконос (суцвіття та верхівкова квітка), 6 – рубець, що залишився від фотофільного листка, 7 – рубець, що залишився від квітконоса; НЗГ – нижня зона гальмування, ЗП – зона поновлення, СЗГ – середня зона гальмування; А – монокарпічний пагін, В – резид

видів. Руйнування осової частини основного пагону зазвичай не призводить до вегетативного розмноження та збільшення кількості особин.

Становлення біоморфи *H. purpurascens* відбувається в два основних етапи: моноподіальне або вимушено гемісимоподіальне наростання осового пагону за оліго- або поліциклічним типом при домінуванні апікальної меристеми термінальної бруньки у віргінільному періоді; симподіальне галуження за рахунок латеральних модулів другого та послідових порядків у генеративному періоді онтогенезу.

Висновки та перспективи.

Зміна онтобіоморф *H. purpurascens* пов'язана з переходом від моноподіального наростання осового

пагону за оліго- або поліциклічним типом при домінуванні апікальної меристеми у прегенеративному (віргінільному) періоді до симподіального за рахунок утворення монокарпічних пагонів другого та послідових порядків у генеративному періоді. Травматична елімінація апікальної меристеми верхівкової бруньки у віргінільному періоді (в іматурному та віргінільному вікових станах) призводить до заміщення головного пагону бічним, але не сприяє галуженню.

Монокрпічні пагони *H. purpurascens* при типовому ході онтоморфогенезу розвиваються за дициклічним типом. Морфо-структурні зони представлені: НЗГ – 2 (3) метамерами з короткими міжвузлями і катафілами з дормінтивним бруньками в їх пазухах; ЗП – одним (2) метамером з

катафілом та брунькою (бруньками) поновлення; СЗГ – одним (2-3) метамером з фотофільним типовим листком (листками) серединної формації; ЗЗ – суцвіттям цимодного типу.

Отримані результати доповнять біоморфологічну характеристику *H. purpurascens*, допоможуть оцінити адаптаційні можливості виду та підібрати найбільш оптимальний комплекс агротехнічних заходів при культивуванні, стануть основою для розробки практичних рекомендацій з насіннєвого і вегетативного розмноження та будуть корисними у геоботаничних і фітоценотичних дослідженнях.

References

1. Melnyk, V.I. (2015). *Helleborus purpurascens* Waldst. et Kit. (Ranunculaceae) – rідkisnij vid flori Evropi na skhidnij mezhi arealu [*Helleborus purpurascens* Waldst. et Kit. (Ranunculaceae) is rare species of European flora in eastern limit of area]. Plant Introduction, 67, 17-24. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2526992> (in Ukraine).
2. Korotchenko, V.V. (2011). Struktura pryrodnykh populiatsii *Helleborus purpurascens* Waldst. Et Kit. (Ranunculaceae Juss.) v Ukraini. [The structure of natural populations of *Helleborus purpurascens* Waldst. Et Kit. (Ranunculaceae Juss.)] *Scientific bulletin of UNFU*, 21 (12), 57-61. (in Ukraine).
3. Tokariuk, A.I (2010). *Helleborus purpurascens* Waldst. & Kit (Ranunculaceae) u flori Cherniveckoi oblasti [*Helleborus purpurascens* Waldst. et Kit (Ranunculaceae) in the flora on the Chernivtsi region]. *Biological System*, 2(2). 78–82 (in Ukraine).
4. Boiko, I., Chekanov, M. & Didenko, I. (2022). Pochatkovі etapi ontogenezy *Helleborus purpurascens* Waldst. et Kit v umovakh Natsionalnogo dendrolohichnogo parku "Sofiivka" NAN Ukrainy [Initial stages of ontogenesis of *Helleborus purpurascens* Waldst. Et Kit. in the conditions of the Sofiivka National Dendrological Park of the National Academy of Sciences of Ukraine]. *Grail of Science*, (12-13), 210–215 <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.29.04.2022.032> (in Ukraine).
5. Grigore, A., Bubueanu, C., Pirvu, L., Neagu, G., Bejanaru, I., Vulturescu, V., Panteli, M., Rasit, I. (2021) Immunomodulatory Effect of *Helleborus purpurascens* Waldst. & Kit. *Plants*, 10, 1990. <https://doi.org/10.3390/plants10101990>.
6. Pilut, C.N., Manea, A., Macasoi, I., Dobrescu, A., Georgescu, D., Buzatu, R., Faur, A., Dinu, S., Chioran, D., Pinzaru, I. et al. (2022). Comparative Evaluation of the Potential Antitumor of *Helleborus purpurascens* in Skin and Breast Cancer. *Plants* 11, 194. <https://doi.org/10.3390/plants11020194>.
7. Segneanu, A.-E.; Vlase, G.; Vlase, T.; Sicoe, C.A.; Ciocalteu, M.V.; Herea, D.D.; Ghirlea, O.-F.; Grozescu, I.; Nanescu, V. (2023). Wild-Grown Romanian *Helleborus purpurascens* Approach to Novel Chitosan Phyto-Nanocarriers—Metabolite Profile and Antioxidant Properties. *Plants*, 12, 3479. <https://doi.org/10.3390/plants12193479>.
8. Long et al. (2023). A Comprehensive Review of the Morphological and Molecular Taxonomy of the Genus *Helleborus* (Ranunculaceae) *Reviews in Agricultural Science*. 11: 106–120, https://doi.org/10.7831/ras.11.0_106.
9. Troll W. (1964) *Die Infloreszenzen* Bd.I. – Jena: Fischer. 1–615
10. Serebryakova, T.I. (1971). Morfogenez pobegov i evolyutsiya zhiznennykh form zlakov [Morphogenesis of shoots and the evolution of life forms of cereals]. 360.
11. Shherbakova, T.O. and Rahmetov, D.B. (2014), Morfologichni osoblivosti monokarpichnih pagoniv vidiv rodu *Miscanthus* Anderss. u zv'jazku z introdukcією v Lisostepu ta Polissi Ukraini [The morphological peculiarities of monocarpic

- shoots of *Miscanthus* Anderss. species due to introduction in Forest-Steppe and Polissya of Ukraine]. *Introdukciya roslin* [Plant Introduction], № (2), P. 3–9.
11. Berko, Y. M. (2013). Monopodialna systema pahoniv hubotsvitykh (Lamiaceae) flory Ukrainy ta modeli yii formuvannia [Monopodial system of shoots of Lamiaceae (Lamiaceae) flora of Ukraine and models of its formation]. *Suchasna fitomorfologhiia materialy druhoi mizhnarodnoi naukovoï konferentsii z morfologhii roslyn*. [Modern Phytomorphology: materials of the second international scientific conference on plant morphology]. Lviv (4), P. 261–268.
 12. Saviykh, N. P., Shabalkina, S. V., Maltseva, T. A. (2017). Structural organization of semi-rosette hygrophelophytes. *Wulfenia*. № 24, P. 258–266.
 13. Smirnova, O., Paljonova, M. and Komarov, A. (2002). Ontogenez rastenij raznykh zhiznennykh form i osobennosti vozrastnoj i prostranstvennoj struktury ih populacij [Ontogenesis of plants of different life forms and features of the age and spatial structure of their populations]. *Ontogenez* [Ontogenesis], № 33 (1), P. 5–15.

**Boyko I., Didenko I., Usoltseva O., Ponomarenko V., Dzhus L. (2024).
BIOMORPHOLOGICAL FEATURES OF HELLEBORUS PURPURASCENS WALDST.
& KIT.**

BIOLOGICAL SYSTEMS: THEORY AND INNOVATION, 15(2): 51-59.

<https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Biologiya/article/view/49733>

[http://dx.doi.org/10.31548/biologiya15\(2\).2024.005](http://dx.doi.org/10.31548/biologiya15(2).2024.005)

Abstract. *Helleborus purpurascens* Waldst. & Kit. – a valuable medicinal and decorative plant. Biomorphological research as a component of a comprehensive study of the species is the basis for the development of a set of measures for the preservation of natural populations and for the further wide application of economic and valuable traits of plants in their cultivation. The ontomorphogenesis of *H. purpurascens* under culture conditions in the Sofiyivka National Dendrological Park of the National Academy of Sciences of Ukraine was investigated. It was found that at all stages of the virginal period of ontogenesis monopodial growth of the axial shoot takes place with the dominance of the apical meristem. Traumatic elimination of the apical meristem at all stages of the virginal period leads to the replacement of the axial shoot by a lateral one, but does not promote branching. In the typical course of ontogenesis, the generative period begins in the fourth year of life of individuals, after which there is a transition to the sympodial model of shoot formation. Monocarpic shoots develop according to the type of dicyclic, development according to the type of incomplete, oligo- or polycyclic are manifestations of polyvariance. Features of the structural and functional organization of monocarpic shoots are described, their morpho-structural zones are characterized. It was found that: the lower inhibition zone (LIZ) is represented by 2-3 metamers with short internodes and cataphylls with dormant buds in their axils; innovation zone (IZ) – one (2) metamer(s) with a short internode and a cataphyll with a renewal bud in its axil; middle inhibition zone (MIZ) – one (2-3) metamer with a photophilic typical leaf(s) of the middle formation; amplification zone (AZ) – inflorescences of the cymoid type. According to the nature of the location of individual structural elements of the shoot and root sphere within the adult individual, *H. purpurascens* belongs to monocentric, vegetatively immobile biomorphs, the destruction of the axial part of the main shoot in which does not lead to natural vegetative reproduction and an increase in the number of individuals.

Key words: ontomorphogenesis, monocarpic shoots, branching, ontogenetic state.

ФІТОПАРАЗИТИЧНІ НЕМАТОДИ ТРЬОХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА

А.С. ЛУЦЮК,

*аспірантка кафедри ентомології, інтегрованого захисту та карантину
рослин, 202 Захист і карантин рослин*

E-mail: anastasia.lutsiuk@gmail.com

ORCID: 0009-0001-4648-5782

*Національний університет біоресурсів і природокористування України,
Київ, Україна*

Анотація. Стаття присвячена комплексному аналізу наукових досліджень, спрямованих на вивчення взаємодії фітопаразитичних нематод з енергетичними культурами, такими як міскантус, топінамбур та павловнія, а також розгляду факторів, які впливають на поширення цих нематод у системах вирощування трьох біопаливних культур: міскантус гігантський, павловнія повстиста та топінамбур. В основі дослідження лежить аналіз взаємодії між нематодами та врожайністю цих культур, а також потенційний позитивний вплив нематодних угруповань різних трофічних груп на якість та фітореміністрацію ґрунту. Особливу увагу було приділено фітопаразитичним нематодам, які є одними з найбільш поширених ґрунтових шкідників рослин. Врахування взаємодії між нематодами та енергетичними культурами має велике значення для створення стійких і ефективних систем вирощування, які б забезпечували високу врожайність та зберігали біорізноманіття ґрунтової екосистеми.

У роботі зроблено огляд трьох енергетичних культур для виробництва біопалива (міскантус гігантський, павловнія повстиста і топінамбур), зазначені нематоди-шкідники кожної з цих культур, які були знайдені у ризосфері рослин протягом багатьох років опублікованих досліджень. Також було приділено увагу негативному впливу фітопаразитичних нематод на вирощування енергетичних культур, особливо міскантусу. Проте, виявлено, що певні кліматичні, хімічні та фізичні умови сприятливі для формування нематодних угруповань, які можуть позитивно впливати на якість ґрунту та підтримувати його родючість.

Робота важлива для розвитку стратегій управління чисельністю різних трофічних рівнів нематод, а особливо – фітопаразитичних, особливо у контексті вирощування перспективних енергетичних культур для виробництва біопалива. Також у огляді описаний важливий вплив фітореміністрації на чисельність нематодних угруповань у ґрунті. Отримані результати можуть стати основою для подальших досліджень у цій області та впровадження ефективних методів

збереження родючості ґрунту та підвищення врожайності енергетичних культур. Результати аналізу наукових публікацій можуть також сприяти розробці екологічно стійких методів вирощування енергетичних культур, що сприятиме збереженню природних ресурсів та зменшенню впливу сільськогосподарської діяльності на довкілля.

Ключові слова: фітопаразитичні нематоди, енергетичні культури, фітормідіація, міскантус гігантський, павловнія повстиста, топінамбур, біопаливо.

Вступ.

В епоху, коли енергетична безпека та збалансоване використання природних ресурсів набуває все більшої актуальності, з'явилася потреба у заміні звичайних і звиклих джерел природних ресурсів на альтернативні варіанти, задля збереження компонентів довкілля. Біопаливо, як альтернативне джерело енергії, набирає все більшої популярності. Розвиток технологій виробництва біопалива, яке базується на перетворенні біомаси енергетичних рослин сприяє створенню стійких та екологічно спрямованих біоенергетичних систем.

У контексті такої важливої зміни в енергетичному секторі, розуміння впливу шкідливих організмів, до яких відносяться і фітопаразитичні нематоди, на енергетичні культури набуває ключового значення. Нематоди, які пошкоджують кореневу систему рослин, можуть значно впливати на їх розвиток та знижувати врожайність.

Стаття присвячена комплексному аналізу наукових досліджень, спрямованих на вивчення взаємодії фітопаразитичних нематод з енергетичними культурами, такими як міскантус, топінамбур та павловнія, а також на розгляд факторів, які впливають на поширення цих нематод у системах вирощування біопаливних культур. Вивчення і розуміння цих аспектів є

важливим етапом для розробки ефективних стратегій контролю та попередження негативного впливу фітопаразитичних нематод на сталість та ефективність виробництва біопалива.

Крім того, в статті розглядаються дослідження взаємодій енергетичних культур, таких як *M. giganteus*, *P. tomentosa* і *H. tuberosus*, показали, що деякі родини нематод, зокрема *Pratylenchus*, *Helicotylenchus*, *Xiphinema*, *Meloidogyne*, можуть паразитувати на рослинах, що призводить до зменшення врожаю та значних збитків. Також у роботі було проаналізовано розширення площ під такі культури для виробництва біопалива може збільшити різноманіття видів та біомасу нематодних груп.

У статті особливу увагу зосереджено на вивченні видового складу фітопатогенних нематод у посівах енергетичних культур. Для досягнення цієї мети було зібрано та проаналізовано широкий спектр наукових джерел з відповідних тематичних галузей.

На основі проведеного аналізу джерел літератури було виявлено кілька ключових аспектів, на основі яких і формувалися відповідні розділи та висновки у цій статті.

Це дослідження демонструє важливість моніторингу та контролю фітопатогенних нематод у посівах міскантусу гігантського, павловнії повстистої та топінамбуру. Отримані

результати можуть бути використані для розробки ефективних стратегій управління нематодами, що сприятиме підвищенню продуктивності та якості цих енергетичних культур.

Для більш глибокого розуміння взаємодії між фітопатогенними нематодами та енергетичними культурами необхідно проводити додаткові дослідження. Зокрема, варто зосередитися на розробці біологічних методів контролю нематод та вивченні впливу агротехнічних заходів на нематодну фауну.

Стаття закладає основу для майбутніх робіт у цій галузі та сприяє покращенню управління енергетичними культурами у контексті їх взаємодії з фітопатогенними нематодами.

Результати дослідження і їх обговорення.

1. *Характеристика трьох енергетичних культур культур (*Miscanthus* × *giganteus*, *Paulownia tomentosa* Steud. та *Helianthus tuberosus* L.).*

У ХХІ столітті, в часи, коли людство вже починає бачити результати небалого відношення до екології та наслідки глобального потепління, існує нагальна потреба у зменшенні викидів парникових газів в атмосферу, особливо вуглекислих газів – CO₂, а значення стабільного постачання енергії зростає у глобальній перспективі, оскільки очікується швидкий ріст попиту на енергію у наступні десятиліття, разом із зростанням населення та економіки (Vodiak Y., 2022). Одним із найважливіших способів досягнення цієї мети є заміна частини традиційних транспортних палив біопаливами та вугілля біомасою (Jezierska-Thöle A., 2016). Енергетичні культури мають значний потенціал

для задоволення майбутніх потреб у енергії у всьому світі (Sims R., 2006). За останні 10 років світова площа під ними зросла вдсятеро, і за прогнозами попит на ці культури буде швидко збільшуватися, а площі їх вирощування будуть складати мільйонів гектарів у найближчому майбутньому (Zegada-Lizarazu W., 2011).

Міскантус гігантський (*Miscanthus* × *giganteus*) – багаторічна ризоматична трав'яниста рослина, яка використовується комерційно як енергетична культура для вирощування біопалива (Christian D., 2008). Ця рослина привертає увагу вже протягом останнього десятиліття завдяки тому, що походить з теплих азіатських регіонів, де використовується вже багато років, наприклад, для виробництва корму або для покриття дахів. У Європу вона була привезена у тридцять років минулого століття. На сьогоднішній день це міжвидовий гібрид, створений у восьмидесятих роках двадцятого століття в Данії, з диплоїдного китайського міскантуса (*M. sinensis*) та тетраплоїдного цукрового міскантуса (*M. sacchariflorus*) (Szulczewski W., 2018).

Міскантус належить до енергетичних рослин типу С4, врожаї якої поступово зростають у перші роки росту (Ouattara M., 2020). Рослина має багато переваг серед інших енергетичних культур, що робить її відповідним і стійким джерелом біомаси, зокрема, її найголовніші переваги – низькі енерговитрати для вирощування (Stavridou E., 2016). Врожайність культури може сягати до 25 т/га після приблизно після трьох років вирощування (Mokrzycki J., 2022), а вегетаційний період триває протягом 20-25 років (Lewandowski I., 2003) і здатна вирощуватися на маргінальних та

слабо забруднених землях (Heletukha H., 2016) (Pidlisnyuk V., 2017) і наразі доволі широко використовується для виробництва в Європі для біоетанолу, біогазу та інших біоматеріалів (Stefanovska T., 2020). Рослина потребує на 87 % менше площі для вирощування тієї ж кількості біомаси, ніж суміш багаторічних видів степових рослин, оскільки врожайність монокультури *M. × giganteus* більша приблизно у 8 разів (Heaton E., 2010). Результати свідчать, що протягом трьох років польових випробувань в Іллінойсі, США, що ефективність переробки *M. × giganteus*, отриманого з одного гектару в тверде та рідке паливо була приблизно в 2,7 рази вища порівняно з основними зерновими культурами (Heaton E., 2008).

Стебла міскантусу містять приблизно 41-45% целюлози, 20.6-33% геміцелюлози та 19-23.4% лігніну та мають високу теплову вартість. Також він є відповідним джерелом для виробництва целюлози (McCarthy S., 1995). Біомаса міскантусу також використовують для виробництва будівельних матеріалів або переробляють разом із гноєм від худоби або свиней.

За допомогою вирощування цієї енергетичної культури можна не тільки отримувати великі врожаї біомаси, але й досягти ефективної фіторе-medіації (фітостабілізації) (Pidlisnyuk V., 2014). з видаленням важких металів з забрудненого ґрунту (Al Souki K., 2021).

M. × giganteus досягає максимальної вегетативної продуктивності починаючи з третього року вирощування, а, отже, монокультура та сприятливі умови навколишнього середовища: температура повітря вище 21 °C, вологість 30% (Nisa R., 2021) – створюють причини для розвитку

багатої ґрунтової фауни, у тому числі, усіх трофічних видів нематод.

Отже, з огляду на різні можливості використання біомаси міскантус є перспективною культурою для біоекономіки. Однак, його поточна площа вирощування в Європі на сьогодні відносно невелика (Winkler B., 2020).

Павловнія повстиста (*Paulownia tomentosa* Steud.) – це листяне дерево, яке здатне досягати дуже високих темпів росту за сприятливих умов – більше чотири метрів заввишки за один вегетаційний сезон. Цей швидкокорослий вид дерев інтродукували з Китаю, де він є широко поширеним (Akyildiz M., 2010).

Рослини мають високий потенціал виробництва біомаси: до 50 т/га на рік, що є одним найвищих показників, зокрема в порівнянні з однорічними культурами. Оскільки, павловнія відноситься до швидкокорослущих дерев, за один рік рослин продукує стільки біомаси, скільки інші види за декілька. За сприятливих умов інтенсивна плантація 2000 дерев на гектар може давати врожай до 150-300 тон деревини на рік лише через 5-7 років після посадки (López F., 2012). Найвищої інтенсивності росту рослина досягає у період від 20 до 30 років (Hecker U., 2003). На відміну від павловнії, особливість вирощування міскантусу у тому, що перший врожай рослина дає тільки на третій рік після посадки. Отже, перші два роки вирощування рослини є неприбутковими. Встановлено, що навіть в умовах відносно сухого клімату можливо отримати задовільний врожай біомаси без зниження продуктивності ґрунту та навіть без використання добрив (Vodiak Y., 2022).

Павловнія, як і міскантус, відноситься до рослин, які мають C4 тип

фотосинтезу. Таким рослинам властива висока ефективність фотосинтезу в сприятливих умовах, що дозволяє рослині швидко збільшувати біомасу за короткий проміжок часу (Jakubowski M., 2022).

Деревина павловнії може служити відмінним матеріалом для виготовлення меблів, скарбниць, коробок, будівельного матеріалу, компосту та вугілля (Rafighi A., 2011; Mohamad M., 2022). Наявність лігніну та високий вміст целюлози у складі деревини робить її порівняльно кращою з твердими породами деревин, яку вважають відповідною для використання у якості твердого біопалива. Як джерело енергії, біомаса рослини використовується для виробництва біоетанолу та біогазу (Skwiercz A., 2022).

На сьогоднішній день павловнія має особливу економічну важливість, оскільки попит на деревину дуже великий. Її вирощування дуже вигідне порівняно з іншими культурами, оскільки можна використовувати всі частини цієї рослини: від коренів до насіння. Проте небагато споживачів усвідомлюють справжню енергетичну, терапевтичну та економічну важливість павловнії. Це високопродуктивна культура, а ціни на її продаж на європейських ринках дуже привабливі. Крім того, це вирощування культури сприяє збереженню екологічного балансу та довкілля (Buzan R., 2018).

Листя павловнії мають високий вміст білка, що робить його придатним для використання у якості корму для тварин.

Надзвичайно важливою екологічною перевагою вирощування павловнії є здатність активно фіксувати вуглець. Дерево поглиблює приблизно 22 кг CO₂ і виробляє 6 кг O₂ щорічно, що підтверджує його важливу роль у

позитивному впливі на навколишнє середовище (Esteves B., 2022).

Подібно до інших дерев'янистих рослин, павловнія є вразливою до різноманітних патогенів. Найвідомішою хворобою павловнії є «відьмині мітла», яка прогресує у Китаї на даний момент (Yue H. N., 2008). Крім того, рослину може уражувати гриб *Phytophthora* (Aloi F., 2021). Також нещодавно у ризосфері культури було виявлено галоутворюючі нематоди виду *Meloidogyne hapla* (Skwiercz A., 2019).

Топінамбур, або соняшник бульбистий (*Helianthus tuberosus* L.) – важлива культура, яка має широкий спектр практичного використання: продукт харчування, корм для тварин та енергетична культура (Lv S., 2019). Топінамбур притаманні екопластичність, швидкий ріст, велика біомаса, низькі витрати на обслуговування та висока ефективність конверсії енергії. Ці фактори роблять його високопридатним для вирощування на маргінальних землях без зниження продовольчої безпеки.

H. tuberosus – вічнозелений рослинний вид, який походить територіально з долин річок Огайо і Міссісіпі в Сполучених Штатах. Був інтродукований по всьому світу в помірних районах (Pan L., 2009).

Основними органами рослини є надземні частини та бульби, стебло та бульбокорінь є домінуючими органами зберігання інуліну до початку утворення бульби та на момент дозрівання, відповідно. Надземні частини рослини є поживними та можуть використовуватися для виробництва силосу чи як джерело грубого корму (Sawicka B., 2019).

H. tuberosus є економічно важливою культурою, головним чином,

завдяки високому потенціалу використання його листя та стебел у фармацевтичному секторі через наявність біоактивних сполук. Коріння топінамбуру містять інулін, олігофруктоза та фруктоза, що робить їх привабливими та корисними для людей з захворюванням на діабет (Nasoon S., 2020).

Аналогічно до *M. × giganteus*, *H. tuberosus*. цілком підходить для виробництва біопалива. Топінамбур являє собою відмінне джерело біомаси, завдяки високим врожаям і великому вмісту лігніну та целюлози. Рослина є привабливим субстратом для енергетичного виробництва, включаючи пряме згоряння, спільне згоряння з вугіллям та виробництво біогазу (Zapałowska A., 2018). Експерименти з анаеробним перетворенням біомаси топінамбуру показали, що свіжі та силосовані наземні частини рослини можуть виробляти від 480 до 680 літрів біогазу на один кілограм органічного матеріалу (Gunnarson S., 1985).

H. tuberosus загалом схильний до деяких інфекцій, спричинених грибами, бактеріями і вірусами, зокрема, тютюнової мозаїки. Також на ньому паразитують галоутворюючі та цистоутворюючі нематоди родів *Ditylenchus dipsaci*, *Heterodera marioni* і *Meloidogyne s.* Загалом, рослина вважається стійкою до більшості шкідників та хвороб, морозостійкою та витримує посухи, задовільно росте на більшості ґрунтів з мінімальним додаванням добрив (Gunnarsson I., 2014).

Роль фітонематод в екосистемах

Нематоди – це несегментовані тварини, які можуть бути від 0,1 мм до кількох метрів у довжину, також відомі як кільчасті черви через їх

зазвичай циліндричну та витягнуту форму тіла (Korpenhöfer A. M., 2007).

Нематоди представляють найбільшу групу метазоїв на Землі (Machado R., 2022), виступаючи важливою складовою ґрунтової мікрофауни на більшості трофічних рівнів та являються найбільшою ланкою багатоклітинних тварин на Землі. Ґрунтові нематоди є одними з найчисельніших організмів, багатих за видовим складом. (Zhao J., 2016; Taylor R., 2019). На сьогоднішній день у світі ідентифіковано більше 25000 видів нематод (Sochová I., 2006). З них близько 10 000 вільноживучих морських та наземних нематод, 15 500 нематод-паразитів рослин та тварин (Morand S., 2015).

Нематоди мають велике значення для аграрних та природних екосистем через те, що являються другою за різноманіттю групою безхребетних із адаптацією до різних середовищ і способів живлення. Різноманіття місць існування нематод охоплює водні, наземні середовища існування (Hailu F., 2020). Вони поширені у всіх кліматичних зонах планети: у морях та океанах їх знаходять від Північного полюса до прибережних вод і внутрішніх вод Антарктики. Також нематоди населяють прісноводні водойми та всі типи ґрунтів (від тундрових боліт до піщаних пустель), паразитують на тваринах і рослинах. Подібно до більшості ґрунтових безхребетних, нематоди заселяють верхні шари ґрунту на глибині до 30 см, незалежно від типу землекористування (Shavkatovna K. N., 2023).

Забруднення ґрунту – це глобальна проблема, яка має широкий спектр негативних наслідків для здоров'я людини і сільського господарства. Останні два десятиліття біореміді-

ація визнана ефективним методом очищення ґрунтів від ксенобіонтів (Cunningham S., 1997).

Фітореміністрація – це використання зелених рослинних систем для очищення забруднених ґрунтів, осади́в та води (Römkens, L., 2002). Порівняно з багатьма традиційними технологіями ремедіації, фітореміністрація є технологією, призначеною для вирішення різноманітних поверхневих забруднень. В даний час вона спрямована на очищення ґрунту від металів, металоїдів, нафтових вуглеводнів, пестицидів, вибухових речовин, хлорованих розчинників та промисловими відходами (Raskin I., 1999).

Ґрунтові мікроорганізми залежать безпосередньо або опосередковано від хімічного складу ґрунту і підвищена концентрація металів може призвести до токсичних ефектів для цих організмів (Ferris H., 2010). Бактерії, і в меншій мірі гриби, відповідальні, в основному, за важливі біологічні процеси ґрунту, такі як розкладання та мінералізація органічного речовини, нітрифікація, денітрифікація та ін. Ці мікроорганізми є джерелом живлення для бактерофагів, фунгіворів та всеїдних трофічних груп нематод. Інші ґрунтові організми залежать безпосередньо від коренів рослин: наприклад, фітопаразитичні кореневі нематоди живляться, проникаючи в корені рослин та висмоктуючи клітинний вміст. Тому процеси, які мають або прямий вплив на мікроорганізми ґрунту – знижена бактеріальна активність через підвищену концентрацію металів у ґрунті – можуть призвести до значних змін в ґрунтовій екосистемі (Khandelwal G. (2022).

Серед ґрунтових організмів нематоди є найбільш перспективними організмами біоіндикації та якості ґрун-

тів (Bouwman L., 1994). Деякі види нематод можуть бути показниками токсичності та забруднення ґрунту конкретними важкими металами на різних трофічних ланцюгах, зокрема *Chiloplacus i Pratylenchus* для міді, *Paratylenchus i Criconemoides* для хрому, а *Tylenchus i Cephalobus* для цинку.

Кількість нематод, їх біорізноманіття та харчові звички взаємопов'язані із властивостями ґрунту (Rehman P., 2018) (Moura G., 2017) Нематоди в ґрунтових екосистемах виконують важливі біогеоценологічні функції, наприклад, вони беруть участь у розкладанні та мінералізації органічних речовин, роблячи їх доступними для рослин, грибів і бактерій (Li J., 2018; Gebremikael M. T., 2016).

Деякі зміни температури, вологості, структури, механічного та хімічного складу ґрунту впливають на склад нематодних угруповань, їхні джерела харчування і визначають біологічне різноманіття цих ґрунтових організмів (Paig McQueen J., 2019; Renčo M., 2020). Таким чином, склад та структура цих нематод швидко реагують на абіотичні та біотичні фактори, які можуть змінювати середовище існування цих тварин, і, отже, впливати на їхнє розповсюдження. (Liu T., 2019). Унікальна здатність нематод реагувати на зміну біотичних та абіотичних факторів середовища забезпечила їм широке використання протягом останніх 20 у якості біоіндикаторів в дослідженнях ґрунтової екології (Ouattara M., 2020).

Отже, структура та склад нематодних угруповань можуть бути зручним інструментом для вимірювання змін у функції та стані ґрунту через їхнє розповсюдження та присутність у широкому спектрі середовищ, а та-

кож через наявність кількох трофічних рівнів у ґрунтовому харчовому ланцюзі (Alasmay Z., 2020). Вони також відображають зміни у наземних середовищах через свою швидку реакцію на екологічні та антропогенні порушення (Preez G. D., 2022). Як найбільш різноманітна група метазоїв, нематоди виконують різноманітні функції в ґрунтових харчових мережах і, таким чином, можуть регулювати склад мікробної спільноти та впливати на розклад органічної речовини та кругообіг поживних речовин (Zhao C., 2024).

Рослиноїдні нематоди є важливими шкідниками в сільському господарстві по всьому світу (Rohini Ekanayake H. M., 1996). Нематоди призводять до значних втрат врожаю, погіршують якість урожаю та серйозно загрожують глобальній продовольчій безпеці (Cumagun C., 2015). Світові оцінки втрат врожаю через пошкодження рослин фітопаразитичними нематодами складають приблизно 12 % (Briar S., 2016).

Послаблюючи ріст та розвиток рослин, нематоди відкривають ворота для інших патогенів, наприклад грибів родин *Fusarium sp.*, *Phytophthora sp.*, і *Pseudomonas sp.* (Ntalli N., 2020).

На сучасний момент дослідження фітонематод, їх видового розмаїття та структурно-функціональної організації в природних та антропогенно змінених екосистемах залишаються актуальними для України (Zhilina T., 2012).

Аналіз структури угруповання ґрунтових нематод може показати інтенсивність впливу різних чинників на стійкість екосистеми ґрунту (Nabih M., 1997). Вивчення впливу господарської діяльності на структуру популяції нематод та їхні функції

ґрунтується на видовому, родовому розмаїтті або розмаїтті родин нематод, а також на великій кількості трофічних груп (Georgieva, S, 2002; Zhang X., 2018; Satyendra K. P., 2022).

В сучасній системі ідентифікації нематоди розділені на чотири трофічні групи, відповідно до їхніх харчових уподобань, фізіології та анатомії стравоходу:

- рослиноїдні паразити (фітопаразити);
- бактеріовори (BF);
- фунгівори (FF);
- хижаки-омнівори (OP)

(Yeates G., 2003).

Нематоди родів *Longidorus*, *Xiphinema* і *Trichodorus* є векторами небезпечних ґрунтових вірусів, які передаються через коріння рослин. Нематоди-переносники хвороб рослинних вірусів живляться як мігруючі ектопаразити на коріннях рослин-господарів, утворюючи невеликі гали кінчиках коренів (Wajid Khan M., 1993; Singh S., 2020; Nykyri J., 2013; Skwiercz A., 2022).

У більшості сільськогосподарських систем найбільш значущими з точки зору надання послуг екосистемам є вільноживучі бактеріовори та фунгівори. Вільноживучі види є надзвичайно важливими для кругообігу поживних речовин в ґрунті через мінералізацію і являються ресурсом для стійкого сільського господарства. Асоціація вільноживучих нематод з бактеріями може впливати на репродукцію рослиноїдних нематод в ґрунті. Збільшення мікробного компоненту ґрунту через розкладання та природні рослини в некультурних ґрунтах пов'язане з збільшенням кількості вільноживучих нематод. Вільноживучі бактероїди (наприклад, *Panagrellus redivivus*), всеїд-

ні (наприклад, *Aporcelaimellus*) та фунгівори (наприклад, *Aphelenchus avenae*) вважаються індикаторами здоров'я ґрунту у різних природних та сільськогосподарських системах. Отже, вільноживучі нематоди та їх асоційований мікробіом відіграють критичну роль у циркуляції поживних речовин з непрямим потенціалом у регулюванні рослинорідних нематод (Shokoohi E., 2024).

Фітонематоди міскантусу гігантського. У ряді досліджень, проведених на посівах міскантуса, було визначено, що на рослині можуть паразитувати таких видів фітопатогенних нематод: *Aphelenchus avenae*, *Xiphinema brevicole*, *Bitylenchus dubius*, *Merlinius brevidens*, *Rotylenchus agnetis*, *Helicotylenchus pseudorobustus*, *Paratylenchus projectus*, *Scutylenechus quadrifur*. Серед цього переліку також є нематоди, здатні переносити віруси, що є особливо небезпечним для рослини.

Дослідження, що були проведені в США показали, що *Pratylenchus penetrans*, *scribneri*, *crenatus*, *Helicotylenchus pseudorobustus*, *Hoplolaimus galeatus*, *X. americanum* і *X. rivesi* потенційно можуть завдати шкоди посівам міскантуса (Mekete T., 2011).

Вивчення чисельності та просторово-часових аспектів поширення рослинорідних нематод *M.×giganteus* проводили у 2016-2017 рр. насадженнях віком 1-10 років у 8 локаціях, що представлені 6 типами ґрунтів в Україні та 9 локацій і 8 типів ґрунтів у Польщі. Загалом на рослині було виявлено приблизно 53 види нематод, які належать до 22 родів і 10 родин (Stefanovska T., 2020), включаючи види-паразити рослин, чисельність популяцій яких у кількох місцевостях економічний поріг шкідливості.

Розповсюдження видів нематод оцінювали за допомогою неметричної багатовимірної шкали, що вказує на просторову гетерогенність точок відбору проб та динаміку угруповань. Групи напівендопаразитів та ектопаразитів можуть бути використані як індикатори для оцінки стану плантацій *M.×giganteus* різного строку вирощування. Отримані результати можуть бути застосовані для вдосконалення технологій вирощування *M.×giganteus* з метою запобігання ризику зниження врожайності біомаси від рослинних паразитичних нематод у регіонах Східної та Центральної Європи.

Були проведені дослідження фітопаразитичних нематод на посівах міскантуса, що вирощувався на ґрунті, зараженому свинцем. Встановлено, що некатодні комплекси є чутливими будь-яких забруднень ґрунту: зі збільшенням рівня забруднення зменшувалася як загальна кількість, так і біомаса нематодного угруповання. Доведено, що коли вплив структурних факторів навколишнього середовища зменшується, то конкуренція між видами нематод стає важливішим чинником (Stefanovska T., 2023).

Фітонематоди павловнії повстистистої. На посівах павловнії повстистистої, з ризосфери рослини були ідентифіковані 20 видів фітопаразитичних нематод, які належать до родин *Trichodoridae*, *Longidoridae*, *Criconeematidae*, *Paratylenchidae*, *Telotylenchidae*, *Hoplolaimidae* і *Pratylenchidae*. Найбільш вражлива культура до кореневих фітонематод виду *Meliodogine*, особливо до *M. incognita* та *M. javanica* (останній переважає) (Sharma V., 1999).

Фітонематоди топінамбуру. У ризосфері рослин топінамбуру було

знайдено і ідентифіковано 35 видів нематод: *Paratrichodorus pachydermus*, *Trichodorus cylindricus*, *T. viruliferus*, *Longidorus attenuatus*, *L. elongatus*, *L. leptcephalus*, *Cricone-ma annuliferum*, *Criconemoides in-formis*, *Mesocriconema rusticum*, *M. solivagum*, *M. xenoplax*, *Pratylenchus nanus*, *neoamblycephalus*, *projectus*, *Bitylenchus dubius*, *B. maximus*, *Merlinius brevidens*, *M. nothus*, *Scutylenchus quadrifer*, *S. tartuensis*, *Helicotylenchus digonicus*, *H. pseudorobustus*, *H. vulgaris*, *Rotylenchus pumilus*, *R. robustus*, *Pratylenchus crenatus*, *fallax*, *neglectus*, *Hirschmanniella gracilis*, *Aphelenchoides fragariae*, *Aphelenchus avenae*, *A. eremitus*, *Ditylenchus dipsaci* та *D. medicaginis* (Zapałowska A., 2018).

Серед інших трофічних груп, не завдаючих шкоди посівам місканту-са, були виявлені наступні родини нематод: *Aporcelaimellus*, *Dorylaimellus*, *Mesocriconema*, *Basiria*, *Plectus*, *Coslenchus* і *Pungentus* (Todd T., 2006; Mekete T., 2011).

У результаті досліджень ризосфери рослин топінамбуру, павловнії та міскантусу було виявлено та ідентифіковано більше 50 видів нематод різних трофічних груп. Ці тварини здатні завдавати значної шкоди рослинам, впливаючи на їх ріст і продуктивність. Окремі з них, наприклад, *Xiphinema brevicole*, також можуть переносити віруси, що підвищує ризик для посівів. Таким чином, комплексний підхід до вивчення фітопатогенних нематод у ризосфері енергетичних культур, таких як топінамбур, міскантус гігантський та павловнія є критично важливим для розробки ефективних стратегій захисту цих рослин.

Висновки.

Низка досліджень, що фокусується на вивченні взаємодії енергетичних культур, таких як *M. giganteus*, *tomentosa* та *H. tuberosus*, показали, що родини особливо небезпечних для нематод, такі як *Pratylenchus*, *Helicotylenchus*, *Xiphinema*, *Meloidogyne*, можуть паразитувати на рослинах, призводити до зменшення врожаїв і потенційно завдати значних збитків. Збільшення площ вирощування цих культур для виробництва біопалива може призвести до збільшення видової різноманітності та біомаси нематодних угруповань. Також особливо небезпечною для посівів є наявність у ризосфері нематод родів *Longidorus*, *Xiphinema* і *Trichodorus*, які є надзвичайно шкідливими для рослин тим, що переносять віруси.

Враховуючи підвищений попит до виробництва енергетичних культур для подальшої конверсії у рідкі та тверді біопалива важливо вдосконалити технології вирощування, щоб уникнути або зменшити ризик від фітопаразитичних нематод. Для цього необхідно розробити та запровадити систему моніторингу та проводити детальні дослідження визначити вплив нематод фітопаразитів на врожайність та якість біомаси енергетичних культур, оскільки це може мати прямий вплив на ефективність виробництва біопалива. Крім того, необхідно розробити надійні заходи контролю чисельності фітопаразитичних нематод із урахуванням природних регулюючих механізмів. За результатами вивчення, *Helicotylenchus*, *Xiphinema* і *Pratylenchus* виявили високий ступінь впливу, що може визначати не лише кількість, але й якість отриманої біомаси.

Також нематодні угруповання можуть бути біоіндикаторами здоров'я або стану ґрунту, оскільки вони добре корелюють із циклом азоту та ключовими екологічними процесами в ґрунті (Neher D., 2001).

Знання найголовніших закономірностей взаємодії енергетичних культур із фітопаразитичними нематодами має важливе значення для розвитку стійких та ефективних систем вирощування біомаси для виробництва біопалива першого та другого покоління.

References

1. Vodiak Y. T., Tsapko Y., Kucher A., Krupin V. (2022). Influence of Growing *Miscanthus x giganteus* on Ecosystem Services of Chernozem. *Energies* 2022, 15(11), 4157. doi:10.3390/en15114157.
2. Jezierska-Thöle A., Rudnicki R., Kluba M. (2016). Development of energy crops cultivation for biomass production in Poland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62 534-545. doi:10.1016/j.rser.2016.05.024.
3. Sims R., Hastings A., Schlamadinger B., Taylor G. (2006). Energy crops: current status and future prospects. *Global Change Biology* 12(11) 2054-2076. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01163.x.
4. Zegada-Lizarazu W., Monti A. (2011). Energy crops in rotation. A review. *Biomass and Bioenergy* 35(1) 12-25. doi:10.1016/j.biombioe.2010.08.001.
5. Christian D. G., Riche A. B., Yates N. E. (2008). Growth, yield and mineral content of *Miscanthus x giganteus* grown as a biofuel for 14 successive harvests. *Industrial Crops and Products* 13(4), 344-360. doi:10.1016/j.indcrop.2008.02.009.
6. Szulczewski W., Zyromski A., Jakubowski W., Biniak-Pierog M. (2018). A new method for the estimation of biomass yield of giant miscanthus (*Miscanthus giganteus*) in the course of vegetation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82. doi:10.1016/j.rser.2017.07.057.
7. Ouattara M. S., Laurent A., Barbu C. M., Berthou M. (2020). Effects of several establishment modes of *Miscanthus x giganteus* and *Miscanthus sinensis* on yields and yield trends. *GCB-Bioenergy* 12(7). doi:10.1111/gcbb.12692.
8. Stavridou E., Hastings A., Webster R., Robson P. (2016). The impact of soil salinity on the yield, composition and physiology of the bioenergy grass *Miscanthus x giganteus*. *GCB – Biotechnology* 9(1). doi:10.1111/gcbb.12351.
9. Mokrzycki J., Magdziarz A., Rutkowski P. (2022). The influence of the *Miscanthus giganteus* pyrolysis temperature on the application of obtained biochars as solid biofuels and precursors of high surface area activated carbons. *Biomass and Bioenergy* 164. doi:10.1016/j.biombioe.2022.106550.
10. Lewandowski I., Scurlock J., Lindvall E., Myrsini C. (2003). The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass Bioenergy* 25(4) 335-361. doi:10.1016/S0961-9534(03)00030-8.
11. Heletukha H. H. (2016). Analiz kryteriiv staloho rozvytku bioenerhetyky. *Promyslova teplotekhnika* 38(6), 47-55 doi.org/10.31472/ihe.6.2016.07
12. Pidlisnyuk V. V., Erickson L. E., Trögl J., Shapoval P. (2017). Metals uptake behaviour in *Miscanthus x giganteus* plant during growth at the contaminated soil from the military site in Sliač, Slovakia. *Polish Journal of Chemical Technology* 20 (2) 1-7. doi:10.2478/pjct-2018-0016.
13. Stefanovska T. R., Skwiercz A., Zouhar M., Pidlisnyuk V. (2020). Plant feeding nematodes associated with *Miscanthus x giganteus* and their use as potential indicators of the plantations' state. *International*

- Journal of Environmental Science and Technology* 18(2). doi:10.1007/s13762-020-02865-z.
14. Heaton E. A., Dohleman F. G., Juvik J. A., Lozovaya V. (2010). Chapter 3 - Miscanthus: A Promising Biomass Crop. *Advances in Botanical Research* 56, 75-137 doi:10.1016/B978-0-12-381518-7.00003-0.
 15. Heaton E. A., Dohleman F. G., Long S. P. (2008). Meeting US biofuel goals with less land: the potential of Miscanthus. *Global Change Biology* 14, 2000-2014. doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01662.x.
 16. McCarthy S. M. (1995). Progress in commercial development of Miscanthus in England. *Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry*. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780080983813_A23537078/preview-9780080983813_A23537078.pdf
 17. Pidlisnyuk V., Stefanovska T., Lewis E. E., Erickson L. E. (2014). Miscanthus as a Productive Biofuel Crop for Phytoremediation. *Critical Reviews in Plant Sciences* 33(1) 1-19. doi:10.1080/07352689.2014.847616.
 18. Al Souki K. S., Burdová H., Mamirova A., Kurář P. (2021). Evaluation of the Miscanthus x giganteus short term impacts on enhancing the quality of agricultural soils affected by single and/or multiple contaminants. *Environmental Technology & Innovation* 24. doi:10.1016/j.eti.2021.101890.
 19. Nisa R. U., Kouser N., Tantray A. Y., Allie K. (2021). Influence of ecological and edaphic factors on biodiversity of soil nematodes. *Saudi Journal of Biological Sciences* 28(5) 3049-3059. doi: 10.1016/j.sjbs.2021.02.046
 20. Winkler B., Mangold A., von Cossel M., Clifton-Brown J. (2020). Implementing miscanthus into farming systems: A review of agronomic practices, capital and labour demand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 132. doi:10.1016/j.rser.2020.110053.
 21. Akyildiz M. H., Sahil Kol H. (2010). Some technological properties and uses of paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud.) wood. *Journal of Environmental Biology* 31(3) 351-355.
 22. López F., Pérez A., Zamudio M., De Alva H. (2012). Paulownia as raw material for solid biofuel and cellulose pulp. *Biomass and Bioenergy* 45, 77-86 doi:10.1016/j.biombioe.2012.05.010.
 23. Hecker U. (2008). *Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie*.
 24. Jakubowski M. (2022). Cultivation Potential and Uses of Paulownia Wood: A Review. *Forests* 2022 13(5), 668. doi.org/10.3390/f13050668
 25. Rafighi A., Tabarsa T. (2011). Manufacturing High Performance Wood Composite Panel from Paulownia. *Key Engineering Materials*. 471-472:1091-1094. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.1091.
 26. Mohamad M. E., Awad A. A., Majrashi A., Abd Esadek O. A. (2022). In vitro study on the effect of cytokines and auxins addition to growth medium on the micro-propagation and rooting of Paulownia species (*Paulownia hybrid* and *Paulownia tomentosa*). *Saudi Journal of Biological Sciences* 29(1). 1598-1603. doi:10.1016/j.sjbs.2021.11.003.
 27. Skwiercz A. T., Zapłowska A., Litwińczuk W., Stefanovska T. (2022). Plant Parasitic Nematodes on Paulownia tomentosa in Poland. *Journal of Horticultural Research*. doi:10.20944/preprints202001.0047.v1.
 28. Buzan R. L., Maxim A., Odagiu A., Balint C. (2018). Paulownia sp. Used as an Energetic Plant, for the Phytoremediation of Soils and in Agroforestry Systems. *Academic Journal*. doi:10.3390/toxics10080465
 29. Esteves B., Cruz-Lopez L., Viana H., Ferreira J. V. (2022). The Influence of Age on the Wood Properties of Paulownia tomentosa (Thunb.) Steud. *Toxics* 10(8). doi:10.3390/f13050700.

30. Yue H. N., Wu Y. F., Shi Y. Z., Wu K. K. (2008). First report of paulownia witches'-broom phytoplasma in China. *Plant Disease* 92(7), 1134-1134. doi:10.1094/PDIS-92-7-1134A.
31. Aloï F., Riolo M., La Spada F., Bentivenga G. (2021). Phytophthora Root and Collar Rot of Paulownia, a New Disease for Europe. *Forests* 2021 12(12), 1664. doi:10.3390/f12121664.
32. Skwiercz A. T., Dobosz R., Flis L., Damszel M. (2019). First report of Meloidogyne hapla on Paulownia tomentosa in Poland. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* 88(3). doi:10.5586/asbp.3628.
33. Lv S., Wang R., Xiao Y., Li F. (2019). Growth, yield formation, and inulin performance of a non-food energy crop, Jerusalem artichoke (Helianthus tuberosus L.), in a semi-arid area of China. *Environment Biodiversity and Soil Security* 4(4). doi:10.1016/j.indcrop.2019.03.064.
34. Pan L., Sinden M. R., Kennedy A. H., Chai H. (2009). Bioactive constituents of Helianthus tuberosus (Jerusalem artichoke). *Phytochemistry Letters* 2(1), 15-18. doi:10.1016/j.phytol.2008.10.003.
35. Sawicka B., Skiba D., Bienia B., Kiełtyka-Dadasiewicz A. (2019). Jerusalem Artichoke (Helianthus Tuberosus L.) as Energy Raw Material. *Research and Innovation for Bioeconomy* 2019(1). doi:10.15544/RD.2019.042.
36. Nacoon S., Jogloy S., Riddech N., Mongkolthanaruk W. (2020). Interaction between Phosphate Solubilizing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth Promotion and Tuber Inulin Content of Helianthus tuberosus L. *Scientific Reports* 10(1). doi:10.1038/s41598-020-61846-x.
37. Zapałowska A., Skwiercz A. (2018). Populations of parasitic nematodes colonizing Jerusalem artichoke (Helianthus tuberosus L.). *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* 87(2). doi:10.5586/asbp.3578.
38. Gunnarson, S. (1985). Jerusalem artichoke (Helianthus tuberosus L.) for biogas production. *Biomass*. doi:10.1016/0144-4565(85)90036-8.
39. Gunnarsson I. B., Svensson S., Johansson E., Karakashev D. (2014). Potential of Jerusalem artichoke (Helianthus tuberosus L.) as a biorefinery crop. *Industrial Crops and Products* 56, 231-240. doi:10.1016/j.indcrop.2014.03.010.
40. Koppenhöfer A. M. (2007). Field Manual of Techniques in Invertebrate Pathology. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. doi:10.1007/978-1-4020-5933-9.
41. Machado R., Heinrich von Reuss S. (2022). Chemical Ecology of Nematodes. *Chemical Ecology* 76(11), 945. doi:10.2533/chimia.2022.945.
42. Zhao J., Li D., Fu S., He X. (2016). Using the biomasses of soil nematode taxa as weighting factors for assessing soil food web conditions. *Ecological Indicators* 60, 310-316. doi:10.1016/j.ecolind.2015.06.003.
43. Taylor, R. (2019). *Taylor's Power Law: Order and Pattern in Nature*. Academic Press.
44. Sochová I., Hofman J., Holoubek I. (2006). Using nematodes in soil ecotoxicology. *Environment International* 32(3), 374-383. doi:10.1016/j.envint.2005.08.031.
45. Morand S., Nadler S., Skorpington A. (2015). Nematode life-traits diversity in the light of their phylogenetic diversification. *Parasite Diversity and Diversification*, 473-479. doi:10.1017/CBO9781139794749.017.
46. Hailu F. A., Hailu Y. A. (2020). Agro-Ecological Importance of Nematodes (Round Worms). *Acta Scientific Agriculture* 4(1), 156-162. doi:10.31080/ASAG.2020.04.agro-ecological-importance-of-nematodes-round-worms.
47. Shavkatovna, K. N. (2023). Taxonomy and ecology of phytonematodes of some plants growing in the greenhouse. *International Multidisciplinary Journal for Research & Development* 10(11).<https://www.ijmrd.in/index.php/imjrd/article/view/267>

48. Cunningham S. D., Shann J. R., Crowley D., Anderson T. (1997). Phytoremediation of Contaminated Water and Soil 1, 2-17. doi:10.1021/bk-1997-0664.ch001.
49. Römken P., Bouwman L., Japenga J., Draaisma C. (2002). Potentials and drawbacks of chelate-enhanced phytoremediation of soils. *Environmental Pollution* 116(1), 109-121. doi:10.1016/S0269-7491(01)00150-6.
50. Raskin I., Ensley B. (1999). Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up the Environment.
51. Ferris, H. (2010). Contribution of Nematodes to the Structure and Function of the Soil Food Web. *Journal of Nematology* 42(1), 63-67.
52. Khandelwal G., Chaudhary V., Iyer R., Dwivedi A. (2022). Soil Bacteria and Nematodes for Bioremediation and Amelioration of Polluted Soil. Microbial and Biotechnological Interventions in Bioremediation and Phytoremediation, 353-386. doi:10.1007/978-3-031-08830-8_3.
53. Bouwman, L. A. (1994). The ecology of bacterivorous protozoans and nematodes in arable soil. *Agriculture Ecosystems & Environment* 51(1), 145-160. doi.org/10.1016/0167-8809(94)90040-X.
54. Rehman P., Nazir R., Naqvi T., Pervez A. (2018). Bacterial feeder Nematodes: Facilitator or competitor for Plant Phosphorus in soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 18. doi:10.4067/S0718-95162018005003203.
55. Moura G., Franzener G. (2017). Biodiversity of nematodes biological indicators of soil quality in the agroecosystems. doi:10.1590/1808-1657000142015.
56. Li J., Wu X., Gebremikael M. T., Wu H. (2018). Response of soil organic carbon fractions, microbial community composition and carbon mineralization to high-input fertilizer practices under an intensive agricultural system. doi:10.1371/journal.pone.0195144.
57. Gebremikael M. T., Steel H., Buchan D., Bert W. (2016). Nematodes enhance plant growth and nutrient uptake under C and N-rich conditions. doi:10.1038/srep32862
58. Parr McQueen J., Treonis A. M. (2019). Cacao agroforestry in Belize: Effects on soil nematode community structure. *Agroforestry Systems* 94, 1123–1132. doi:10.1007/s10457-019-00477-2.
59. Renčo M., Gömöryová E., Čerevková A. (2020). The Effect of Soil Type and Ecosystems on the Soil Nematode and Microbial Communities. *Helminthologia* 57(2), 129-144. doi:10.2478/helm-2020-0014.
60. Liu T., Hu F., Li H. (October 2019 p.). Spatial ecology of soil nematodes: Perspectives from global to micro scales. *Soil Biology and Biochemistry* 137. doi:10.1016/j.soilbio.2019.107565.
61. Alasmay Z., Todd T., Hettiarachchi G., Stefanovska T. (2020). Effect of Soil Treatments and Amendments on the Nematode Community under Miscanthus Growing in a Lead Contaminated Military Site. *Agronomy* 2020 10(1727), 1-18. doi:10.3390/agronomy10111727.
62. Preez G. D., Daneel M., Goede R. D., Ferris H. (2022). Nematode-based indices in soil ecology: Application, utility, and future directions. *Soil Biology and Biochemistry* 169. doi:10.1016/j.soilbio.2022.108640.
63. Zhao C., Shao Y., Lu H., Classen A. (2024). Drought shifts soil nematode trophic groups and mediates the heterotrophic respiration. *Journal of Plant Ecology* 17(2). doi:10.1093/jpe/rtae012.
64. Rohini Ekanayake, H. M. (1996). Nematode Parasites on Agricultural Crops and Their. *JIRCAS Journal* 4, 29-39.
65. Cumagun C. J. R., Moosavi M. (2015). Significance of biocontrol agents of phytonematodes. *Biocontrol Agents of Phytonematodes* 2, 50-78. doi:10.1079/9781780643755.0050.
66. Briar S. S., Wichman D., Reddy G. (2016). Plant-Parasitic Nematode Problems in Organic Agriculture. *Organic Farming for Sustainable Agriculture*, 107-122.

- doi:10.1007/978-3-319-26803-3_5.
67. Ntalli N., Adamski Z., Doula M., Monokrousos N. (2020). Nematicidal Amendments and Soil Remediation. *Plants* 2020 9(4), 429. doi:10.3390/plants9040429.
68. Zhilina, T. M. (2012). Monitoring of the soil nematodes populations status of in natural and anthropogenic transformation coenoses. *Naukovyi visnyk UzhNU Seriya: Biologiya* Vypusk 32.
69. Nabih M. I., Bloem G., Poiesz T. (1997). Conceptual Issues in the Study of Innovation Adoption Behaviour. *Advances in Consumer Research*. <https://www.tcrweb-site.org/volumes/8041/volumes/v24/NA-24>
70. Georgieva, S., McGrath S., Hooper D., Chambers B. (2002). Nematode Communities under Stress: The Long-Term Effects of Heavy Metals in Soil Treated with Sewage Sludge. *Applied Soil Ecology* 20(1), 27-42. doi:10.1016/S0929-1393(02)00005-7.
71. Zhang X., Zhu A., Xin X., Yang W., Zhang J., Ding S. (2018). Tillage and residue management for long-term wheat-maize cropping in the North China Plain: I. Crop yield and integrated soil fertility index. *Field Crops Research* 221, 157-165. doi:10.1016/j.fcr.2018.02.025.
72. Satyendra, K. P., Phillips G., Bernard E. (2022). Increasing Levels of Physical Disturbance Affect Soil Nematode Community Composition in a Previously Undisturbed Ecosystem. *The Journal of Nematology* 54(1). doi:10.2478/jofnem-2022-0022.
73. Yeates, G. W. (2003). Nematodes as soil indicators: functional and biodiversity aspects. *Biology and Fertility of Soils* 37(4), 199-210. doi:10.1007/s00374-003-0586-5.
74. Wajid Khan M., Pathak K. (1993). Nematodes as vectors of bacterial and fungal plant pathogens. doi:10.1007/978.
75. Singh S., Awashti L., Jangre A., Nirmalkar V. (2020). Transmission of plant viruses through soil-inhabiting nematode vectors. *Applied Plant Virology*, 291-300. doi:10.1016/B978-0-12-818654-1.00022-0.
76. Nykyri J., Fang X., Dorati F., Bakr R. (2013). Evidence that nematodes may vector the soft rot-causing enterobacterial phytopathogens. *Plant Pathology* 63(4), 747-757. doi:10.1111/ppa.12159.
77. Shokoohi, E. (2024). Interactions of Free-Living Nematodes and Associated Microorganisms with Plant-Parasitic Nematodes. *Sustainable Management of Nematodes in Agriculture, Vol.2: Role of Microbes-Assisted Strategies*, 127-147. doi:10.1007/978-3-031-52557-5_5.
78. Mekete T., Lopez-Nicora H. (2011). Plant-Parasitic Nematodes Are Potential Pathogens of *Miscanthus × giganteus* and *Panicum virgatum* Used for Biofuels. *Plant Disease* 95(4), 413-418. doi:10.1094/PDIS-05-10-0335.
79. Stefanovska T., Skwiercz A., Pidlisnyuk V., Zhukov O., Shapoval O. (2023). Can Nematode Communities Work as an Indicator of Soil Health in a Multiyear *Miscanthus × Giganteus* Plantation Growing in Lead-Contaminated Soil? *Agronomy* 13(6), 1620. doi:10.3390/agronomy13061620.
80. Sharma, V. (1999). Root-knot nematodes of *Paulownia* and their management. *Indian Journal of Forestry* 22(1), 149-154.
81. Todd, T. C. (2006). Sentinel nematodes of land-use change and restoration in tall-grass prairie. *J. Nematol* 38(1), 20-27.
82. Mekete, T. (2011). Plant Disease / April 2011 413 Plant-Parasitic Nematodes Are Potential Pathogens of *Miscanthus × giganteus* and *Panicum virgatum* Used for Biofuels. *The American Phytopathological Society* 95(4), 413-418. doi:10.1094/PDIS-05-10-0335
83. Neher, D. A. (2001). Role of Nematodes in Soil Health and Their Use as Indicators. *The Journal of Nematology* 33(4), 161-168.

Lutsiuk A. (2024).

PHYTOPARASITIC NEMATODES OF THREE ENERGY CROPS FOR BIOFUEL PRODUCTION

BIOLOGICAL SYSTEMS: THEORY AND INNOVATION, 15(2): 60-75.

<https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Biologiya/article/view/49738>

[http://dx.doi.org/10.31548/biologiya15\(2\).2024.006](http://dx.doi.org/10.31548/biologiya15(2).2024.006)

Abstract. The literature review focuses on a comprehensive analysis of scientific research aimed at studying the interaction of phytoparasitic nematodes with energy crops such as *Miscanthus*, Jerusalem artichoke, and paulownia, as well as examining the factors influencing the spread of these nematodes in cultivation systems of three biofuel crops: giant *Miscanthus*, velvetleaf, and Jerusalem artichoke. The research is grounded in analyzing the interaction between nematodes and the yield of these crops, along with the potential positive impact of nematode communities from different trophic groups on soil quality and phytoremediation. Special attention is given to phytoparasitic nematodes, which are among the most widespread soil pests of plants. Considering the interaction between nematodes and energy crops is crucial for developing resilient and efficient cultivation systems that ensure high yields and preserve the biodiversity of soil ecosystems. The research concludes that phytoparasitic nematodes have a significant negative impact on the cultivation of energy crops, particularly giant *Miscanthus*. However, certain climatic, chemical, and physical conditions are conducive to the formation of nematode communities that can positively affect soil quality and maintain its fertility.

The review provides an overview of three energy crops for biofuel production (giant *Miscanthus*, velvetleaf, and Jerusalem artichoke), highlighting the nematode pests associated with each of these crops, which have been found in the rhizosphere of plants over many years of published research. Attention is also given to the negative impact of phytoparasitic nematodes on the cultivation of energy crops, especially *Miscanthus*. However, it has been observed that certain climatic, chemical, and physical conditions favor the formation of nematode communities that can positively influence soil quality and maintain its fertility.

This work is significant for the development of strategies to manage the population levels of various trophic levels of nematodes, especially phytoparasitic ones, particularly in the context of cultivating promising energy crops for biofuel production. Additionally, the review describes the important influence of phytoremediation on the population of nematode communities in the soil. The obtained results can serve as a basis for further research in this field and the implementation of effective methods to preserve soil fertility and increase the productivity of energy crops. Furthermore, the findings of this literature review can contribute to the development of environmentally sustainable methods for cultivating energy crops, thereby aiding in the conservation of natural resources and reducing the impact of agricultural activities on the environment.

Key words: phytoparasitic nematodes, energy crops, phytoremediation, *Miscanthus giganteus*, *Paulownia tomentosa*, Jerusalem artichoke, biofuel.

ВИВЧЕННЯ ТА ОЦІНКА БІОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПРЕПАРАТУ ТАЕГРО WP, ЗП НА СУНИЦІ В УМОВАХ АГРОПРОМИСЛОВОГО СЕКТОРУ ТА ПРИСАДИБНИХ ДІЛЯНОК

О.О. СИКАЛО,

*кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри ентомології,
інтегрованого захисту та карантину рослин*

E-mail: movchanoksana22@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0403-2101>

Б.І. ШПАК,

*здобувач вищої освіти освітнього ступеня «Магістр» спеціальності
«Захист і карантин рослин»*

E-mail: shpak.nmu@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9273-8544>

*Національний університет біоресурсів та природокористування
України, м. Київ, Україна*

Анотація. Враховуючи гармонізацію медико-санітарних нормативів до європейських вимог, перегляд всієї бази засобів захисту рослин, розробка, вивчення та впровадження нових біопрепаратів є актуальним завданням. Використання засобів захисту рослин є основним методом боротьби з хворобами рослин до і після збору врожаю. Фунгіциди, які використовуються виключно для боротьби з *Botrytis cinerea*, займають 10% світового ринку фунгіцидів. На сьогоднішній день фунгіцидні препарати проти «сірої гнилі» мають складнощі щодо їх застосування на суниці, тривалий термін до збирання врожаю; неможливість обробки перед закладанням на зберігання; неможливість обробки стиглих ягід; застосування заборонених діючих речовин в ЄС; максимально допустимі рівні залишкових кількостей діючих речовин. Вирішенням означених проблем може бути застосування біопестицидів. Досліджуваний біопрепарат Таегро, ЗП містить бактерії *Bacillus amyloliquefaciens* штаму FZB24 з титром концентрації – 130 г/кг (5×10^{10} КУО/г).

Для досягнення та оцінки поставлених завдань було використано такі наукові методи досліджень: аналізу, синтезу, індукції, дедукції та систематизації, натурний експеримент, фізико-хімічні, органолептичні, санітарно-мікробіологічні, методи статистичного аналізу та математичного моделювання.

Технічна ефективність фунгіциду Таегро WP, ЗП в пригніченні ураження ягід суниці сірою гниллю в насадженнях, з нормою його свикористання 0,18 та 0,37 кг/га, становила 70,60 і 81,05 % відповідно. Застосування препарату Таегро WP, ЗП з нормою витрати 0,18 і 0,37 кг/га сприяло підвищенню урожайності суниці до 10,05, 10,34 т/га при урожайності в контрольному варіанті 8,65 т/га.

В ряді натурних експериментів встановлено, що фунгіцид Таегро WP, ЗП з нормами витрат 0,18 і 0,37 кг/га в умовах промислового виробництва та з нормою витрати 3,7 г/ 5 л води / 1 сотка в умовах приватних підсобних господарств має високу технічну ефективність проти ураження суниці. Обробка насаджень суниці садової в дрібноділянковому досліді дала змогу зберегти значну частину врожаю.

Ключові слова: біологічна ефективність, пестициди, суниця, сіра гниль.

Вступ.

В усьому світі використання хімічних препаратів є основним засобом боротьби з хворобами рослин як до, так і після збору врожаю. Фунгіциди, які використовуються виключно для боротьби з *Botrytis cinerea*, займають 10% світового ринку фунгіцидів (Abbey, J.A. та ін., 2019). Для боротьби з хворобами рослин, спричиненими *B. cinerea*, використовуються кілька груп синтетичних діючих речовин ботрицидів, зокрема, дихлофлуанід і тирам, які є більш старими та мають широкий спектр дії. Серед нових - більш специфічних діючих речовин, відзначають флуазинам, боскалід, карбендазим, діетофенкарб, діклоран, іпродіон, процимідон і вінклозолін (Перелік пестицидів і агрохімікатів, 2024).

Однак, навіть серед великого різноманіття ботрицидів різними за способами дії, може мати місце наявність стійких штамів *B. cinerea*, оскільки цей гриб здатний генерувати та накопичувати мутації у своєму геномі, які дозволяють йому виживати в навколишньому середовищі, що призводить до значного ураження посівів у всьому світі (Harper, L.A.

та ін., 2022). Окрім цього, споживачі усе більше віддають перевагу органічним продуктам харчування, у виробництві яких не використовують хімічні засоби захисту рослин.

На сьогоднішній день усі зареєстровані фунгіцидні препарати проти «сірої гнилі» в Україні мають певні складнощі щодо можливості їх застосування на суниці (EU Pesticides Database, 2024, БайєрКропСайєнс, 2024, Сумі Агро, 2024, Сингента. Світч., 2024): тривалий термін до збирання врожаю; неможливість обробки перед закладанням на зберігання; неможливість обробки стиглих ягід, бо вони вживаються сирими; заборона діючих речовин в ЄС; значення максимально допустимих рівнів (МДР) залишкових кількостей діючих речовин, що значно перевищують встановлені у Європейському Союзі рівні (EU MRL).

Альтернативою хімічним засобам захисту, що дозволить вирішити більшість означених проблем, може стати застосування біопестицидів.

Біопестициди складають особливу групу діючих речовин для захисту рослин, які зустрічаються в природі або є ідентичними природним синтетичним речовинам. Також до них

відноситься ряд мікро- та макроорганізмів (організми біоконтролю).

Досліджуваний нами препарат Таєгро, ЗП складається виключно з бактерій *Bacillus amyloliquefaciens* штаму FZB24 та має ряд переваг: титр концентрації – 130 г/кг (5×10^{10} КУО/г), що дає можливість застосовувати вказаний препарат з меншими нормами витрат; планується до застосування на широкому спектрі культур: зернових, овочевих, ягідних; дає можливість проводити як обробки до закладання на зберігання у складі інтегрованої системи захисту (разом із обробкою синтетичними фунгіцидами у період вегетації), так і повного циклу обробки, починаючи з різноманітних фаз росту рослини і закінчуючи плодами на зберіганні (M. Zuffa, 2020).

Метою роботи було вивчити та оцінити біологічну ефективність застосування препарату Таєгро WP, ЗП на суниці для підтвердження переваг застосування запропонованої формуляції.

Матеріали та методика досліджень

Біологічні випробування препарату Таєгро, ЗП проведено на суниці в умовах промислового виробництва у Фастівському районі Київської області, смт. Новосілки, Інституті садівництва НААН України (дослід 1); в м. Київ, НУБіПУ, НЛ «Плодоовочевий сад» (дослід 2); в Деражнянському районі Хмельницької області, с. Голосків (дослід 3); в Макарівському районі Київської області, с. Фасова, ТОВ «БЕСТ БЕРІ» (дослід 4); в умовах присадибних ділянок – в Деражнянському районі Хмельницької області, с. Голосків (правобережна частина західного Лісостепу);

Метеорологічні показники в період проведення дослідів наведені в таблиці 1. Дослідження на полуниці у умовах промислового виробництва проводили з травня по червень 2023 р. на суниці садовій сорту Мальвіна. Схема висаджування рослин: 0,9×0,3 м. На 1 га висаджувалося до 55555 штук рослин. Обприскування рослин проводили у фазі вегетації суниці BBCH 55-59, BBCH 65-67, BBCH 71-72, BBCH 81-89.

Обробку проведено чотирикратно з червня по липень за допомогою мотообприскувача Stihl (SR 450) з витратою робочої рідини 600 л/га.

Дослідження на полуниці у умовах присадибних ділянок проводили з травня по серпень 2023 р. на суниці садовій сорту Аліна. Схема висаджування рослин: 0,9×0,4 м. На 1 га висаджувалося до 50 тис. рослин. Обприскування рослин проводили у фазі вегетації суниці: BBCH 67; BBCH 71; BBCH 73; BBCH 81.

Отримані дані піддавали статистичній обробці методами варіаційної статистики з розрахунком середнього арифметичного значення, дисперсії, середнього квадратичного відхилення та похибки. Достовірність розбіжностей (перевірку гіпотези про рівність середніх двох незалежних вибірок) оцінено за t-критерієм Ст'юдента (з поправкою Бонферроні) або не параметричних критеріїв у випадку відмінності законорозподілу від нормального (Kruskal–Wallis) (Антомонов М.Ю., 2018).

Результати дослідження та їх обговорення.

В умовах промислового виробництва фунгіцид Таєгро WP, ЗП випробовували з нормою витрати 0,18

1. Метеорологічні дані в період вегетації культури

(Інститут садівництва НААН України, смт. Новосілки, Фастівський район Київської області, 2023 р.)

Основні показники	Місяці		
	травень	червень	липень
Температура повітря, °C			
а) середня багаторічна	15,3	18,6	20,8
б) поточного року	16,7	20,1	21,6
в) відхилення від багаторічних	+1,4	+ 1,5	+ 0,8
Опади, мм			
а) середні багаторічні	55,0	83,1	69,5
б) поточного року	0,6	38,1	72,7
в) відхилення від багаторічних	- 54,4	- 45,0	+3,2

і 0,37 кг/га. Нами встановлена його висока ефективність на суниці проти сірої гнилі (*B. cinerea*). Так, ураження ягід хворобою в контрольному варіанті (без обприскування) було в межах від 0,5% на початку дозрівання плодів (ВВСН 71) та до 11,5% в кінці плодоношення (ВВСН 81-89). Водночас, у варіантах де фунгіцид Таегро WP, ЗП застосовувався з нормою витрати 0,18 і 0,37 кг/га ураження ягід було в межах від 0 до 5,3 % та від 0 до 4,8 % відповідно до часу проведення зазначених обліків на початку дослідів (ВВСН 55-59) та в кінці його проведення (ВВСН 81-89).

Невисокий рівень ураження ягід суниці сірою гниллю у контрольному варіанті на початку плодоношення (ВВСН 71) обумовлений дефіцитом опадів у травні 0,6 мм з відхиленням майже до 54,4 мм відповідно до багаторічних показників, у червні - 38,1 мм з відхиленням до 45,0 мм відповідно. Збільшення ураження ягід сірою гниллю в кінці плодоношення (ВВСН 81-89) суниці в контрольному варіанті до 11,5 % відбулось за рахунок більшої кількості опадів 72,7 мм і

перевищення середньо багаторічних показників на 3,2 мм.

Технічна ефективність фунгіциду Таегро WP, ЗП проти сірої гнилі в насадженнях суниці з нормою витрати 0,18 та 0,37 кг/га, становила 70,60 і 81,05% відповідно.

Застосування препарату Таегро WP, ЗП з нормою витрати 0,18 і 0,37 кг/га сприяло підвищенню урожайності суниці до 10,05, 10,34 т/га відповідно при урожайності 8,65 т/га в контрольному варіанті (табл. 2).

Препарат Таегро WP, ЗП з нормою витрати 0,18 і 0,37 кг/га не мав негативного впливу на ріст та розвиток суниці, не виявив фітотоксичної дії по відношенню до культурних рослин та має високу технічну ефективність проти ураження суниці сірою гниллю.

У дослідження, проведених в умовах присадибних ділянок на суниці садовій сорту Аліна у вегетаційний період 2023 року розвиток сірої гнилі в контролі був на рівні 2,5% (табл. 3). Технічна ефективність на 7-й день після першого обприскування фунгіциду Таегро WP, ЗП з нормою 3,7 г на

2. Ураження ягід сірою гниллю (*B. cinerea*) при випробуваннях фунгіциду Таєгро WP, ЗП в насадженнях суниці (сорт Мальвіна, Фастівський район Київської області, 2023 р.)

Варіант	Фіто-токсичність, %	Повторність	Обліки ураження плодів, %					Технічна ефективність, %	Урожайність т/га
			21.06.	29.06.	10.07.	22.07.	28.07.		
КОНТРОЛЬ без обприскування	0	1	1	4	4	4	12	-	8,55
		2	0	4	5	6	9	-	8,96
		3	1	5	4	8	15	-	7,88
		4	0	3	4	5	10	-	9,21
		С	0,5	4,0	4,3	5,8	11,5	-	8,65
ТАЕГРО WP, ЗП НВ – 0,180 кг/га	0	1	0	0	2	3	3	74,9	10,50
		2	0	2	2	2	5	64,9	9,33
		3	0	2	1	1	7	69,6	10,38
		4	0	1	1	2	6	72,9	9,99
		С	0,0	1,3	1,5	2,0	5,3	70,60	10,05
ТАЕГРО WP, ЗП НВ – 0,370 кг/га	0	1	0	1	1	1	4	79,9	9,85
		2	0	1	2	1	5	73,4	9,77
		3	0	0	0	1	4	89,6	11,12
		4	0	0	1	1	6	81,4	10,61
		С	0,0	0,5	1,0	1,0	4,8	81,05	10,34

Примітки: НВ – норма витрати, С – середнє значення.

5 л води на 1 сотку становила 64,8%.

Відмічено, що на 7-й день після другого обприскування, ураження рослин сягало – 4,9% для сірої гнилі, а технічна ефективність фунгіциду Таєгро WP, ЗП з нормою витрати 3,7 г на 5 л води на 1 сотку становила 66,6% (табл. 3-4).

На 7-й день після третього обприскування розвиток сірої гнилі плодів у контролі на суниці садовій становив 5,6%, а показник ефективності препарату Таєгро WP, ЗП з нормою витрати 3,7 г на 5л води на 1 сотку був на рівні 64,5%.

Відмічено, що на 7-й день після четвертого обприскування розвиток сірої гнилі суниці садової в контро-

лі був на рівні 8,3 %. За такого рівня розвитку хвороби технічна ефективність препарату Таєгро WP, ЗП з нормою 3,7 г на 5л води на 1 сотку становила 65,1%.

Обробка насаджень суниці садової в дрібноділянковому досліді дала змогу зберегти значну частину врожаю. Збережений врожай при застосуванні фунгіциду Таєгро WP, ЗП з нормою витрати 3,7 г на 5л води на 1 сотку становив 3,44 т/га.

Висновки та рекомендації.

1. Враховуючи процеси євроінтеграції України, до яких відноситься і гармонізація медико-санітарних

3. Ураження ягід сірою гниллю (*B. cinerea*) при випробуваннях фунгіциду Таєгро WP, ЗП в насадженнях суниці (сорт Аліна, Хмельницька обл., 2023 р.)

Варіант	Повтор-ність	Розвиток хвороб, %			
		<i>Botrytis cinerea</i>			
		після 1-ї обробки	після 2-ї обробки	після 3-ї обробки	після 4-ї обробки
		7 день	7 день	7 день	7 день
Контроль	1	2,0	3,0	5,5	8,0
	2	2,5	3,0	4,5	6,0
	3	3,0	4,5	6,5	10,0
	4	2,5	3,0	6,0	9,0
	C	2,5	3,4	5,6	8,3
ТАЕГРО WP, ЗП. НВ – 3,7 г/ 5л води / 1 сотка	1	1,0	1,0	1,5	3,0
	2	1,0	1,5	2,0	2,5
	3	0,5	1,0	2,0	3,0
	4	1,0	1,0	2,5	3,0
	C	0,9	1,1	2,0	2,9

Примітки: НВ – норма витрати, С – середнє значення.

4. Ефективність фунгіциду ТАЕГРО WP, ЗП проти сірої гнилі (*B. cinerea*) (сорт Аліна, Хмельницька обл., 2023 р.)

Варіант	Повтор-ність	Технічна ефективність після обробки, %				Урожай-ність, т/га
		Botrytis cinerea				
		1ї	2-ї	3-ї	4-ї	
		7 день	7 день	7 день	7 день	
Контроль	1	2,0	3,0	5,5	8,0	4,20
	2	2,5	3,0	4,5	6,0	5,10
	3	3,0	4,5	6,5	10,0	3,70
	4	2,5	3,0	6,0	9,0	3,85
	C	2,5	3,4	5,6	8,3	4,21
ТАЕГРО WP, ЗП. 3,7 г/ 5л води / 1 сотка	1	60,0	70,4	73,4	63,6	7,40
	2	60,0	55,6	64,5	69,7	7,10
	3	80,0	70,4	64,5	63,6	8,10
	4	60,0	70,4	55,6	63,6	8,00
	C	64,8	66,6	64,5	65,1	7,65
НІР ₀₅		-	-	-	-	0,97

Примітки: С – середнє значення.

нормативів та перегляд всієї бази засобів захисту рослин, розробка, вивчення та впровадження нових біопрепаратів є надзвичайно актуальним і перспективним завданням.

2. Усі фунгіцидні препарати проти сірої гнилі (*Botrytis cinerea*) в Україні мають значні недоліки: тривалий термін до збирання врожаю, який значно перевищує тривалість лікувальної та захисної дії; неможливість обробки перед закладанням на зберігання; неможливість обробки стиглих ягід; заборона діючих речовин в ЄС, що в призведе потенційно до їх заборони в Україні в найближчому майбутньому; значення МДР значно перевищують EU MRL, що суперечить вимогам гармонізації нормативної бази. Та спонукає до пошуку нових біологічних препаратів.

3. В ряді натурних експериментів встановлено, що фунгіцид Таєгро WP, ЗП з нормами витрат 0,18 і 0,37 кг/га в умовах промислового виробництва та з нормою витрати 3,7 г/ 5л води / 1 сотка в умовах присадибних ділянок має високу технічну ефективність проти ураження суниці сірою гниллю (*Botrytis cinerea*).

References

1. Abbey, J.A., Percival, D., Abbey, L., Asiedu, S.K., Prithiviraj, B., Schilder, A. (2019). Biofungicides as alternative to synthetic fungicide control of grey mould (*Botrytis cinerea*) – prospects and challenges. *Bio-control Sci. Technol*, 29, 241–262. DOI:10.1080/09583157.2018.1548574.
2. List of pesticides and agrochemicals approved for use in Ukraine (2024). Electronic resource [https://data.gov.ua/dataset/389ddb5a-ac73-44bb-9252-f899e4a97588].
3. Harper, L.A., Paton, S., Hall, B., McKay, S., Oliver, R.P., Lopez-Ruiz, F.J. (2022). Fungicide resistance characterized across seven modes of action in *Botrytis cinerea* isolated from Australian vineyards. *Pest Manag. Sci*, 78, 1326–1340. DOI:10.1002/ps.6749
4. EU Pesticides Database. Retrieved May 20, 2024, from https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database_en.
5. BayerCropScience. May 20, 2024, from https://www.cropscience.bayer.ua.
6. Sumy Agro. Topsyn-M. May 20, 2024, from https://www.summit-agro.com.ua/product/zagalnij-katalog-produktiv/topsin-m-500-ks.
7. Syngenta. Switch May 20, 2024, from https://www.syngenta.ua/svitch-dlya-dach-ta-gorodiv.
8. Agrarians together. Biologic SINSMART, KC. May 20, 2024, from https://agrarii-ransom.com.ua/preparations/sinsmart-ks.
9. Antomonov M.Yu. Mathematical processing and analysis of medical and biological data. 2nd edition - Kyiv: MIT "Medinform", 2018 - 579 p.
10. M. Zuffa, A. Infantino, M. Galeazzi (2020). New biofungicide *Bacillus amyloliquefaciens* strain FZB24: control experiences of powdery mildew on tomato and botrytis on grape. May 28, 2024, from https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20193521145.

Sykalo O., Shpak B. (2024).

STUDY AND ASSESSMENT OF THE OF THE TAEGR WP APPLICATION ON STRAWBERRIES BIOLOGICAL EFFECTIVENESS IN THE CONDITIONS OF THE AGRICULTURAL SECTOR AND PRIVATE FARMS.

BIOLOGICAL SYSTEMS: THEORY AND INNOVATION, 15(2): 76-83.

<https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Biologiya/article/view/49838>

[http://dx.doi.org/10.31548/biologiya15\(2\).2024.007](http://dx.doi.org/10.31548/biologiya15(2).2024.007)

Abstract. Today, throughout the world, the use of chemicals is the main method of combating plant diseases both before and after harvest. To date, there are certain problems with each fungicidal drug against "gray rot" in Ukraine. The solution to these problems can be the use of biopesticides, such as the researched drug Taegro, WP.

To achieve and evaluate the tasks, such scientific research methods were used as: the method of analysis, synthesis, induction, deduction and systematization, natural experiment, physico-chemical, organoleptic, sanitary-microbiological, methods of statistical analysis and mathematical modeling.

The technical efficiency of the fungicide Taegro WP in suppressing the damage of strawberry berries by gray rot in plantations, with the rate of its use of 0.18 and 0.37 kg/ha, was 70.60 and 81.05%, respectively. The use of the Taegro WP with a application rate of 0.18 and 0.37 kg/ha helped to increase the yield of strawberries to 10.05, 10.34 t/ha, while the yield in the control variant was 8.65 t/ha. It was noted that after the application of the fungicide Taegro WP with a rate of 3.7 g/ 5 l of water / 1 acre, an increase in the level of total chlorophyll in the leaves of strawberries of the garden variety Alina was observed, which was 457.5-667.5 units, which is 68.5 % higher compared to the control.

In a number of field experiments, it was established that the fungicide Taegro WP with application rates of 0.18 and 0.37 kg/ha in the conditions of industrial production and with a consumption rate of 3.7 g/ 5 l of water / 1 acre in the conditions of private auxiliary farms has a high technical efficiency against strawberry damage.

Key words: biological efficiency, pesticides, strawberry, gray rot.
