

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, фіторе-мідіація, 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 тридцяті роки 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 швидкокорослених 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-

акція 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 (Alasmary 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);
- бактерівори (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 бактерівори 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 micropropagation 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.