

Вплив культуральної рідини *Interfillum terricola* (J.B.Petersen) Mikhailyuk et al. (*Charophyta*) на алелопатичні, мікробіологічні, агрофізичні та агрохімічні властивості ґрунту

Царенко П.М.¹, Заїменко Н.В.², Дідик Н.П.^{2*}, Елланська Н.Е.²,
Павлюченко Н.А.², Іваницька Б.О.², Юношева О.П.², Демченко Е.М.¹

¹ Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України,
вул. Терещенківська, 2, Київ 01601, Україна
ptsar@ukr.net

² Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка НАН України,
вул. Тимірязєвська, 1, Київ 01014, Україна
*nataliya_didyk@ukr.net

Надійшла до редакції 05.08.2021. Після доопрацювання 16.08.2021. Підписана до друку 16.08.2021.
Опублікована 22.12.2021

Реферат. Досліджено вплив культуральної рідини харафітової водорості *Interfillum terricola* на алелопатичні, мікробіологічні, агрофізичні та агрохімічні властивості ґрунту в модельних вегетаційних дослідах. Алелопатичний режим ґрунту оцінювали методами біологічних проб для водорозчинних сполук і прямого біотестування, а також за показниками життєвого стану рослин-фітометрів пшениці озимої (*Triticum aestivum* L., сорт «Смуглянка») і кукурудзи кормової (*Zea mays* L., сорт «Кадр 267 МВ»), насіння яких висівали одразу після внесення культуральної рідини. Кількість пророслого насіння реєстрували з 3-ї по 8-му добу після посіву. Життєвий стан рослин-фітометрів оцінювали наприкінці експериментів за морфометричними показниками росту (площа поверхні листків, біомаса сухої речовини надземних частин і коренів) та вмісту фотосинтетичних пігментів у листках. По закінченні досліду відбирали зразки ґрунту для визначення цитостатичної дії водорозчинних сполук, мікробіологічного й біохімічного аналізів. Фенольні сполуки виділяли з ґрунту методом іонного обміну (десорбції) за допомогою іонообмінника КУ-2-8 (H⁺). Паралельно визначали електропровідність, окисно-відновний потенціал, рН та вміст біогенних елементів у ґрунті. Встановлено стимулюючий ефект культуральної рідини на проростання насіння, ріст та розвиток асиміляційних органів рослин пшениці та кукурудзи. Розмір ефекту не залежав від концентрації, що характерно

© Царенко П.М., Заїменко Н.В., Дідик Н.П., Елланська Н.Е., Павлюченко Н.А.,
Іваницька Б.О., Юношева О.П., Демченко Е.М., 2021

для сигнальних алелопатично активних речовин. Алелопатична та цитостатична активність ґрунту знижувалася з використанням культуральної рідини *I. terricola*. Внесення культуральної рідини суттєво впливало на чисельність мікроорганізмів різних екологічно-трофічних груп. Найменша чисельність мікроорганізмів спостерігалася за мінімальної норми внесення мікродорості, а її збільшення сприяло зростанню чисельності майже всіх досліджених груп мікроорганізмів, показників трансформації та мінералізації органічної речовини. Під впливом культуральної рідини вміст фенольних сполук у ґрунті знижувався у 1,1–1,6 разів, особливо за норми 10 мл. Оброблений культуральною рідиною ґрунт мав вищі показники трансформації та мінералізації органічної речовини, ніж необроблений. Концентрація фенольних сполук у ґрунті знижувалася, очевидно, за рахунок активізації мікробіоти й посилення внаслідок цього процесів деструкції. Зафіксовано підвищення електропровідності ґрунту при внесенні інокуляту мікродоростей, що може свідчити про виділення в субстрат йонів металів. Підтвердженням тому є збільшення вмісту Ca і Mg.

Ключові слова: *Interfillum terricola*, алелопатичні взаємодії, пшениця, кукурудза, фенольні речовини, мікробіоценоз, біогенні елементи

Вступ

Стрімке зростання чисельності населення, зменшення харчових ресурсів, виснаження сільськогосподарських земель, катастрофічне забруднення водних та наземних екосистем синтетичними агрохімікатами спонукало вчених до створення та впровадження нових ефективних, екологічно обґрунтованих та ресурсощадних біотехнологій у сільськогосподарському виробництві.

Перспективним напрямом досліджень є створення стійких агрономічно корисних консорцій сільськогосподарських рослин з мікроорганізмами. Мікродорості – одна з найдавніших груп організмів, які є обов'язковими учасниками функціонування ґрунтових ценозів (Hollerbach, Shtina, 1969; Kostikov, 1991; Ettl, Gärtner, 2014). Трофічні відносини пов'язують водорості з ґрунтовими безхребетними, бактеріями та актиноміцетами, які можуть брати участь у процесах гумусоутворення. Внесення культур водоростей у ґрунт призводить до суттєвого збільшення чисельності й різноманіття останніх, рідше спостерігається їхня токсична дія (Maltseva, 2007).

Упродовж мільйонів років вищі рослини та мікродорості еволюціонували поряд, формуючи стійкі асоціації, допомагаючи одне одному виживати за несприятливих умов середовища. Стійкі асоціації між вільноживучими мікродоростями та вищими рослинами досить поширені в природі (Jaiswal et al., 2008). Дослідження останніх років довели можливість створення стійких асоціацій між деякими штамми

вільноживучих мікроводоростей і папоротеподібних (зокрема, представників родів *Synechococcus* Nägeli, *Anabaena* Bory ex Bornet & Flahault, *Chlorogloeopsis* A.K.Mitra & D.C.Pandey, *Azolla* Lam., *Nostoc* Vaucher ex Bornet & Flahault тощо) та культурними рослинами (Sood et al., 2011).

Із судинними рослинами мікроводорості можуть бути пов'язані трофічно й/або топічно (симбіотичними, мутуалістичними та алелопатичними взаємовідносинами). Особливу роль тут відіграють такі властивості мікроводоростей, як утворення слизових піхв і колоніального слизу навколо корінців рослин, що захищають останні фізично, а також поглинають і утримують воду разом із поживними речовинами. Встановлено, що мікроводорості продукують і виділяють у навколишнє середовище велику кількість різноманітних біологічно активних речовин, зокрема й тих, що проявляють алелопатичну дію (тобто впливають на ріст та розвиток рослин і мікроорганізмів) (Chiaiese et al., 2018). Показано, що мікроводорості продукують значно більше різноманіття алелопатично активних речовин порівняно з вищими рослинами (McClintock, Baker, 2001). Серед останніх найбільш дослідженими є вуглеводи, білки, жирні кислоти, вітаміни, фенольні сполуки, пептиди та алкалоїди (Sakevych, Usenko, 2008; Kirpenko, 2013; Uysal et al., 2015).

На сьогодні дослідженню агрономічних властивостей мікроводоростей присвячена порівняно невелика кількість робіт (Nichols, 2020). Аналіз наявних даних свідчить про те, що мікроводорості є невичерпним джерелом біологічно активних сполук з різним характером дії на вищі рослини (Chiaiese et al., 2018). Був проведений скринінг 22 штамів аборигенних ціанобактерій, ізольованих з природних місцезростань, щодо їх потенціалу покращувати родючість ґрунту, підвищувати продуктивність та стійкість сільськогосподарських рослин до шкідників (Didovich et al., 2020). Автори встановили, що кожен з досліджуваних ціанобактеріальних штамів є унікальним щодо агрономічного впливу і проявляє фізіологічні особливості, які визначають ступінь та характер впливу (стимулювання/інгібування) на бактеризовані рослини в рослинно-мікробній взаємодії. Виявлено значну кореляцію між деякими фізіологічними та біохімічними параметрами штамів ціанобактерій (рН культурального середовища; активність пероксидази; вміст антиоксидантів, зокрема глутатіону та аскорбінової кислоти) та їхніми агрономічними властивостями щодо *Triticum aestivum* L. (Didovich et al., 2020).

Відомо, що аборигенні штами мікроводоростей є, як правило, ефективнішими щодо покращення родючості та механічної структури ґрунту, а також пристосованішими до конкретних едафічних та кліматичних умов порівняно зі штамми з інших регіонів (Win et al., 2018).

Виробництво агропрепаратів на основі мікроводоростей майже не потребує невідновлювальних ресурсів і не шкодить навколишньому середовищу. Мікроводорості також придатніші для біотехнологічних удосконалень, особливо для метаболічної інженерії, порівняно з іншими багатоклітинними організмами (Chiaiese et al., 2018). Однак широкому застосуванню мікроводоростей у сільському господарстві заважає відсутність достатньої наукової інформації щодо екофізіологічних механізмів взаємовідносин із судинними рослинами, мікрофлорою та мікрофауною ґрунту. Більшість досліджень присвячена незначній кількості видів мікроводоростей, зокрема представникам родів *Arthrospira* spp., *Isochrysis* spp., *Chaetoceros* spp., *Dunaliella* spp., *Chlorella* spp. (Nichols, 2020). Разом з тим, величезна різноманітність видів аборигенних мікроводоростей залишається досі не дослідженою для використання в сільському господарстві (Chiaiese et al., 2018; Nichols, 2020).

Мета цього дослідження – проаналізувати вплив культуральної рідини аборигенного штаму харафітової ґрунтової водорості *Interfillum terricola* на життєвий стан рослин пшениці та кукурудзи, алелопатичні, мікробіологічні, агрофізичні та агрохімічні властивості ґрунту в модельних вегетаційних дослідах.

Матеріали та методи

Штам харафітової мікроводорості *Interfillum terricola* (порядок *Klebsormidiales*, клас *Klebsormidiophyceae*, *Charophyta*) ізольовано зі зразків ґрунту букових пралісів Карпатського біосферного заповідника у 2020 р. Отримання біомаси мікроводоростей та вирощування дослідженого штаму проводили за єдиною схемою культивування в конічних колбах Ерленмеєра об'ємом 250 та 500 мл на мінеральному середовищі Болда (1N BBM), при рН 6,6 (Bischoff, Bold, 1963) за стандартних умов лабораторного мінікультиватора (інтенсивне культивування з постійною барботацією повітряною сумішшю) протягом 10 діб, з 12-годинним чергуванням світлової і темної фаз та освітленням 25 мкмоль фотонів · м⁻² · с⁻¹ за температури +20 ± 5 °С (Tsarenko et al., 2021). Ідентифікацію виду та морфологічні дослідження культури водорості проводили за допомогою світлового мікроскопа Olympus BX53 (Токіо, Японія) з диференціальною інтерференційною оптикою Номарського (DIC) і використанням сучасних монографічних зведень (Mikhailyuk et al., 2008; Rindi et al., 2011; Ettl, Gärtner, 2014).

У вегетаційних дослідах моделювали вплив різних концентрацій (1, 3 та 10 мл на вегетаційну посудину ємністю 0,25 л) культуральної рідини

I. terricola на проростання насіння та ріст рослин пшениці озимої (*Triticum aestivum* L., сорт «Смуглянка») і кукурудзи кормової (*Zea mays* L., сорт «Кадр 267 МВ»), мікробіоценоз, алелопатичні, біохімічні, агрохімічні та агрофізичні властивості ґрунту. Перед початком експериментів сірий опідзолений ґрунт просіювали та стерилізували за температури 100 °С протягом 4 год. В контрольний варіант замість культуральної рідини вносили стерилізовану воду в тій же кількості. Перед посівом насіння тест-рослин стерилізували 1%-ним розчином гіпохлориту натрію протягом 5 хв, з наступним прополіскуванням стерилізованою водою. Тест-рослини вирощували у фітокамері (на базі відділу алелопатії Національного ботанічного саду імені М.М. Гришка НАН України) за контрольованих умов: інтенсивності світла 3500 люкс, температури 26–28 °С, вологості ґрунту 50–60% протягом трьох тижнів. Вологість ґрунту визначали гравіметричним методом та підтримували на зазначеному рівні, поливаючи стерилізованою (за температури 100 °С протягом 15 хв) водопровідною водою.

Кількість пророслого насіння реєстрували з 3-ї по 8-му добу після посіву. Енергію проростання насіння визначали як % пророслого насіння на 3-ю та 4-у добу після посіву, для пшениці та кукурудзи – відповідно. Схожість насіння – на 7-му добу для обох культур, згідно до ДСТУ 4138 (2002). Для визначення швидкості проростання розраховували середню тривалість проростання однієї насінини за наступною формулою (Balan et al., 2014):

$$ТП = (d_1K_1 + d_2K_2 + d_iK_i) / (K_1 + K_2 + K_3 + K_i),$$

де ТП – тривалість проростання, д – дні підрахунку, К – кількість насіння, що проросло на цей день.

Наприкінці експериментів визначали морфометричні показники росту (висота надземних частин, площа поверхні листків, довжина кореневої системи, кількість бічних корінців; біомаса сухої речовини надземних частин та коренів) та вміст фотосинтетичних пігментів (хлорофілів *a*, *b* та каротиноїдів) в листках. Останні екстрагували зі свіжозібраних листків диметилсульфоксидом за температури 70 °С протягом 3 год. Кількісний вміст визначали спектрофотометрично (Wellburn, 1994) за допомогою спектрофотометра Specord 200, Analytik Jena, 2003. Розвиток фотосинтетичного апарату рослин оцінювали за результатами морфометричних вимірювань і вмістом фотосинтетичних пігментів.

Мікробіологічні аналізи проводили методом посіву ґрунтових суспензій у відповідних розведеннях на агаризовані живильні середовища за загальноприйнятими методиками (Ellanska et al., 2021). Підраховували

кількість: бактерій, які споживають переважно мінеральні (крохмаль-аміачний агар (КАА) та органічні (м'ясо-пептонний агар (МПА) сполуки азоту; мікроміцетів (середовище Чапека), актиноміцетів (КАА). Співвідношення окремих еколого-трофічних груп мікроорганізмів (коефіцієнт мінералізації – іммобілізації) розраховували за К.І. Андреюк (Andreiuk et al., 2001), показник трансформації органічної речовини визначали за В.Д. Мухомою (Mukha, 2004).

Загальна кількість колоній, яку підраховували при посівах ґрунтових суспензій, була обумовлена кількістю КУО (колонієутворюючих одиниць).

Алелопатичну активність ґрунту аналізували методами прямого біотестування та біологічних проб (водна витяжка з ґрунту 1,5 : 1) як приріст коренів крес-салату (*Lepidium sativum* L.) та огірка (*Cucumis sativus* L.) відповідно (Pavliuchenko, Jang, 2021). Цитостатичну дію водорозчинних сполук ґрунту досліджували за кількістю бічних коренів проростків *C. sativus* (Ivanov, 2011). Фенольні речовини виділяли з ґрунту методом іонного обміну (десорбції), використовуючи іонообмінник КУ-2-8 (H⁺) як модель кореневої системи з розчинною і поглинальною здатністю стосовно до рухливих органічних сполук (Pavliuchenko et al., 2021).

Вимірювання рН ґрунтового розчину після закінчення дослідів проводили на кондуктометрі Cond 315i (WTWGmbH, 2015 р.). Окисно-відновний потенціал визначали за допомогою приладу рН/ORP Meter HI 2211 (Hanna Instruments, 2005 р.). Вміст біогенних елементів у ґрунті аналізували на оптично-емісійному спектрометрі з індуктивно-зв'язаною плазмою iCAP6300 Duo (Thermo-Fisher, США, 2007 р.). Підготовку зразків ґрунту для аналізу виконували за методикою Рінккіса–Ноллендорфа (Rinkis, Nollendorf, 1982). Вміст розчинних карбонатів у ґрунтовому розчині визначали методом титрування сірчаною кислотою за додавання індикатора метилоранж до зміни забарвлення розчину з жовтого на помаранчевий (Pecheneva, 1998).

Статистичний аналіз результатів досліджень проводили з використанням дисперсійного аналізу за допомогою програмного забезпечення StatSoft Statistica 10.0 та Microsoft Office Excel 2007.

Результати та обговорення

Внесення культуральної рідини *I. terricola* позитивно впливало на енергію проростання насіння, ріст надземних частин і коренів пшениці та кукурудзи. Загалом, пшениця проявила більшу чутливість до алелопатичного впливу *I. terricola* порівняно з кукурудзою (табл. 1). Вміст фотосинтетичних пігментів не виявив достовірних змін за внесення

дослідженої культуральної рідини порівняно з контролем. Розмір стимулюючого ефекту на проростання насіння та накопичення біомаси тест-рослинами не залежав від норми внесення культуральної рідини *I. terricola*. Такий характер фізіологічної дії властивий алелопатично активним речовинам із сигнальним характером дії.

Таблиця 1. Вплив культуральної рідини *Interfillum terricola* на проростання насіння та ріст рослин пшениці та кукурудзи (середнє ± стандартна похибка)

Вид с.-г. культури	Норма внесення культуральної рідини, мл	Енергія проростання, %	Схожість, %	Середня тривалість проростання, доба	Площа поверхні листків, см ²	Середня тривалість проростання, доба	Маса сухої речовини, мг	
							надземної частини	кореня
<i>Triticum aestivum</i>	0	10 ± 0,8	85 ± 0,5	4,0 ± 0,1	9,2 ± 1,0	4,0 ± 0,1	13,7 ± 0,6	4,3 ± 0,3
	1	33 ± 0,7	83 ± 0,6	3,7 ± 0,2	12,5 ± 1,3	3,7 ± 0,2	17,9 ± 0,9	4,2 ± 0,3
	3	38 ± 0,6	88 ± 0,6	3,6 ± 0,1	13,4 ± 1,0	3,6 ± 0,1	19,1 ± 0,5	5,4 ± 0,2
	10	50 ± 0,9	83 ± 0,5	3,6 ± 0,2	14,3 ± 1,2	3,6 ± 0,2	18,5 ± 0,7	5,6 ± 0,4
<i>Zea mays</i>	0	38 ± 0,7	88 ± 0,9	4,9 ± 0,2	39,7 ± 1,7	4,9 ± 0,2	45,9 ± 1,4	20,2 ± 1,3
	1	42 ± 0,8	93 ± 0,8	4,6 ± 0,1	47,1 ± 1,4	4,6 ± 0,1	60,2 ± 1,6	29,3 ± 1,4
	3	41 ± 0,9	96 ± 0,7	4,7 ± 0,1	45,6 ± 1,8	4,7 ± 0,1	56,8 ± 1,5	24,3 ± 1,8
	10	44 ± 0,9	96 ± 0,9	4,7 ± 0,1	48,5 ± 1,3	4,7 ± 0,1	58,2 ± 1,8	23,5 ± 1,8

Стимулюючий вплив мікроводоростей на проростання насіння, ріст та продуктивність сільськогосподарських рослин представлено в низці робіт (Hastings et al., 2014; Uysal et al., 2015; Win et al., 2018). Зазвичай таку стимуляцію автори пов'язують із виділенням у навколишнє середовище фітогормонів (ауксинів, цитокинінів, амінокислот, брасінолідів тощо) (Win et al., 2018; Nichols, 2020). Разом з цим відомо, що окрім безпосереднього алелопатичного впливу мікроводорості можуть змінювати мікробіологічні, біохімічні, алелопатичні та фізичні властивості ґрунту, які в свою чергу

впливають на ріст та життєвий стан судинних рослин. Такий тип взаємовідносин відносять до опосередкованих алелопатичних взаємодій (Win et al., 2018; Nichols, 2020).

Мікробні ценози, як істотний компонент екосистем, виконують важливу біоіндикаційну функцію та стабілізаційну роль. Будучи редуцентами, мікроорганізми зумовлюють низку біохімічних процесів і стають важливим учасником перетворення різноманітних органічних і мінеральних речовин у ґрунті (Cerna et al., 2003). Враховуючи важливу роль мікробного компоненту у функціонуванні екосистем, чисельність та якісний склад деяких груп ґрунтових мікроорганізмів обрані нами як показники зміни ґрунтового середовища.

Результати аналізу ґрунтової мікрофлори показали, що кількість усіх досліджених еколого-трофічних груп мікроорганізмів, особливо мікроміцетів, під пшеницею була значно вищою, порівняно з кукурудзою (табл. 2).

Таблиця 2. Чисельність мікроорганізмів основних таксономічних та еколого-трофічних груп у зразках стерильного ґрунту (сірий опідзолений) з додаванням різної концентрації водорості *Interfillum terricola* (середнє ± стандартна похибка)

Вид с.-г. культури	Норма внесення культуральної рідини, мл	Мікроміцети, тис.	Актиноміцети, млн	Амоніфікатори, млн	Мікроорганізми, що споживають мінеральний азот, млн	Коефіцієнт мінералізації-імобілізації	Показник трансформації органічної речовини
<i>Triticum aestivum</i>	0	37,5 ± 1,7	3,3 ± 1,1	7,5 ± 1,0	15,1 ± 1,9	2,0	11,3
	1	23,2 ± 2,8	0,6 ± 0,1	5,8 ± 1,2	7,5 ± 0,5	1,3	10,2
	3	19,0 ± 3,4	4,1 ± 0,2	10,6 ± 1,5	10,2 ± 0,6	1,0	20,8
	10	20,6 ± 7,9	3,1 ± 0,3	14,1 ± 1,1	15,4 ± 1,1	1,1	26,8
<i>Zea mays</i>	0	11,6 ± 1,7	2,3 ± 0,2	5,4 ± 0,6	8,2 ± 0,8	1,5	9,1
	1	11,7 ± 3,9	2,2 ± 0,1	6,0 ± 0,2	8,5 ± 0,3	1,4	10,4
	3	11,5 ± 1,2	1,9 ± 0,2	9,4 ± 0,5	13,9 ± 1,2	1,5	15,5
	10	13,4 ± 1,1	2,2 ± 0,1	10,0 ± 0,8	15,4 ± 1,4	1,5	17,0

Пшениця та кукурудза відомі високим алелопатичним потенціалом, зумовленим присутністю бензоксазиноїдів та фенольних сполук (зокрема п-кумарової, бензойної, *транс*-4-гідроксикоричної кислот) (Guo et al.,

2016). Зазначені речовини проявляють також антифунгальну та антибактеріальну дію й беруть участь у захисті досліджених зернових культур від фітопатогенів та комах-шкідників. За літературними даними, мікроводорості, зазвичай стійкі до корневих виділень пшениці та кукурудзи. Останні навіть можуть стимулювати ріст мікроводоростей (Krafczyk et al., 1984; Kuznetsova et al., 2018). Завдяки цій особливості пшениця та кукурудза є перспективними об'єктами для створення стійких асоціацій з агрономічно корисними штамми мікроводоростей. Згідно до отриманих нами результатів, кореневі виділення кукурудзи мають сильнішу антифунгальну та антибактеріальну активність порівняно з пшеницею.

Додавання культуральної рідини в ґрунт, у якому вирощували пшеницю, спричиняло суттєве пригнічення розвитку ґрунтових грибів порівняно з контролем, особливо при внесенні 3 мл розчину. Щодо інших досліджених еколого-трофічних груп мікроорганізмів, то при додаванні мінімальної кількості культуральної рідини (1 мл) спостерігалось пригнічення розвитку актиноміцетів, амоніфікаторів та мікроорганізмів, що споживають різні форми азоту (рис. 1, див. табл. 2).

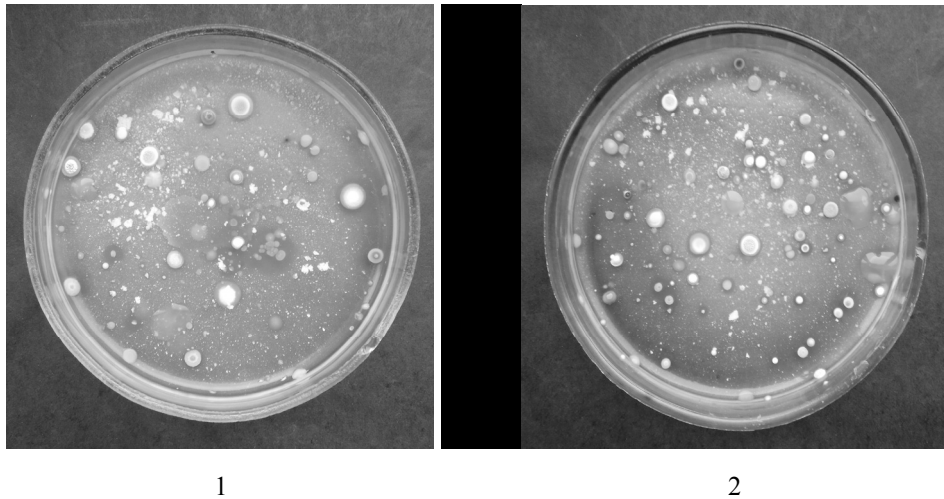


Рис. 1. Чисельність актиноміцетів та мікроорганізмів-іммобілізаторів мінерального азоту (середовище КАА) у ґрунтових зразках з-під *Triticum aestivum*: 1 – контроль; 2 – при додаванні 3 мл *Interfillum terricola* (фото Н.Е. Елланської)

Збільшення норми внесення культуральної рідини призводило до зростання чисельності досліджених груп мікроорганізмів. У деяких випадках чисельність мікроорганізмів перевищувала відповідні показники

в контролі. Таку тенденцію можна пояснити, якщо припустити, що незначна кількість *I. terricola* стимулює біосинтез та виділення в середовище навколо кореня антифунгальних та антибактеріальних алелопатично активних речовин пшеницею. Тому спостерігали пригнічення всіх досліджених груп мікроорганізмів. У разі внесення більшої кількості *I. terricola* збільшувалися обсяги детоксикації екзометаболітів пшениці мікрородорістю. Мікрородорості відомі здатністю детоксикувати антибіотики та інші токсичні речовини шляхом біоадсорбції, біоаккумуляції та біодеструкції. Нині зростає зацікавленість вчених до застосування мікрородоростей для очищення стічних вод від токсичних речовин, зокрема антибіотиків (Xiong et al., 2021).

Мікробіологічний аналіз ґрунту, на якому вирощували кукурудзу (див. табл. 1), виявив подібну закономірність. Окрім актиноміцетів, чисельність яких достовірно не змінювалася за внесення культуральної рідини, кількісні показники усіх досліджених груп мікроорганізмів достовірно зростали за внесення культуральної рідини *I. terricola* пропорційно зростанню дози внесення останнього. Прослідковується загальна тенденція у всіх варіантах дослідів: найменші показники трансформації органічної речовини у ґрунті за внесення мінімальної дози культуральної рідини *I. terricola* і зростання їх зі збільшенням концентрації (сягає контрольних показників або перевищує).

Таблиця 3. Вплив культуральної рідини *Interfillum terricola* на алелопатичні та цитостатичні властивості ґрунту з-під пшениці та кукурудзи, % контролю (середнє \pm стандартна похибка)

Вид с.-г. культури	Норма внесення культуральної рідини, мл	Цитостатична дія	Алелопатична активність	
			<i>Lepidium sativum</i>	<i>Cucumis sativus</i>
<i>Triticum aestivum</i>	1	94,6 \pm 1,9	91,5 \pm 1,8	74,7 \pm 1,5
	3	98,0 \pm 2,0	95,9 \pm 1,9	92,2 \pm 1,8
	10	108,1 \pm 2,2	111,9 \pm 2,2	99,0 \pm 2,0
<i>Zea mays</i>	1	89,6 \pm 1,8	85,2 \pm 1,7	73,2 \pm 1,5
	3	96,9 \pm 1,9	90,2 \pm 1,8	86,2 \pm 1,7
	10	110,1 \pm 2,2	115,2 \pm 2,3	108,2 \pm 2,2

Досліджували алелопатичні й біохімічні властивості ґрунту. Алелопатична активність водорозчинних сполук ґрунту змінювалася в залежності від концентрації культуральної рідини (табл. 3). Так, при нормі

внесення 1 та 3 мл встановлено пригнічення росту коренів тест-рослин *C. sativus* на 8–27%, що нівелювалося при 10 мл.

Аналогічна тенденція спостерігалася шляхом визначення алелопатичної активності ґрунту методом прямого біотестування. При цьому пригнічення ростових процесів коренів *L. sativum* складало 4–15% й було найменшим при додаванні 3 мл культуральної рідини. При нормі 10 мл переважали ріст-стимулюючі ефекти у межах 12–15%. Цитостатичні властивості фізіологічно активних сполук ґрунту характеризувалися посиленням проліферації клітин бічних коренів *C. sativus* при внесенні 10 мл культуральної рідини. Загалом, простежувалося зниження алелопатичної та цитостатичної дії фізіологічно активних сполук ґрунту на тлі збільшення концентрації культуральної рідини *I. terricola*.

Оскільки фенольні сполуки як вторинні метаболіти продукуються багатьма мікроводоростями, сільськогосподарськими культурами, у тому числі кукурудзою та пшеницею, й здатні виконувати алелопатичну функцію (Li et al., 2010), аналізували вплив культуральної рідини *I. terricola* на їхній вміст у ґрунті під досліджуваними рослинами. При внесенні 1 мл культуральної рідини спостерігалася підвищення концентрації фенольних сполук у 1,2 раза в ґрунті під пшеницею і кукурудзою (рис. 2).

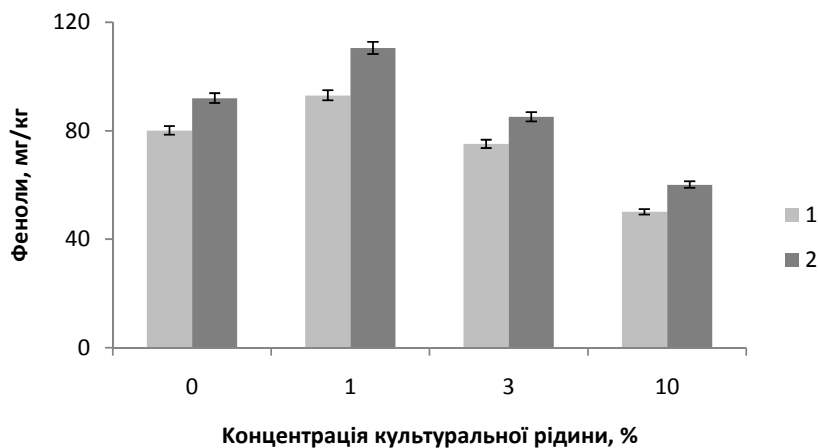


Рис. 2. Вміст фенольних сполук у ґрунті під кукурудзою та пшеницею при внесенні культуральної рідини *Interfillum terricola*: 1 – *Zea mays* сорт «Кадр 267 МВ»; 2 – *Triticum aestivum* сорт «Смуглянка»

У подальшому їхній рівень поступово знижувався у 1,1–1,6 раза, причому максимально під впливом 10 мл культуральної рідини, що, очевидно, є результатом активізації мікробіоти й посилення внаслідок цього деструктивних процесів.

Аналіз агрофізичних та агрохімічних показників ґрунту показав суттєве підвищення електропровідності ґрунту, концентрації йонів Ca та Mg у ґрунтовому розчині. Вміст органічного вуглецю та HCO_3 проявили невелику тенденцію до зростання, а окисно-відновний потенціал – до зниження за внесення мікробіодоростей. Рівень впливу мікробіодорості позитивно залежав від концентрації культуральної рідини. Зазначені зміни агрофізичних та агрохімічних характеристик ґрунту підтверджують активізацію мінералізаційних та трансформаційних процесів за внесення культуральної рідини мікробіодоростей.

Таблиця 4. Агрофізичні та агрохімічні властивості ґрунту при вирощуванні пшениці озимої та кукурудзи кормової за внесення культуральної рідини *Interfillum terricola*

Вид с.-г. культури	Норма внесення культуральної рідини, мл	ОВП, мВ	ЕС, мСм	HCO_3 , мг·екв.	$\text{pH}_{\text{сол}}$	C, %	Ca, мг/л	Mg, мг/л
<i>Triticum aestivum</i>	0	113 ± 0,9	0,97 ± 0,02	0,4 ± 0,1	7,01 ± 0,11	4,22 ± 0,02	5497,8 ± 2,1	609,6 ± 2,2
	1	103 ± 0,7	1,09 ± 0,01	0,5 ± 0,1	7,03 ± 0,02	4,25 ± 0,03	6164,2 ± 3,3	812,8 ± 2,6
	3	104 ± 0,4	1,11 ± 0,03	0,6 ± 0,2	7,04 ± 0,02	4,34 ± 0,03	6234,9 ± 3,0	1016,5 ± 3,1
	10	105 ± 0,2	1,20 ± 0,03	0,7 ± 0,2	7,06 ± 0,04	4,44 ± 0,02	6375,1 ± 2,7	1727,2 ± 2,7
<i>Zea mais</i>	0	129 ± 3,5	0,73 ± 0,06	0,3±0,1	7,09 ± 0,02	3,46 ± 0,04	6694 ± 3,4	2485 ± 4,8
	1	127 ± 2,7	0,68 ± 0,01	0,4±0,1	7,07 ± 0,05	3,58 ± 0,03	7362 ± 4,1	2631 ± 4,9
	3	125 ± 1,7	0,71 ± 0,06	0,5±0,2	7,14 ± 0,04	3,65 ± 0,02	8111 ± 3,9	2550 ± 3,7
	10	124 ± 1,9	0,77 ± 0,06	0,5±0,2	7,01 ± 0,03	3,74 ± 0,03	9919 ± 2,7	2790 ± 5,2

Висновки

Проведено комплексне дослідження впливу *Interfillum terricola* на аделопатичний режим, мікробіоценоз, агрофізичні та агрохімічні властивості ґрунту. Встановлено позитивний ефект на проростання

насіння, ріст та розвиток поверхні асиміляційних органів тест-рослин пшениці та кукурудзи. Алелопатична та цитостатична дія фізіологічно активних сполук ґрунту знижувалася на тлі збільшення концентрації культуральної рідини *I. terricola*. Внесення культуральної рідини водорості *I. terricola* суттєво впливало на чисельність мікроорганізмів, що належать до різних еколого-трофічних груп. Загальна тенденція у всіх варіантах досліджу: найменша чисельність мікроорганізмів при додаванні мінімальної норми внесення культуральної рідини (1 мл) і зростання їх зі збільшенням останньої.

Подібна закономірність виявлена також для показників трансформації органічної речовини. Відзначена тенденція засвідчує властивість дослідженої мікроводорості детоксикувати антифунгальні та антибактеріальні речовини кореневих виділень тест-рослин, що також сприяє поліпшенню мінералізаційних процесів у ґрунті та покращенню алелопатичного режиму. Під впливом культуральної рідини вміст фенольних сполук у ґрунті знижувався у 1,1–1,6 рази, особливо за норми внесення культуральної рідини 10 мл, що, ймовірно, є наслідком активізації мікробіоти й пов'язаних з цим процесів деструкції. Зміни показників електропровідності, окисно-відновного потенціалу, рН та біодоступності біогенних елементів у ґрунті за внесення культуральної рідини *I. terricola* підтверджують цей висновок. Вплив *I. terricola* на алелопатичний режим, біохімічні, фізичні властивості ґрунту та доступність біогенних елементів частково пояснюють стимулюючий ефект цієї мікроводорості на пшеницю та кукурудзу.

Список літератури

- Andreiuk K.I., Iutynska H.O., Antypchuk A.F., Valahurova O.V., Kozyrytska V.Ye., Ponomarenko S.P. 2001. *Functioning of microbial coenoses of soil in the conditions of anthropogenic loading*. Kyiv: Oberehy. 240 p. [Андреюк К.І., Іутинська Г.О., Антипчук А.Ф., Валагурова О.В., Козирицька В.Є., Пономаренко С.П. 2001. *Функціонування мікробних ценозів ґрунту в умовах антропогенного навантаження*. Київ: Обереги. 240 с.].
- Balan V.M., Doronin V.A., Kulyk O.H., Zmiievskiy V.M. 2014. In: *Scientific works of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beets*. Kyiv. Pp. 14–17. [Балан В.М., Доронін В.А., Кулік О.Г., Змієвський В.М. 2014. До питання методики оцінки та добору вихідних селекційних матеріалів цукрових буряків за ознакою репродуктивної системи та життєздатності насіння. В кн.: *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. Київ. С. 14–17].
- Bischoff H.W., Bold H.C. 1963. Phycological studies. IV. Some soil algae from Enchanted Rock and related algal species. *Univ. Texas Publ.* 6318: 1–95.

- Cerna B., Elhottova D., Santruckova H. 2003. In: *International Symposium on "Structure and Function of Soil Microbiota"*. Pp. 3–6. <https://www.yumpu.com › view>
- Chiaiese P., Corrado G., Colla G., Kyriacou M.C., Roupael Y. 2018. Renewable sources of plant biostimulation: microalgae as a sustainable means to improve crop performance. *Front. Plant Sci.* 9: 1782. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01782>
- Didovich S.V., Alekseenko O.P., Pas' A.N., Didovich A.N. 2020. *Phototrophic microorganisms for agricultural technology and food security*: Mat. 6th Int. Conf. *Earth Environ. Sci.* 422: 012042.
- Ellanska N.E., Yunosheva O.P., Miao T. 2021. In: *Modern methods in allelopathic research: Methodical manual*. Kyiv: Lira-K. Pp. 107–116. [Елланська Н.Е., Юношева О.П., Мяо Т. 2021. Методи мікробіологічного аналізу ґрунту. В кн.: *Сучасні методи в аделопатичних дослідженнях: Методичний посібник*. Київ: Ліра-К. С. 107–116].
- Ettl H., Gärtner G. 2014. *Syllabus der Boden-, Luft- und Flechtenalgen*. 2nd ed. Munich: Spektrum Akad. Verlag. 773 p.
- Guo B., Zhang Y., Li S., Lai T., Yang L., Chen J., Ding W. 2016. Extract from Maize (*Zea mays* L.): Antibacterial activity of DIMBOA and its Derivatives against *Ralstonia solanacearum*. *Molecules*. 21(10): 1397. <https://doi.org/10.3390/molecules21101397>
- Hastings K.L., Smith L.E., Lindsey M.L., Blotsky L.C., Downing G.R., Zellars D.Q., Downing J.K., Corena-McLeod M. 2014. Effect of microalgae application on soil algal species diversity, cation exchange capacity and organic matter after herbicide treatments. *F1000Research*. 3: 281. <https://doi.org/10.12688/f1000research.4016.1>
- Hollerbakh M.M., Shtina E.A. 1969. *Soil algae*. Leningrad: Nauka. 228 p. [Голлербах М.М., Штина Э.А. 1969. *Почвенные водоросли*. Л.: Наука. 228 с.].
- Ivanov V.B. 2011. Using the roots as test objects for the assessment of biological action of chemical substances. *Rus. J. Plant Physiol.* 58(6): 1082–1089. <https://doi.org/10.1134/S1021443711060082>
- Jaiswal P., Prasanna R., Nayak S., Sood A., Suseela M.R. 2008. Characterization of rhizocyanobacteria and their associations with wheat. *Egy. J. Biol.* 10: 20–27.
- Kirpenko N.Y. 2013. *Allelopathic interaction of freshwater algae*. Kyiv: Naukova Dumka. 255 p. [Кирпенко Н.И. 2013. *Аделопатическое взаимодействие пресноводных водорослей*. Киев: Наук. думка. 255 с.].
- Kostikov I.Yu. 1991. The place of soil algae in phytocenoses. *Algologia* 1(2): 93–97. [Костиков И.Ю. Место почвенных водорослей в фитоценозах. *Альгология*. 1(2): 93–97].
- Krafczyk I., Tolldeiner G., Beringer H. 1984. Soluble root exudates of maize: influence of potassium supply and rhizosphere microorganisms. *Soil Biol. Biochem.* 16: 315–322.
- Kuznetsova Y.A., Bozhkov A.I., Menzyanova N.G., Goltvyansky A.V., Azeez Z.A. 2018. Root exudates of wheat seedlings express antibacterial and antioxidant activity and stimulate proliferation of liver cells. *Indian J. Nat. Prod. Res.* 9: 303–310.
- Li Z.-H., Wang Q., Ruan X., Pan C.-D., Jiang, D.-A. 2010. Phenolics and plant allelopathy. *Molecules*. 15(12): 8933–8952. <https://doi.org/10.3390/molecules15128933>

- Maltseva I.A. 2007. Soil algae as a part of the functional ecosystems' structure. *Gruntoznavstvo*. 8(3–4): 71–79. [Мальцева І.А. Ґрунтові водорості у функціональній структурі біогеоценозів. *Ґрунтознавство*. 8(3–4): 71–79].
- McClintock J.B., Baker B.J. 2001. *Marine chemical ecology*. Boca Raton, FL: CRC Press. 609 p.
- Mikhailyuk T.I., Sluiman H., Massalski A., Mudimu O., Demchenko E., Kondratyuk S., Friedl T. 2008. New streptophyte green algae from terrestrial habitats and an assessment of the genus *Interfilum* (*Klebsormidiophyceae*, *Streptophyta*). *J. Phycol.* 44: 1586–1603.
- Mukha V.D. 2004. *Natural-anthropogenic evolution of soils*. Moscow: Kolos. 271 p. [Муха В.Д. *Естественно-антропогенная эволюция почв*. М.: Колос. 271 p.].
- Nichols K. 2020. *Microalgae as a beneficial soil amendment*. Myland Company LLC. 5 p.
- Pavliuchenko N.A., Didyk N.P., Li L. 2021. In: *Modern methods in allelopathic research: Methodical manual*. Kyiv: Lira-K. Pp. 117–147. [Павлюченко Н.А., Дідик Н.П., Лі Л. Колориметричні методи аналізу алелопатично активних речовин у рослинному матеріалі та ґрунті. В кн.: *Сучасні методи в алелопатичних дослідженнях. Методичний посібник*. Київ: Ліра-К. С. 117–147].
- Pavliuchenko N.A., Jang X. 2021. In: *Modern methods in allelopathic research: Methodical manual*. Kyiv: Lira-K. Pp. 74–89. [Павлюченко Н.А., Янг Х. 2021. Методи експрес-оцінювання алелопатичної активності (біотести). В кн.: *Сучасні методи в алелопатичних дослідженнях: Методичний посібник*. Київ: Ліра-К. С. 74–89].
- Pecheneva S.Ia. 1998. Agrochemical analysis methods. *Havrysh*. 4: 24–26. [Печенева С.Я. Методы агрохимического анализа. *Гавриш*. 4: 24–26].
- Rindi F., Mikhailyuk T.I., Sluiman H.J., Friedl T., López-Bautista J.M. 2011. Phylogenetic relationships in *Interfilum* and *Klebsormidium* (*Klebsormidiophyceae*, *Streptophyta*). *Mol. Phylog. Evol.* 58: 218–231.
- Rinkis H.Ia., Nollendorf V.F. 1982. *Balanced nutrition of plants with macro- and microelements*. Riga: Zinatne. 202 p. [Ринькис Г.Я., Ноллендорф В.Ф. 1982. *Сбалансированное питание растений макро- и микроэлементами*. Рига: Зинатне. 202 с.].
- Sakevych O.I., Usenko O.M. 2008. *Allelopathy in hydroecosystems*. Kyiv: Logos. 342 p. [Сакевич О.Й., Усенко О.М. 2008. *Алелопатія в гідроекосистемах*. Київ: Логос. 342 с.].
- Sood A., Singh P.K., Kumar A., Singh R. 2011. Growth and biochemical characterization of associations between cyanobionts and wheat seedlings in co-culturing experiments. *Biologia*. 66: 104–110. <https://doi.org/10.2478/s11756-010-0133-4>
- Tsarenko P.M., Zaimenko N.V., Didyk N.P., Ivanytska B.O., Kharytonova I.P., Demchenko E.M. 2021. Allelopathic effect of microalgae on winter wheat plants. *Algologia*. 31(3): 215–227. [Царенко П.М., Заїменко Н.В., Дідик Н.П., Іваницька Б.О., Харитоновна І.П., Демченко Е.М. 2021. Алелопатичний вплив мікроводоростей на пшеницю озиму. *Альгологія*. 31(3): 215–227]. <https://doi.org/10.15407/alg31.03.215>
- Uysal Ö., Ozdemir F., Ekinçi K. 2015. Evaluation of Microalgae as Microbial Fertilizer. *Eur. J. Sustain. Dev.* 4: 77–82. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2015.v4n2p77>

- Wellburn A.R. 1994. The spectral determination of chlorophylls *a* and *b*, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *J. Plant Physiol.* 144: 307–313. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
- Win T.T., Barone G.D., Secundo F., Fu P. 2018. Algal biofertilizers and plant growth stimulants for sustainable agriculture. *Ind. Biotechnol.* 14: 203–211. <https://doi.org/10.1089/ind.2018.0010>
- Xiong Q., Hu L.-X., Liu Y.-S., Zhao J.-L., He L.-Y., Ying G.-G. 2021. Microalgae-based technology for antibiotics removal: From mechanisms to application of innovational hybrid systems. *Environ. Int.* 155: 106594. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106594>

Підписала до друку Н.Є.Семенюк

Tsarenko P.M.¹, Zaimenko N.V.², Didyk N.P.², Ellanska N.E.², Pavlyuchenko N.A.,² Ivanytska B.O.², Yunosheva O.P.², Demchenko E.M.¹. 2021. **The effect of culture medium of *Interfillum terricola* (J.B.Petersen) Mikhailyuk et al. (Charophyta) on allelopathic, microbiological, agrophysical and agrochemical characteristics of soil.** *Algologia.* 31(4): 320–336

¹M.G. Kholodny Institute of Botany, NAS of Ukraine,
2 Tereshchenkivska Str., Kyiv 01601, Ukraine

²M.M. Grishko National Botanical Garden, NAS of Ukraine,
1 Tymiryazevska Str., Kyiv 01014, Ukraine

The influence of the cultural medium of the charophyte *Interfillum terricola* on the allelopathic, microbiological, agrophysical and agrochemical properties of the soil have been studied in model pot experiments. Allelopathic soil regime was assessed by biological testing methods for water-soluble compounds and direct biotesting, as well as by vital indicators of plants-phytometers of winter wheat (*Triticum aestivum* L., variety "Smuglyanka") and fodder corn (*Zea mays* L., variety "Kadr 267 MB). The seeds were sown immediately after the introduction of the culture fluid. The number of germinated seeds was recorded from the 2nd to the 8th day after sowing. The vital condition of phytometer plants was evaluated at the end of the experiments by morphometric indicators of growth (leaf surface area, dry matter biomass of aboveground parts and roots) and the content of photosynthetic pigments in the leaves. When the experiment was completed, soil samples were taken to determine the cytostatic effect of water-soluble compounds and to carry out microbiological and biochemical analyzes. Phenolic compounds were isolated from the soil by ion exchange (desorption) using an ion exchanger KU-2-8 (H⁺). In parallel, the electrical conductivity, redox potential, pH and content of nutrients in the soil were determined. The stimulating effect of cultural medium on seed germination, growth and development of assimilation organs of wheat and corn plants has been revealed. The strength of the effect did not depend on the concentration of growing medium, which is characteristic of signal allelopathically active substances. Allelopathic and cytostatic activity of the soil decreased with the use of *Interfillum terricola* growing medium. The introduction of the cultural fluid significantly affected

the number of microorganisms of different ecological and trophic groups. The lowest number of microorganisms was observed at the minimum rate of introduction of microalga medium, and its increase contributed to the growth of the number of almost all studied groups of microorganisms, indicators of transformation and mineralization of organic matter. Under the influence of the cultural medium, the content of phenolic compounds in the soil decreased by 1.1–1.6 times, especially at the norm of 10 mL. The soil treated with cultural fluid had higher rates of transformation and mineralization of organic matter than untreated. The concentration of phenolic compounds in the soil decreased, apparently, due to the activation of the microbiota resulting in the intensification of the destruction processes. An increase in the electrical conductivity of the soil with the introduction of microalgae inoculum was recorded, which may indicate the release of metal ions into the substrate. This confirms the increase in Ca and Mg.

Key words: *Interfillum terricola*, allelopathic interactions, winter wheat, phenolic substances, microbiocenosis, nutrients