

## **Алелопатичний вплив мікроводоростей на пшеницю озиму**

**Царенко П.М.<sup>1</sup>, Заіменко Н.В.<sup>2</sup>, Дідик Н.П.<sup>2\*</sup>, Іваницька Б.О.<sup>2</sup>,  
Харитонов І.П.<sup>2</sup>, Демченко Е.М.<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup> Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка, НАН України,  
вул. Тимірязєвська 1, Київ 01014, Україна  
\*nataliya\_didyk@ukr.net

Надійшла до редакції 11.07.2021. Після доопрацювання 26.07.2021. Підписана до друку 28.07.2021.  
Опублікована 22.09.2021

**Реферат.** Представлені результати досліджень алелопатичного впливу культуральної рідини двох видів зелених та харофітових мікроводоростей (*Chlorella vulgaris* Beijer. та *Interfillum terricola* (J.V.Petersen) Mikhailyuk et al.) на ріст насіння пшениці озимої (*Triticum aestivum* L.) у модельних вегетаційних дослідах для встановлення фізіологічних механізмів алелопатії та пошуку ефективних і безпечних сполук з рістстимулюючою дією. Перед посівом насіння пшениці культуральну рідину мікроводоростей об'ємом 1; 3 та 10 мл вносили у вегетаційну посудину (250 мл) з просіяним і простерилізованим сірим опідзоленим ґрунтом. Тест-рослини вирощували у фітокамері за контрольованих умов освітлення, температури та вологості ґрунту. Кількість пророслого насіння реєстрували з 2-ї по 8-му добу після посіву. Життєвий стан пшениці озимої оцінювали наприкінці експериментів за морфометричними показниками росту (висота надземних частин, площа поверхні листків, довжина кореневої системи, кількість бічних корінців, біомаса сухої речовини надземних частин і коренів) та вмістом фотосинтетичних пігментів у листках. Після закінчення експерименту визначали показники електропровідності, окисно-відновного потенціалу, рН та вмісту біогенних елементів у ґрунті. Встановлено позитивний ефект мікроводоростей на проростання насіння, ріст та потужність фотосинтетичного апарату рослин *T. aestivum*. Культуральна рідина *C. vulgaris* проявила вищу стимулюючу дію на проростання насіння та ріст паростків пшениці, ніж *I. terricola*.

© Царенко П.М., Заіменко Н.В., Дідик Н.П., Іваницька Б.О., Харитонов І.П.,  
Демченко Е.М., 2021

Позитивний вплив мікроводоростей на фотосинтетичну активність пшениці та вміст органічного вуглецю у ґрунті свідчить про можливість розробки біодобрив на їхній основі з метою поліпшення структурно-функціональної організації агроєкосистем. Отримані результати підтвердили перспективність використання *C. vulgaris* як біодобрива в посівах сільськогосподарських культур. Алелопатичний вплив *I. terricola* на судинні рослини досліджено вперше. Встановлено важливу роль опосередкованих алелопатичних механізмів у взаємовідносинах між дослідженими видами мікроводоростей та судинними рослинами.

Ключові слова: *Chlorella vulgaris*, *Interfillum terricola*, алелопатичні взаємодії, пшениця озима, біогенні елементи, ґрунт

## Вступ

Під алелопатичними взаємодіями розуміють вплив одного організму на інший через виділення в оточуюче середовище біологічно активних сполук, задіяних у процесах росту, розвитку та адаптації. До алелопатично активних речовин відносять вторинні метаболіти судинних та спорових рослин, мікроорганізмів, коралів та грибів. Крім алелопатичної взаємодії ці речовини можуть виконувати також інші екологічні функції, зокрема захищати від фітофагів, патогенів тощо (Bacellar Mendes, Vermelho, 2013). Останнім часом алелопатично активні речовини мікроводоростей досліджують з метою застосування у сільському господарстві для контролю чисельності шкідників, поліпшення родючості ґрунтів та підвищення продуктивності рослин (Hollerbakh, Shtina, 1969; Kostikov et al., 2001; Zolotarova et al., 2008; Hastings et al., 2014; Uysal et al., 2015; Win et al., 2018).

Встановлено, що мікроводорості впливають на фізичну структуру, рН ґрунту, знижують забруднення важкими металами, пестицидами та гербіцидами (Ardal., 2014). Видовий склад угруповань мікроводоростей використовують як індикатор родючості (Hastings et al., 2014). Зокрема, ґрунтові водорості продукують в оточуюче середовище велику кількість полісахаридів, які утворюють екзополімерну плівку на поверхні грудочок ґрунту, за рахунок чого покращується його структура та агрофізичні характеристики (Crouzet et al., 2019). Водночас біологічно активні вторинні метаболіти, ферменти та іони мікроводоростей позитивно впливають на інші ґрунтові організми та судинні рослини (Hastings et al., 2014; Crouzet et al., 2019). Біологічно активні екзометаболіти мікроводоростей іммобілізують токсичні метали та шкідливі речовини, змінюють рН, пригнічують розвиток шкідників, підвищують стійкість рослин до бактеріальних, грибкових, вірусних захворювань шляхом формування фізичного бар'єру (захисної слизової оболонки) на поверхні листків або

коренів. Цей фізичний захист, а також поліпшення агрегації ґрунту забезпечують стійкість судинних рослин до посухи, ультрафіолетового опромінення та перепадів температури (Nichols, 2020).

За останні 10 років питанням вивчення водоростей як біодобрив присвячено лише 0,09% альгологічних досліджень (Nichols, 2020). В основному досліджували ціанобактерії, здатні фіксувати азот. Серед мікроводоростей найбільш вивченими у цьому напрямку є представники *Cyanobacteria*, *Bacillariophyta*, *Chlorophyta* та *Haptophyta* із родів *Isochrysis* Parke, *Chaetoceros* Ehrenb., *Chlorella* Beijer., *Arthrospira* Stizenb. ex Gomont і *Dunaliella* Teodor. У сучасному агровиробництві найчастіше використовуються види *Arthrospira* spp. і *Chlorella* spp. (Nichols, 2020).

Незважаючи на те, що мікроводорості є невичерпним джерелом біологічно активних сполук з різним характером дії на судинні рослини (Sakevych, Usenko, 2008; Kirpenko, 2013), їх практичне застосування обмежене (Chiaiese et al., 2018). Це обумовлено, перш за все, недостатньою вивченістю алелохімічних механізмів взаємодії між вищими рослинами та мікроводоростями. Не сприяє цьому процесу також велике різноманіття водоростей і чисельність видів ґрунтової альгофлори, відсутність культур мікроводоростей та незначна кількість експериментальних робіт зі скринінгу та селекції генетично модифікованих організмів, перспективних для аграрного сектору виробництва (Korkhovoу et al., 2016; Chiaiese et al., 2018).

Метою цієї роботи було дослідження алелопатичної взаємодії між вищими рослинами та зеленою мікроводорістю *Chlorella vulgaris* Beijer. і харофітовою *Interfillum terricola* (J.B.Petersen) Mikhailyuk et al. у модельних експериментах як теоретичної основи розробки біодобрив для стимуляції росту і розвитку пшениці озимої.

#### Матеріали та методи

Матеріалом для дослідження слугували штами харофітових і зелених мікроводоростей *Interfillum terricola* (порядок *Klebsormidiales*, клас *Klebsormidiophyceae*, *Charophyta*) та *Chlorella vulgaris* (порядок *Chlorellales*, клас *Trebouxiophyceae*, *Chlorophyta*) (див. рисунок).

Перший штамп ізольований із зразків ґрунту букових пралісів Карпатського біосферного заповідника (2020 р.), другий отримано із колекції Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України – IBASU-А шт. 190 (Borisova, Tsarenko, 2004) як відомий продуцент біомаси, що використовується при промисловому культивуванні та розглядається потенційним кандидатом для виробництва біодизеля (Muzafarov, Taubaev,

1984; Tsarenko et al., 2016). Отримання біомаси мікроводоростей та вирощування досліджених штамів проведено за єдиною схемою культивування в конічних колбах Ерленмейера об'ємом 250 та 500 мл на мінеральному середовищі Болда (1N BBM), при pH 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  $\cdot$  м<sup>2</sup>  $\cdot$  с<sup>-1</sup>, за температури +20  $\pm$  5 °C (для *I. terricola*) і 16:8-годинним режимом світлового та темного періодів, за температури +23  $\pm$  5 °C (для *C. vulgaris*). Ідентифікацію видів і морфологічні дослідження культур водоростей проводили під світловим мікроскопом Olympus BX53 (Токіо, Японія) з диференціальною інтерференційною оптикою Номарського (DIC) та використанням сучасних монографічних зведень (Tsarenko, 1990; Mikhailiuk et al., 2008; Rindi et al., 2011; Ettl, Gärtner, 2014). Мікрофотографії водоростей отримані з використанням цифрової камери Olympus LC30, приєднаної до мікроскопа, і програмного забезпечення cellSens Entry.

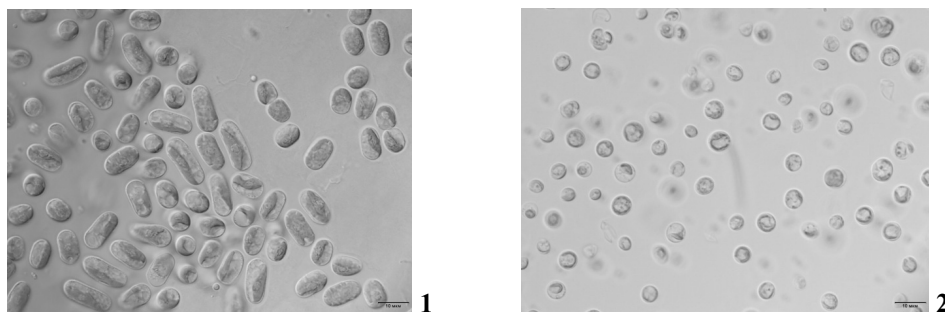


Рисунок. Загальний вигляд культури досліджених штамів *Interfillum terricola* (1) та *Chlorella vulgaris* (2) у період використання культуральної рідини при вегетаційних дослідках

Вегетаційні досліді проводили у відділі алелопатії Національного ботанічного саду імені М.М. Гришка НАН України (Modern methods..., 2021). Культуральну рідину мікроводоростей об'ємом 1; 3 та 10 мл вносили у вегетаційну посудину (об'єм 0,250 мл), наповнену просіяним та простерилізованим (у пічці за температури 100 °C упродовж 4 год) сірим опідзоленим ґрунтом перед посівом насіння тест-рослин. У контрольний варіант замість культуральної рідини вносили стерилізовану воду в такій же кількості. Насіння пшениці озимої (*Triticum aestivum* L., сорт «Смуглянка») стерилізували 1%-м розчином гіпохлориту натрію впродовж 5 хв, з наступним ополіскуванням стерилізованою водою. Наші попередні

дослідження методом біотестування показали високу чутливість цього сорту пшениці до алелопатично активних речовин мікрободоростей. Тест-рослини вирощували в фітокамері впродовж трьох тижнів за контрольованих умов освітлення 3500 лк, вологості ґрунту 50–60%, температури 26–28 °С. Вологість ґрунту визначали гравіметричним методом та підтримували на зазначеному рівні шляхом поливу стерилізованою водою.

Кількість пророслого насіння реєстрували з 2-ї по 8-у добу після посіву. Енергію проростання насіння визначали за відсотком пророслого насіння на 3-ю добу після посіву, схожість насіння – на 7-му добу відповідно до ДСТУ 4138 (2002). Для оцінювання швидкості проростання розраховували середню тривалість проростання однієї насінини згідно Balan et al. (2014) за формулою:

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

де ТП – тривалість проростання,  $d$  – дні підрахунку,  $K$  – кількість насіння, що проросло за день.

Життєвий стан тест-рослин оцінювали наприкінці експериментів за морфометричними показниками росту (висота надземних частин, площа поверхні листків, довжина кореневої системи, кількість бічних корінців; біомаса сухої речовини надземних частин та коренів). Для визначення фотосинтетичних пігментів (хлорофілу  $a$ ,  $b$  та каротиноїдів) свіжозібрані листки екстрагували диметилсульфоксидом за температури 70 °С упродовж 3 год. Кількісний вміст оцінювали за допомогою спектрофотометра Specord 200, Analytik Jena, 2003 (Hiscox, Israelstam, 1979). Розвиток листкового апарату рослин аналізували за результатами морфометричних вимірювань і вмістом фотосинтетичних пігментів.

Вимірювання рН ґрунтового розчину після досліду проводили на кондуктометрі Cond 315i (WTW GmbH, 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 оптико-емісійному спектрометрі з індуктивно-зв'язаною плазмою iCAP6300 Duo (Thermo-Fisher, США, 2007 р.). Зразки ґрунту для аналізу готували за методикою, описаною в літературі (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 здійснювали з використанням дисперсійного аналізу за допомогою програмного забезпечення StatSoft Statistica 10.0 та Microsoft Office Excel 2007.

## Результати та обговорення

Внесення культуральної рідини досліджених мікроводоростей в ґрунт перед посівом насіння рослин пшениці озимої позитивно впливало на ріст, розвиток та фотосинтетичну активність останніх. Значно зростав показник енергії проростання насіння та скорочувалася середня тривалість проростання (табл. 1). За внесення мікроводоростей рослини мали вищі показники маси надземних частин та коренів, площі листової поверхні та вмісту фотосинтетичних пігментів у листках (табл. 2).

Позитивний вплив мікроводоростей на ріст, розвиток та фотосинтетичну продуктивність сільськогосподарських рослин описано в низці робіт (Hastings et al., 2014; Uysal et al., 2015; Win et al., 2018). Серед можливих механізмів стимулюючої дії мікроводоростей на судинні рослини автори вказують на продукування в навколишнє середовище природних стимуляторів росту (ауксинів, цитокінінів, амінокислот, брасінолідів тощо), а також інших алелопатично активних сполук, що позитивно впливають на біологічні, біохімічні, алелопатичні та фізичні властивості ґрунту (Win et al., 2018; Nichols, 2020).

Таблиця 1. Вплив культуральної рідини мікроводоростей на проростання та ріст насіння пшениці озимої (середнє ± стандартна похибка)

Мікро-водорість	Норма внесення культуральної рідини, мл	Енергія проростання, %	Схожість, %	Середня тривалість проростання, дб	Біомаса сухої речовини, мг	
					надземної частини	кореня
<i>Chlorella vulgaris</i>	0	4 ± 0,6	79 ± 0,6	5,5 ± 0,2	11,4 ± 0,9	6,0 ± 0,2
	1	42 ± 0,8	96 ± 0,6	4,7 ± 0,2	17,5 ± 0,6	6,7 ± 0,3
	3	55 ± 0,8	100 ± 0,4	4,5 ± 0,3	18,6 ± 0,6	7,6 ± 0,3
	10	54 ± 0,9	100 ± 0,6	4,5 ± 0,2	19,9 ± 0,8	7,9 ± 0,4
<i>Interfillum terricola</i>	0	10 ± 0,8	85 ± 0,5	4,0 ± 0,1	13,7 ± 0,6	4,3 ± 0,3
	1	33 ± 0,7	83 ± 0,6	3,7 ± 0,2	17,9 ± 0,9	4,2 ± 0,3
	3	38 ± 0,6	88 ± 0,6	3,6 ± 0,1	19,1 ± 0,5	5,4 ± 0,2
	10	50 ± 0,9	83 ± 0,5	3,6 ± 0,2	18,5 ± 0,7	5,6 ± 0,4

Відомо, що розвиток листової поверхні є одним з ключових чинників, що визначають продуктивність рослин (Andrianova, Tarchevskyi, 2000). Рослини з більш розвиненим асиміляційним апаратом характеризуються інтенсивнішою енергією росту, завдяки чому підвищується їх конкурентна спроможність щодо бур'янів. Оскільки одночасно зі збільшенням площі

листяної поверхні підвищується вміст хлорофілу в листках, можна зробити висновок, що у рослин на фоні культуральної рідини формується потужніший фотосинтетичний апарат.

Таблиця 2. Вплив культуральної рідини мікроводоростей на показники асиміляційного апарату пшениці озимої (середнє ± стандартна похибка)

Мікро- водорість	Норма внесення культуральної рідини, мл	Вміст фотосинтетичних пігментів сирової речовини листків, мг/г			Площа поверхні листяків, см <sup>2</sup>
		хлорофіл <i>a</i>	хлорофіл <i>b</i>	каротиноїди	
<i>Chlorella vulgaris</i>	0	9,9 ± 0,3	4,1 ± 0,1	1,8 ± 0,1	11,2 ± 1,1
	1	9,6 ± 0,4	3,7 ± 0,2	1,8 ± 0,1	14,1 ± 1,2
	3	10,7 ± 0,4	5,9 ± 0,2	1,9 ± 0,1	16,4 ± 1,2
	10	11,1 ± 0,2	6,1 ± 0,2	2,1 ± 0,2	17,1 ± 1,0
<i>Interfillum terricola</i>	0	9,4 ± 0,3	2,0 ± 0,1	1,6 ± 0,1	9,2 ± 1,0
	1	9,9 ± 0,4	2,5 ± 0,2	1,8 ± 0,1	12,5 ± 1,3
	3	9,8 ± 0,4	2,6 ± 0,2	1,8 ± 0,2	13,4 ± 1,0
	10	9,8 ± 0,4	2,6 ± 0,2	1,8 ± 0,2	14,3 ± 1,2

У наших дослідженнях використання культуральної рідини *C. vulgaris* більш інтенсивно прискорювало проростання насіння та ріст паростків пшениці, ніж *I. terricola*. При цьому ефективність залежала від норми внесення культуральної рідини хлорели. *Interfillum terricola* також прискорював проростання насіння та збільшення біомаси тест-рослин. Однак вплив на біосинтез фотосинтетичних пігментів не перевищував межі довірчих інтервалів. Не виявлено також чіткої позитивної залежності між нормою внесення рідини *I. terricola* і ступенем впливу на досліджені показники фізіологічного стану рослин *Triticum aestivum*. Такий характер фізіологічної дії характерний для сигнальних сполук.

*Chlorella vulgaris* найбільш досліджена в алелопатичному плані мікроводорість. Алелопатичні властивості *I. terricola* дотепер не досліджувалися. Встановлено, що основним діючим компонентом алелопатичних виділень хлорели є хлорелін (суміш жирних кислот і вуглеводнів), який характеризується значною інгібуючою дією по відношенню до інших видів мікроводоростей, грибів та бактерій (Pratt, Fong, 1940; цит. за Dellagrecia et al., 2010). Крім цього, хлорела продукує та виділяє в навколишнє середовище значну кількість фітогормонів: цитокінінів та ауксинів (Stirk et al., 2011, 2013). Було вивчено алелопатичний вплив культуральної рідини мікроводорості *C. vulgaris* на проростання насіння та ріст паростків пшениці і кукурудзи, агрофізичні та

агрохімічні властивості ґрунту у вегетаційних дослідках (Uysal et al., 2015). Встановлено, що внесення культури хлорели у ґрунт позитивно впливає на проростання насіння та ріст сільськогосподарських культур, а також сприяє зростанню органічного вуглецю та водоутримуючу здатність ґрунту (Uysal et al., 2015).

Отримані результати засвідчили суттєві відмінності в показниках електропровідності (ЕС), окисно-відновного потенціалу (ОВП), рН та вмісту  $\text{HCO}_3$  в ґрунті за присутності культуральної рідини різних видів мікроводоростей, хоча при цьому зберігається загальна тенденція різних концентрацій. Зокрема, із підвищенням норми внесення культуральної рідини спостерігається зростання лужності ґрунтового розчину, активізуються окисно-відновні процеси, особливо у варіантах з *I. terricola*, збільшується електропровідність і вміст вуглекислоти (табл. 3).

Таблиця 3. Окисно-відновні процеси в ґрунті при вирощуванні пшениці озимої за внесення культуральної рідини водоростей

Мікро-водорість	Норма внесення культуральної рідини, мл	ОВП, мВ	ЕС, мСм	$\text{HCO}_3$ , мг-екв.	рН
<i>Chlorella vulgaris</i>	0	119 ± 0,1	0,25 ± 0,02	1,7 ± 0,1	6,56 ± 0,04
	1	103 ± 0,2	0,26 ± 0,03	1,9 ± 0,1	6,78 ± 0,03
	3	131 ± 0,2	0,31 ± 0,03	2,1 ± 0,1	6,99 ± 0,03
	10	136 ± 0,1	0,36 ± 0,03	2,2 ± 0,2	7,03 ± 0,04
<i>Interfillum terricola</i>	0	113 ± 0,1	0,97 ± 0,03	0,4 ± 0,1	7,01 ± 0,02
	1	103 ± 0,1	1,09 ± 0,01	0,5 ± 0,1	7,03 ± 0,03
	3	104 ± 0,1	1,11 ± 0,03	0,6 ± 0,2	7,04 ± 0,03
	10	105 ± 0,2	1,20 ± 0,03	0,7 ± 0,2	7,06 ± 0,03

Прояв цього ефекту залежить від норми внесення мікро-водоростей. Виявлене достовірне зростання вмісту органічного вуглецю за внесення культуральної рідини хлорели в максимальній концентрації (10 мл на посудину) доводить доцільність розробки біодобрив на основі хлорели для підвищення родючості ґрунтів та опосередковано сприяє секвестрації парникових газів. Враховуючи невелику тривалість вегетаційних експериментів, виявлене зростання вмісту органічного та неорганічного вуглецю в ґрунті може набути суттєвих розмірів в більшому часовому масштабі (табл. 4).



Таблиця 4. Вміст вуглецю, кальцію і магнію в ґрунті при вирощуванні пшениці озимої за внесення культуральної рідини водоростей

Мікроводорість	Норма внесення культуральної рідини, мл	C, %	Ca, мг/л	Mg, мг/л
<i>Chlorella vulgaris</i>	0	6,22 ± 0,05	2998,7 ± 2,4	556,3 ± 2,8
	1	6,34 ± 0,02	3568,1 ± 3,1	601,9 ± 2,1
	3	6,48 ± 0,04	3612,8 ± 2,8	914,5 ± 3,2
	10	6,96 ± 0,02	3749,5 ± 2,9	1021,7 ± 1,8
<i>Interfillum terricola</i>	0	4,22 ± 0,02	5497,8 ± 2,1	609,6 ± 2,2
	1	4,25 ± 0,03	6164,2 ± 3,3	812,8 ± 2,6
	3	4,34 ± 0,03	6234,9 ± 3,0	1016,5 ± 3,1
	10	4,44 ± 0,02	6375,1 ± 2,7	1727,2 ± 2,7

Подібного висновку дійшли вчені (Hastings et al., 2014) при дослідженні впливу суспензії мікроводоростей, що входить до складу препарату GOgreen® (Global Organics Group, LLC, Goodyear, AZ) (*Chlorella* sp.  $1 \times 10^3$ /мл, *Nannochloris* sp.  $1 \times 10^3$ /мл, клітини *Scenedesmus* sp.  $1 \times 10^3$ /мл) на мікробіоценоз та органічний вуглець ґрунту в посівах кукурудзи (*Zea mays* L.) за умов зрошування та застосування гербіцидів. Встановлено позитивний ефект на вміст органічного вуглецю ґрунту, рН та біорізноманіття ґрунтової мікробіоти, що засвідчило зростання родючості ґрунту після внесення гербіцидів (Hastings et al., 2014).

Суттєві відмінності між контролем та варіантами за внесення мікроводоростей простежувалися в розподілі кальцію і магнію в ґрунті (див. табл. 4). Внесення культуральної рідини досліджених видів мікроводоростей сприяло зростанню концентрації Ca і Mg у ґрунті, що корелювало зі зростанням лужності ґрунтового розчину. Магній є необхідним елементом для утворення молекули хлорофілу, він прискорює ферментативні процеси та синтез вуглеводів, виступає складовою частиною рибосом, які беруть участь у процесі біосинтезу білків, стимулює ріст кореневої системи та мінеральне живлення рослин. Кальцій стимулює розвиток листового апарату та біосинтез хлорофілу. Окрім того, він активує обмін речовин, сприяє формуванню корневих волосків та покращує розвиток кореневої системи.

Виявлені зміни фізичних властивостей ґрунту та біогенних елементів можуть дещо пояснити стимулюючу дію досліджених видів мікроводоростей на ріст насіння пшениці озимої.

## Висновки

Порівняльне дослідження алелопатичного впливу двох аборигенних видів зелених мікроводоростей *Chlorella vulgaris* та *Interfillum terricola* стосовно пшениці озимої (сорт «Смуглянка») показало позитивний ефект на проростання насіння, ріст та потужність фотосинтетичного апарату рослин *Triticum aestivum*. Хлорела проявила вищу стимулюючу дію на проростання насіння та ріст паростків пшениці, ніж *I. terricola*. Розмір ефекту позитивно корелював з нормою внесення хлорели. Культуральна рідина *I. terricola* достовірно прискорювала проростання насіння та показники росту пшениці, однак зміни вмісту фотосинтетичних пігментів не перевищували межі довірчих інтервалів. Отримані результати підтверджують дані інших дослідників щодо перспективності використання *C. vulgaris* як біодобрива у посівах сільськогосподарських культур. Алелопатичний вплив *I. terricola* на судинні рослини досліджено вперше. Аналіз агрофізичних та агрохімічних характеристик ґрунту вегетаційних дослідів показав, що досліджені мікроводорості змінювали показники електропровідності, окисно-відновного потенціалу, рН та вмісту біогенних елементів. Розмір цього ефекту позитивно залежав від норми внесення мікроводоростей. Зростання вмісту органічного вуглецю за внесення культуральної рідини хлорели засвідчує можливість розробки біодобрів на основі цієї водорості для поліпшення структурно-функціональної організації агроєкосистем та секвестрації вуглекислого газу атмосфери. Вплив досліджених видів мікроводоростей на фізичні властивості ґрунту та вміст біогенних елементів частково пояснює їхню стимулюючу дію на рослини пшениці озимої.

Висловлюємо щирю вдячність канд. біол. наук О.В. Борисовій за нарощування маточного інокуляту штаму *C. vulgaris*.

## Список літератури

- Andrianova Yu.E., Tarchevskiy I.A. 2000. *Chlorophyll and plants productivity*. Moscow: Nauka. 135 p. [Андрианова Ю.Е., Тарчевский И.А. 2000. *Хлорофилл и продуктивность растений*. М.: Наука. 135 с.].
- Ardal E. 2014. *Phycoremediation of pesticides using microalgae. Second cycle, A2E*. Alnarp: SLU, Depart. Biosyst. Technol. (from 130101). 40 p.
- Bacellar Mendes L.B., Vermelho A.B. 2013. Allelopathy as a potential strategy to improve microalgae cultivation. *Biotechnol. Biofuels*. 6: 1–152.
- Balan V.M., Doronin V.A., Kulyk O.H., Zmiiievskiy 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.
- Borisova E.V., Tsarenko P.M. 2004. Microalgae Culture Collection of Ukraine (IBASU-A): traditions and modern directions. *Nova Hedw.* 79(1–2): 127–134.
- Chiaiese P., Corrado G., Colla G., Kyriacou M.C., Rouphael 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>
- Crouzet O., Consentino L., Petraud J. P., Marraud C., Aguer J.-P. 2019. Soil photosynthetic microbial communities mediate aggregate stability: influence of cropping systems and herbicide use in an agricultural soil. *Front. Microbiol.* 10(1319): 1–15.
- Dellagrecia M., Zarrelli A., Fergola P., Cerasuolo M., Pollio A., Pinto G. 2010. Fatty acids released by *Chlorella vulgaris* and their role in interference with *Pseudokirchneriella subcapitata*: experiments and modeling. *J. Chem. Ecol.* 36: 339–349.
- Ettl H., Gärtner G. 2014. *Syllabus der Boden-, Luft- und Flechtenalgen*. 2<sup>nd</sup> ed. Munich: Spektrum Akad. Verlag. 773 p.
- 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>
- Hiscox J.D., Israelstam C.F. 1979. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Can. J. Bot.* 57: 1332–1334.
- 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.].
- Kirpenko N.Y. 2013. Allelopathic interaction of freshwater algae. Kyiv: Naukova Dumka. 255 p. [Кирпенко Н.И. 2013. *Алелопатическое взаимодействие пресноводных водорослей*. Киев: Наук. думка. 255 с.].
- Korkhovoy V., Tsarenko P., Blume Y. 2016. Genetically engineered microalgae for enhanced biofuel production. *Curr. Biotechnol.* 5(4): 256–265.
- Kostikov I.Yu., Romanenko P.O., Demchenko E.M., Darienko T.M., Mikhailiuk T.I., Rybchinsky O.V., Solonenko A.M. 2001. *Soil algae of Ukraine (history and methods of study, system, flora conspect)*. Kyiv: Fitosotsiotsentr. 300 p. [Костіков І.Ю., Романенко П.О., Демченко Е.М., Дарієнко Т. М., Михайлюк Т.І., Рибчинський О.В., Солоненко А.М. 2001. *Водорості ґрунтів України (історія та методи дослідження, система, конспект флори)*. Київ: Фітосоціоцентр. 300 с.].
- Mikhailiuk 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.

- Modern methods in allelopathic research: Methodical manual*. 2021. Ed. N.V. Zaimenko. Kyiv: Lira-K. 200 p. [Сучасні методи в алелопатичних дослідженнях: Методичний посібник. 2021. За ред. Н.В. Заїменко. Київ: Ліра-К. 200 с.].
- Muzafarov A.M., Taubaev T.T. 1984. *Chlorella*. Tashkent: FAN. 132 p. [Музафаров А.М., Таубаев Т.Т. 1984. *Хлорелла*. Ташкент: ФАН. 132 с.].
- Nichols K. 2020. *Microalgae as a beneficial soil amendment*. Arizona: MyLand Compani LLC. 22 p.
- Pecheneva S.Ia. 1998. Agrochemical analysis methods. *Havrysh*. 4: 24–26. [Печенева С.Я. 1998. Методы агрохимического анализа. *Гавриш*. 4: 24–26].
- Rindi F., Mikhailiuk 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.].
- Savevych O.I., Usenko O.M. 2008. *Allelopathy in hydroecosystems*. Kyiv. 342 p. [Сакевич О.Й., Усенко О.М. 2008. *Алелопатія в гідроекосистемах*. Київ. 342 с.].
- Stirk W.A., van Staden J., Novák O., Doležal K., Strnad M., Dobrev P.I., Sipos G., Ördög V., Bálint P. 2011. Changes in endogenous cytokinin concentrations in chlorella (*Chlorophyceae*) in relation to light and the cell cycle. *J. Phycol.* 47(2): 291–301. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2010.00952.x>
- Stirk W.A., Bálint P., Tarkowská D., Novák O., Strnad M., Ördög V., van Staden J. 2013. Hormone profiles in microalgae: Gibberellins and brassinosteroids. *Plant Physiol. Biochem.* 70: 348–353.
- Tsarenko P.M. 1990. *Brief manual of chlorococcal algae of Ukrainian SSR*. Kyiv: Naukova Dumka. 208 p. [Царенко П.М. 1990. *Краткий определитель хлорококковых водорослей Украинской ССР*. Киев: Наук. думка. 208 с.].
- Tsarenko P., Borysova O., Blume Ya. 2016. High biomass producers and promising candidates for biodiesel production from microalgae collection IBASU-A (Ukraine). *Oceanol. Hidrobiol. Stud.* 73(1): 79–85.
- Uysal Ö., Ozdemir F., Ekinici K. 2015. Evaluation of microalgae as microbial fertilizer. *Europ. JSD.* 4: 77–82. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2015.v4n2p77>
- 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.
- Zolotarova O.K., Shniukova Ye.I., Sivash O.O., Mykhailenko N.F. 2008. *Prospects for microhydrogen growth in biotechnology*. Kyiv: Alterpress. 234 p. [Золотарьова О.К., Шнюкова Є.І., Сиваш О.О., Михайленко Н.Ф. 2008. *Перспективи використання мікрководоростей у біотехнології*. Київ: Альтерпрес. 234 с.].

Підписала до друку О.К. Золотарьова

Tsarenko P.M.<sup>1</sup>, Zaimenko N.V.<sup>2</sup>, Didyk N.P.<sup>2</sup>, Ivanytska B.O.<sup>2</sup>, Kharytonova I.P.<sup>2</sup>, Demchenko E.M.<sup>1</sup> 2021. **Allelopathic effect of microalgae on winter wheat plants.** *Algologia*. 31(3): 215–227

<sup>1</sup> M.G. Kholodny Institute of Botany, NAS of Ukraine,  
Tereschenkivska Str., 2, Kyiv 01601, Ukraine

<sup>2</sup> M.M. Grishka National Botanical Garden, NAS of Ukraine,  
Tymiryazivska Str., 1, Kyiv 01014, Ukraine

The results of the study of the allelopathic activity of the culture medium of two species of green and charophyte microalgae (*Chlorella vulgaris* Beijer. and *Interfillum terricola* (J.B.Petersen) Mikhailyuk et al.) to winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in model pot experiments with the aim to discover of physiological mechanisms of allelopathy and finding effective and safe compounds with growth-promoting effects. The microalgae culture medium was applied in a rate of 1; 3 and 10 mL per a pot (250 mL) filled with sifted and sterilized gray podzolic soil, before sowing wheat seeds. Test plants were grown in a phytochamber under controlled conditions of light intensity, temperature and soil moisture. The number of germinated seeds was recorded from the 2<sup>nd</sup> to the 8<sup>th</sup> day after sowing. The vitality of winter wheat was evaluated at the end of the experiments using morphometric characteristics of growth (height of aboveground parts, leaf surface area, length of root system, number of lateral roots; dry matter mass of aboveground parts and roots) and content of photosynthetic pigments in leaves. At the end of the experiment, the indicators of electrical conductivity, redox potential, pH and content of nutrients in the soil were determined. The positive effect of microalgae on seed germination, growth and photosynthetic apparatus of *T. aestivum* plants was established. Culture medium of *C. vulgaris* showed a higher stimulating effect on seed germination and growth of wheat seedlings than *I. terricola*. The positive effect of microalgae on the photosynthetic activity of wheat and the content of organic carbon in the soil indicates the possibility of developing of biofertilizers based on them in order to improve the structural and functional organization of agroecosystems. The obtained results confirmed the prospects of *C. vulgaris* as a biofertilizer in crops. The allelopathic effect of *I. terricola* on vascular plants has been studied for the first time. The important role of indirect allelopathic mechanisms in the interactions between the studied species of microalgae and vascular plants has been established.

**Key words:** *Chlorella vulgaris*, *Interfillum terricola*, allelopathic interactions, winter wheat, nutrients, soil