

ЦАРЕНКО П.М.^{1†} (<https://orcid.org/0000-0003-0711-8573>)
ЗАІМЕНКО Н.В.² (<https://orcid.org/0000-0003-2379-1223>)
ДЕМЧЕНКО Е.М.¹ (<https://orcid.org/0000-0003-4997-6744>)
МИХАЙЛЮК Т.І.^{1*} (<https://orcid.org/0000-0002-7769-2848>)
ДІДИК Н.П.^{2*} (<https://orcid.org/0000-0002-8969-2239>)
ЕЛЛАНСЬКА Н.Е.² (<https://orcid.org/0000-0002-3634-5313>)
ХАРИТОНОВА І.П.² (<https://orcid.org/0000-0001-9540-5278>)
БЕНДЕРИЧЕК Т.Ю.² (<https://orcid.org/0000-0003-2954-0118>)
МЕЛЬНИК В.І.² (<https://orcid.org/0000-0001-8315-8468>)

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

² Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка НАН України,
вул. Тимірязєвська, 1, Київ 01014, Україна

*Адреса для листування: nataliya_didyk@ukr.net; t-mikhailyuk@ukr.net

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ҐРУНТОВИХ ЕКОСИСТЕМ ЗАПОВІДНИХ ТА ШТУЧНО СТВОРЕНИХ БУКОВИХ ЛІСІВ

Реферат. Досліджено особливості ґрунтових екосистем (склад водоростей, мікробіоценоз, агрохімічні та агрофізичні показники) букових пралісів Угольсько-Широколужанського масиву Карпатського біосферного заповідника, а також штучних насаджень буку європейського (*Fagus sylvatica* L.) на ботаніко-географічній ділянці «Українські Карпати» Національного ботанічного саду ім. М.М. Гришка НАН України. Зразки ґрунту відбирали з травня по вересень упродовж 2020–2021 рр. Аналізували видовий склад мікрowodоростей ґрунту, чисельність еколого-трофічних груп мікроорганізмів, агрофізичні та агрохімічні характеристики ґрунтів. Переважання зелених водоростей зі значним різноманіттям джгутикових представників і повна відсутність ціанопрокарот є типовими ознаками лісових ґрунтів. Незначна кількість виявлених видів (12 – у букових пралісах та 15 – у штучних насадженнях буку) вказує на затінені лісові екосистеми зі збідненим підліском, якими є букові ліси. Попри спільні риси

Надійшла до редакції 24.10.2023. Після доопрацювання 15.11.2023. Підписана до друку 20.11.2023.
Опублікована 20.12.2023

Ц и т у в а н н я . Царенко П.М.[†], Заіменко Н.В., Демченко Е.М., Михайлюк Т.І., Дідик Н.П., Елланська Н.Е., Харитонova І.П., Бендеричек Т.Ю., Мельник В.І. 2023. Порівняльний аналіз ґрунтових екосистем заповідних та штучно створених букових лісів. *Альгологія*. 33(4): 292–308. <https://doi.org/10.15407/alg33.04.292>

видовий склад водоростей ґрунтів обох фітоценозів досить різний. Ґрунти під буковими пралісами характеризуються значним переважанням зелених водоростей, серед яких суттєву частку складають требуксієфіцієві представники з аерофітною причетністю, що вказує на гірський характер ґрунтової альгофлори. Ґрунти під штучними насадженнями буку характеризуються багатшим видовим різноманіттям і переважанням хлорофіцієвих зелених водоростей, що є типовим для рівнинних лісів. Характерною особливістю заповідних та штучно створених букових лісів була відносна висока чисельність мікроміцетів. Кореляційний аналіз результатів досліджень показав позитивний зв'язок між водоростевим різноманіттям та чисельністю двох еколого-трофічних груп мікроорганізмів: актиноміцетів та аммоніфікаторів. Зростання альгорізноманіття позитивно корелювало з вмістом кальцію та магнію і негативно – з вмістом фосфору.

Ключові слова: *Fagus sylvatica*, праліси, штучні насадження, ґрунтові екосистеми, водорості, мікробіоценоз, біорізноманіття, мінеральне живлення, трансформація органічної речовини

Вступ

За умов сучасної екологічної кризи збереження й відтворення аборигенної природної рослинності є однією з найважливіших глобальних екологічних проблем людської цивілізації на нинішньому етапі її розвитку (Yeremeev, 2020). Важливий внесок у вирішення цієї проблеми належить ботанічним садам та дендропаркам, які працюють над тим, щоб відтворити реліктову аборигенну рослинність і максимально наблизити її біорізноманіття, трофічні зв'язки та екологічні послуги до природних екосистем, яких, на жаль, залишилося дуже мало.

В Національному ботанічному саду імені М.М. Гришка НАН України (НБС) більше 70 років існують штучно створені лісові та лучно-степові фітоценози (ботаніко-географічні ділянки), які моделюють природну рослинність помірного кліматичного поясу Євразійського континенту. Протягом усього періоду існування модельні фітоценози постійно поповнювалися посадковим матеріалом з еталонних природних фітоценозів природно-заповідного фонду України. Поступово сформувалися стабільні клімаксові угруповання, які містять у своєму складі як інтродуковані, так і аборигенні види з незначною домішкою інвазивної рослинності. Таким чином, відбулася конвергенція флористичного складу та ценотичної структури штучно створених модельних фітоценозів до відповідних природних угруповань (Melnyk et al., 2010; Shnyder, 2018).

Об'єктами наших досліджень є природні реліктові букові праліси Карпатського біосферного заповідника та штучно створені модельні

фітоценози цієї лісоутворюючої породи на території НБС. Реліктові букові ліси, які майже не зазнали антропогенної трансформації, збереглися в малодоступних ділянках Карпат і займають в Україні площу понад 92 тис. га. В 2017 р. ЮНЕСКО визнала букові праліси Карпатського біосферного заповідника (КБЗ) та Ужанського національного природного парку об'єктом всесвітньої природної спадщини.

В середині минулого століття на території НБС було створено експозицію «Буковий ліс» за зразком букових пралісів Карпатського заповідника. Вона займає площу 1,2 га та розташована на пологіму схилі уступу I правої надзапавної тераси Дніпра (крутизна схилу 10–15°), в межах ботаніко-географічної ділянки «Українські Карпати» (Melnyk et al., 2010). Основу сучасного 70-річного букового деревостану складають дерева *Fagus sylvatica* L., середня висота яких 25 м, середній діаметр стовбура 35 см, зімкненість крон 0,9. В негустому підліску зустрічаються *Daphne mezereum* L., *Lonicera xylosteum* L., *Rubus idaeus* L., *R. hirtus* Waldst. Kit., *Sambucus nigra* L., *S. racemosa* L. тощо (Melnyk et al., 2010).

Результати вивчення інтродукції бука європейського в зеленій зоні м. Києва свідчать про його успішну адаптацію до кліматичних та едафічних умов регіону, де він формує стійкі насадження та відзначається високою насінневою продуктивністю (Melnyk et al., 2010). З огляду на високу наукову, екологічну та ландшафтно-естетичну цінність буку європейського актуальним є вивчення консортивних зв'язків цієї лісоутворюючої породи з іншими компонентами екосистеми, зокрема такими, як ґрунтові мікроводорості та мікробіоценоз.

У сформованих біогеоценозах мікроводорості є обов'язковим компонентом ґрунтових екосистем (Kostikov et al., 2001). Для ризосфери вищих рослин характерні специфічність складу та збільшення чисельності водоростей та інших мікроорганізмів. Хоча існує приуроченість певних груп мікроводоростей до того чи іншого типу рослинних асоціацій, консортивні зв'язки, які формуються між водоростями, мікроорганізмами та вищими рослинами, є достатньо лабільними, що дозволяє їм змінюватися й пристосовуватися до нових умов середовища. Мікроводорості чутливо реагують на зміни, що відбуваються в ґрунті й мають велике індикаторне значення (Algae, 1989). Чисельність, різноманіття та загальна біомаса ґрунтових водоростей розглядається як важливий маркер цілісності та стійкості ґрунтових екосистем (Algae, 1989). Адаптаційно-регуляторні властивості ґрунтової мікробіоти дозволяють переносити тривалі флуктуації кліматичних факторів та антропогенне навантаження, відіграють провідну роль у процесах саморегуляції та трансформації

ґрунтів у напрямку згладжування прояву несприятливих факторів середовища (Hollerbach, Shtina, 1969).

Метою наших досліджень був порівняльний аналіз складу водоростей та мікробіоценозів ґрунтових екосистем природних (Угольсько-Широколужанські букові праліси) та штучно створених насаджень буку європейського (експозиція «Буковий ліс» на ботаніко-географічній ділянці «Українські Карпати» НБС) в залежності від інших біологічних, агрохімічних та агрофізичних характеристик ґрунту.

Матеріали та методи

Об'єкти досліджень – ґрунтові екосистеми реліктових та штучних букових лісів. Було досліджено Угольсько-Широколужанські букові праліси Карпатського біосферного заповідника та штучні букові насадження на ботаніко-географічній ділянці «Українські Карпати» НБС імені М.М. Гришка НАН України (табл. 1).

Таблиця 1. Характеристика досліджених локалітетів

Локація	Тип ґрунту	Рослинність	Підстилка, см
Угольсько-Широколужанські букові праліси	Бурозем	Суцільний древостан <i>Fagus silvatica</i>	2–5
Ботаніко-географічна ділянка «Українські Карпати», НБС НАНУ	Світло-сірий опідзолений суглинистий	Суцільний древостан <i>Fagus silvatica</i>	2–5

Зразки ґрунту відбирали в третій декаді травня, в другій декаді липня та в третій декаді вересня впродовж 2020–2021 рр. на 5 стаціонарних пробних ділянках площею $5 \times 5 \text{ м}^2$, буром (5 проб з ділянки) на глибині 0–20 см. Вивчали видовий склад мікробіодоростей ґрунту та чисельність еколого-трофічних груп мікроорганізмів. Паралельно оцінювали агрофізичні та агрохімічні характеристики ґрунтів.

Альгологічні дослідження проводили з використанням традиційних методів постановки культур (Hollerbach, Shtina, 1969; Kostikov et al., 2001). Для отримання накопичувальних культур часточки ґрунту висівали на поверхню агаризованого середовища Болда (1N BBM) (Bischoff, Bold, 1963). Культури вирощували в стандартних лабораторних умовах, з 12-годинним чергуванням світлової та темної фаз і освітленням 25 мкмоль фотонів $\cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при температурі $+20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Дослідження накопичуваль-

них культур проводили, починаючи з третього тижня культивування. Ізольовані колонії водоростей переглядали під стереомікроскопом МБС-1 (Росія) та відсівали на поживне середовище в чашки Петрі для подальшого виділення альгологічно чистих культур, які очищали шляхом багаторазових пересівів.

Очищені штами водоростей культивували на середовищах 1N та 3N BBM (Bischoff, Bold, 1963), при умовах, вказаних вище. Ідентифікація та морфологічні дослідження виділених культур виконані за допомогою світлового мікроскопа Olympus BX51 з диференціальною інтерференційною оптикою Номарського (DIC). Мікрофотографії отримані з використанням камери Olympus LC30, приєднаної до мікроскопа, і опрацьовані за допомогою програмного забезпечення cellSens Entry.

Мікробіологічні аналізи проводили методом посіву ґрунтових суспензій у відповідних розведеннях на агаризовані живильні середовища за загальноприйнятими методиками. Підраховували кількість бактерій, які споживають мінеральні (крохмаль-аміачний агар, КАА) та органічні (м'ясо-пептонний агар, ПА) сполуки азоту, мікроміцетів (середовище Чапека), актиноміцетів (КАА). Співвідношення окремих еколого-трофічних груп мікроорганізмів (коефіцієнт мінералізації – іммобілізації) розраховували за К.І. Андреюк (Andreyuk et al., 1990), показник трансфор-мації органічної речовини визначали за В.Д. Мухой (Mukha, 2004). Загальну кількість колоній, яку підраховували при посівах ґрунтових суспензій, оцінювали за чисельністю колонієутворюючих одиниць (КУО).

Вимірювання рН ґрунтового розчину після зняття дослідів проводили на кондуктометрі Cond 315i (WTWGmbH, 2015 р.). Окисно-відновний потенціал визначали за допомогою приладу pH/ORP Meter HI 2211 (HannaInstruments, 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 Рінксом-Ноллендорфом (Rinkis, Nollendorf, 1982). Вміст розчинних карбонатів у ґрунтовому розчині оцінювали методом титрування сірчаною кислотою за додавання індикатора метил-оранж 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

У ґрунтах букових фітоценозів у цілому виявлено 26 видів водоростей з 3 відділів: *Chlorophyta*, *Charophyta* та *Heterokontophyta* (табл. 2, 3; рис. 1, 2).

Таблиця 2. Видовий склад водоростей ґрунтів досліджених лісових фітоценозів

Види за відділами та класами	Частота трапляння в пробах, %	
	Буковий праліс (КБЗ)	Букові насадження (НБС)
<i>Chlorophyta</i>		
<i>Chlorophyceae</i>		
<i>Heterochlamydomonas callunae</i> (Ettl) Mikhailyuk & Demchenko		80
<i>Heterochlamydomonas</i> sp.		20
<i>Chlamydomonas</i> cf. <i>asymmetrica</i> Korshikov		20
<i>Chloromonas chlorococcoides</i> (Ettl & Schwarz) Matsukaki, Hara & Nozaki	16,7	
<i>Chloromonas</i> sp.	16,7	
<i>Lobochlamys</i> sp.	16,7	
<i>Palmellopsis</i> sp.	33,3	20
<i>Eubrownia</i> cf. <i>aggregata</i> (Brown & Bold) Watanabe & Lewis		60
<i>Chlorosarcinopsis</i> sp.		20
<i>Chlorococcum oleofaciens</i> Trainor & Bold		20
<i>Protosiphon botryoides</i> (Kützinger) Klebs		20
<i>Bracteacoccus</i> cf. <i>grandis</i> Bischoff & Bold	16,7	
<i>Trebouxiophyceae</i>		
<i>Neocystis</i> sp.	50	
<i>Elliptochloris subsphaerica</i> (Reisigl) Ettl & Gärtner	50	
<i>Parietochloris alveolaris</i> (Bold) Watanabe & Floyd		20
<i>Pseudochlorella</i> sp.	16,7	
<i>Trebouxia</i> sp.		20
<i>Coccomyxa</i> cf. <i>simplex</i> Mainx	33,3	
<i>Diplosphaera chodatii</i> Bialosuknia	16,7	
<i>Nannochloris</i> sp.		60
<i>Charophyta</i>		
<i>Klebsormidiophyceae</i>		
<i>Interfilum terricola</i> (J.B.Petersen) Mikhailyuk & al.	66,7	
<i>Heterokontophyta</i>		

<i>Xantophyceae</i>		
<i>Botrydiopsis</i> cf. <i>arhiza</i> Borzi	16,7	
<i>Eustigmatophyceae</i>		
<i>Vischeria magna</i> (Petersen) Kryvenda, Rybalka, Wolf & Friedl		20
<i>Pleurogaster lunaris</i> Pascher		40
<i>Bacillariophyceae</i>		
<i>Mayamaea atomus</i> (Kützing) Lange-Bertalot		20
<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehrenberg) Grunow		80

Таблиця 3. Систематична структура альгофлор ґрунтів досліджених лісових фітоценозів

Відділи та класи	Кількість видів, шт./%		
	Буковий праліс (КБЗ)	Букові насадження (НБС)	Всього
<i>Chlorophyta</i>	10/83,4	11/73,3	20/76,9
<i>Chlorophyceae</i>	5	8	12
<i>Trebouxiophyceae</i>	5	3	8
<i>Charophyta</i>	1/8,3	–	1/3,8
<i>Klebsormidiophyceae</i>	1	–	1
<i>Heterokontophyta</i>	1/8,3	4/26,7	5/19,3
<i>Xantophyceae</i>	1	–	1
<i>Eustigmatophyceae</i>	–	2	2
<i>Bacillariophyceae</i>	–	2	2
Всього видів	12/100	15/100	26/100

Знайдено виключно еукаріотичні водорості, серед яких переважали представники відділів *Chlorophyta* (20 видів) та *Charophyta* (1 вид). Незначна кількість видів належала відділу *Heterokontophyta* (5 видів, у складі жовтозелених (*Xantophyceae*, 1 вид), евстигматофітових (*Eustigmatophyceae*, 2 види) та діатомових водоростей (*Bacillariophyceae*, 2 види). Серед найрізноманітніших зелених водоростей видовий склад розподілено між двома класами – *Chlorophyceae* (12 видів) та *Trebouxiophyceae* (8 видів). Досліджені ґрунти обох фітоценозів загалом характеризуються значним переважанням зелених водоростей (76,9% видового складу) та повною відсутністю ціанобактерій (табл. 3). Ці риси альгофлори є типовими для лісових ґрунтів, низький рН яких є несприятливим для розвитку ціанобактерій та прийнятним для поширення представників *Chlorophyta* (Aleksakhina, Shtina, 1984; Kostikov, Darienko,

1996). Інша характерна риса досліджених ґрунтових альгофлор – невисоке загальне видове різноманіття водоростей, яких виявлено 12 видів у букових пралісах та 15 видів у штучних насадженнях буку. Невисоке видове різноманіття водоростей – ознака, типова для затінених лісів зі збідненим підліском та трав'янистим покривом, якими є грабові, кленові та букові ліси (Aleksakhina, Shtina, 1984; Demchenko et al., 1998).

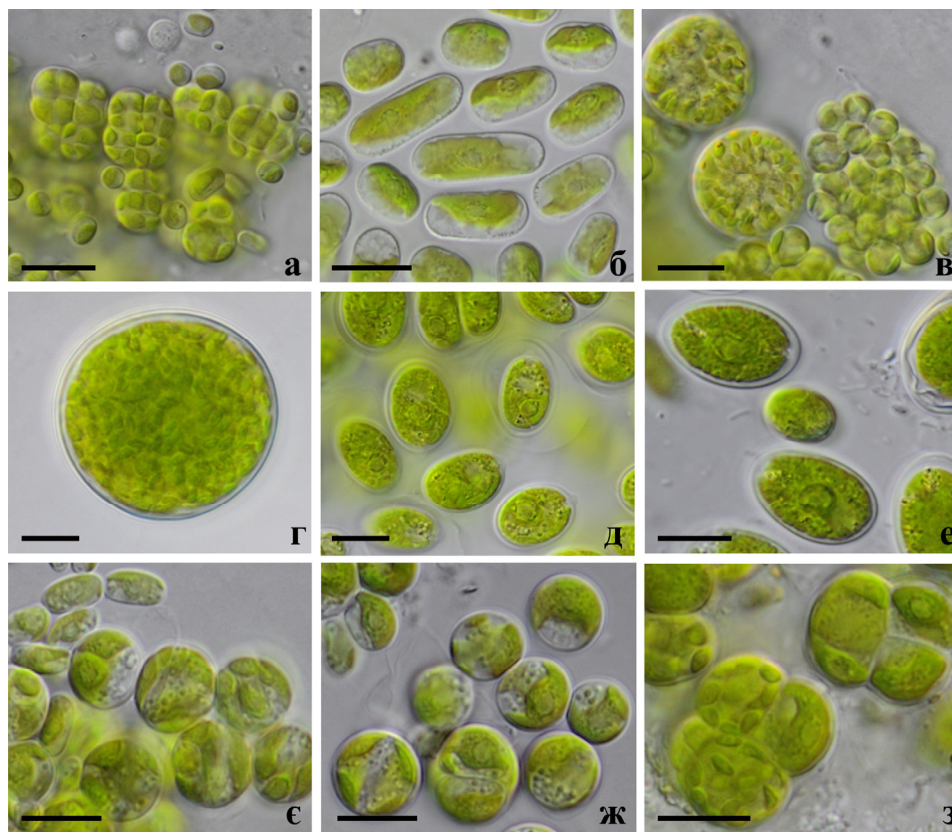


Рис. 1. Види водоростей, виявлені в ґрунтах під буковими пралісами (КБЗ): а – *Diplosphaera chodatii*; б – *Interfilum terricola*; в – *Botrydiopsis* cf. *arhiza*; г – *Bracteacoccus* cf. *grandis*; д – *Chloromonas chlorococcoides*; е – *Chloromonas* sp.; є, ж – *Elliptochloris subsphaerica*; з – *Pseudochlorella* sp. Шкала 10 мкм

Так, кількість видів у ґрунтах пралісів коливалась від 2 до 4 видів/пробу (середня кількість – 3,5 видів/пробу). Ґрунти штучних насаджень буку були дещо різноманітніші на водорості, тут виявлено від 4 до 7 видів/пробу (середня кількість – 5,4 видів/пробу). Ще одна типова ознака лісових ґрунтів – високе різноманіття зелених джгутикових водоростей (Aleksakhina, Shtina, 1984; Kostikov, 1991; Demchenko et al., 1998; Demchenko, 1999), які у вивчених ґрунтах представляють 23%

загального видового складу, по 25 і 20% видового складу водоростей ґрунтів букових пралісів та штучних насаджень буку відповідно.

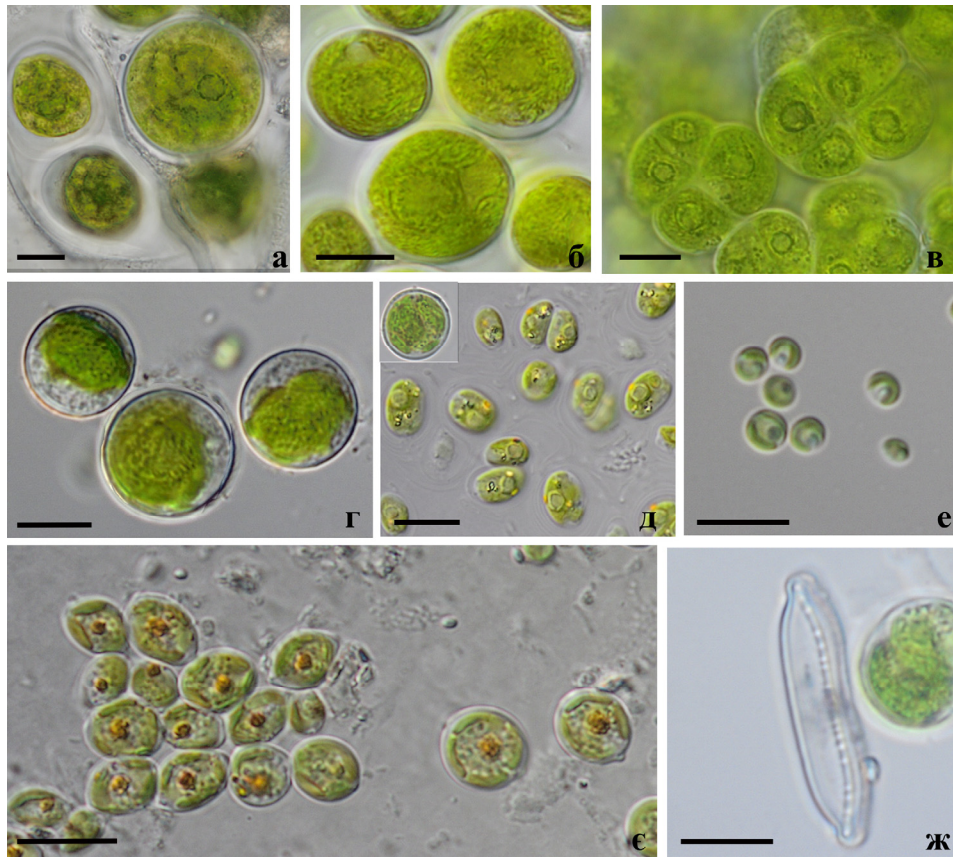


Рис. 2. Види водоростей, виявлені в ґрунтах під штучними насадженнями буку (НБС): а – *Protosiphon botryoides*; б – *Palmellopsis* sp.; в – *Eubrownia* cf. *aggregata*; г – *Parietochloris alveolaris*; д – *Heterochlamydomonas callunae*; е – *Nannochloris* sp.; є – *Pleurogaster lunaris*; ж – *Hantzschia amphioxys*. Шкала 10 мкм

Попри виразні спільні риси ґрунтових альгофлор досліджених фітоценозів, склад водоростей обох ділянок на рівні видів дуже різний. Зокрема, виявлено лише одного спільного представника – *Palmellopsis* sp., якого не вдалося визначити до рівня виду, тому при більш детальному дослідженні, можливо, цю спільну рису теж буде втрачено. Основу водоростевих угруповань у ґрунтах під буковими пралісами складають зелені водорості (83.4% видового складу), що розподілені між класами *Chlorophyceae* та *Trebouxiophyceae* порівну.

Значне різноманіття представників требуксієфіцієвих водоростей, серед яких багато видів, типових для аерофітних місцезростань (Ettl,

Gärtner, 2014), є характерним для гірських ґрунтів, які містять уламки гірських порід і межують зі скальними виходами (Kostikov, Darienko, 1996; Romanenko, 1999; Darienko, 2000).

Види *Diplosphaera chodatii*, *Elliptochloris subsphaerica*, *Neocystis* sp. є поширеними в обростанні каміння та скель (Mikhailyuk et al., 2011; Ettl, Gärtner, 2014), що пояснює їх значне трапляння (в останніх двох видів – у 50% проб) у гірських ґрунтах під буковими пралісами. Інший, значно поширений у ґрунтах пралісів вид харофітової водорості – *Interfilum terricola*, типовий серед аерофітних місцезростань (в обростанні каміння та кори дерев), хоча в ґрунтах також трапляється (Kostikov et al., 2001; Mikhailyuk et al., 2011), знайдений по всій території України (Borisova et al., 2016). Цікавим представником ґрунтів під буковими пралісами можна вважати требуксієфіцієву водорість *Pseudochlorella* sp., яку, на жаль, визначити до рівня виду не вдалося.

Ґрунти під штучними насадженнями буку характеризуються багатшим складом водоростей. Лідирують зелені представники (73.3%), але трапляються також діатомові та евстигматофіцієві водорості, серед яких досить часті *Hantzschia amphioxys* (у 80% проб) та *Pleurogaster lunaris* (у 40% проб). Останній вид є рідкісним, відомим як з мулу водойм, так і вологих ґрунтів (Matvienko, Dogadina, 1978; Ettl, Gärtner, 2014), в Україні виявлений з лісових ґрунтів Чернігівської та Сумської областей (Kostikov et al., 2001), також траплявся у річках Харківської обл. (Algae of Ukraine, 2006). Серед зелених водоростей переважають представники класу *Chlorophyceae* (8 видів), тоді як до класу *Trebouxiophyceae* належать лише 3 види. Такий розподіл зелених водоростей є типовим для ґрунтів рівнинних територій (Kostikov, 1991; Demchenko et al., 1998). Найчастіше траплялися *Heterochlamydomonas callunae* (у 80% проб), *Eubrownia* cf. *aggregata* та *Nannochloris* sp. (у 60% проб), два перші види є типовими представниками вологих та затінених ґрунтів. До цікавих знахідок можна віднести також *Protosiphon botryoides*, що є типовою ґрунтовою водорістю. Виявлений у Поліссі, Лісостепу та Степу України (Algae of Ukraine, 2011).

Порівняльний аналіз мікробіоценозів ґрунту заповідних та модельних букових лісів показав, що чисельність практично всіх досліджених еколого-трофічних груп мікроорганізмів в модельних букових насадженнях НБС була в 1,5–2,4 рази вищою порівняно із заповідними буковими пралісами (табл. 4). Це свідчить про сприятливіші едафічні умови для розвитку мікроорганізмів та інтенсивніші процеси трансформації і мінералізації органічної речовини в штучних насадженнях бука порівняно з заповідними пралісами. Останнє припущення підтверджують

результати агрофізичного та агрохімічного аналізів ґрунту досліджених екосистем (табл. 5, 6).

Таблиця 4. Чисельність мікроорганізмів (в 1 г сухого ґрунту) основних таксономічних та еколого-трофічних груп у ґрунтах досліджених лісових фітоценозів (усереднені дані за 2020–2021 рр.)

Лісовий фітоценоз	Мікроміцети, тис.	Актиноміцети, тис.	Амоніфікатори, млн	Мікроорганізми, що споживають мінеральний азот, млн
Буковий праліс (КБЗ)	45,9 ± 3,7	0,4 ± 0,1	3,4 ± 0,3	3,3 ± 0,4
Букові насадження (НБС)	81,3 ± 3,2	0,6 ± 0,4	6,8 ± 0,2	8,0 ± 1,0

Таблиця 5. Агрофізична характеристика ґрунтів досліджених лісових фітоценозів

Лісовий фітоценоз	Окисно-відновний потенціал, mV	Електропровідність, $\mu\text{S}/\text{cm}$	HCO_3 , м·екв./л
Буковий праліс (КБЗ)	127	75	0,5
Букові насадження (НБС)	89	97	0,3

Зокрема, електропровідність (яка корелює зі вмістом мінеральних солей), а також концентрації катіонів магнію, марганцю, заліза, аміачної та нітратної форм азоту в штучно створених насадженнях буку були суттєво вищими порівняно із заповідними буковими пралісами.

Очевидно, з цим пов'язане багатше видове різноманіття мікробіодоростей у ґрунті під буковими насадженнями НБС порівно з реліктовими пралісами. Цей самий ґрунт характеризувався вдвічі більшою чисельністю мікроорганізмів амоніфікаторів і тих, що споживають мінеральний азот. Характерною особливістю як реліктових пралісів, так і штучних насаджень буку європейського, була велика чисельність мікроміцетів, які склали, відповідно, 87% та 84% загальної чисельності мікроорганізмів, і незначна представленість актиноміцетів.

Таблиця 6. Вміст макро- та мікроелементів у ґрунтах досліджених лісових фітоценозів, мг/л ґрунту

Елемент	Лісовий фітоценоз	
	Буковий праліс (КБЗ)	Букові насадження (НБС)
NH_4^+	28,2±1,12	37,4±1,86
NO_3^-	8,3±0,65	55,2±3,72
P	137,2±9,17	121,6±8,96
K	94,1±8,54	67,9±5,36
Ca	2059,2±147,51	1667,5±139,80
Mg	203,7±12,64	409,1±31,73
Fe	412,4±31,58	521,8±44,02
Mn	93,2±8,71	275,9±18,31

Таке переважання мікроміцетів, серед яких багато симбіотрофів, свідчить про високий потенціал ґрунтової екосистеми до самовідновлення, що є характерним для клімаксових стадій природних фітоценозів (Tagas, 2014; Koriy et al., 2016).

З іншого боку, підвищені концентрації катіонів марганцю та заліза в ґрунті штучних насаджень буку можуть свідчити про можливу фітотоксичність ґрунту, особливо для рослин, які поновлюються насіннєвим шляхом.

Кореляційний аналіз результатів досліджень показав позитивний зв'язок між водоростевим різноманіттям та чисельністю двох екологічних груп мікроорганізмів: актиноміцетів ($R = 0,736$) та аммоніфікаторів ($R = 0,894$). Ценотичним взаємовідносинам між мікрководоростями та іншими мікроорганізмами присвячено чимало робіт (Sirenko, Kondratyeva, 1998; Sakevich, Usenko, 2008). Водорості впливають на накопичення в ґрунті органічних речовин, зокрема за рахунок азотфіксації ціано-бактеріями, змінюють фізико-хімічні властивості ґрунту, стимулюють їхню мікробіологічну активність, позитивно впливають на рослини за рахунок виділення фізіологічно активних речовин, є індикаторами стану ґрунтів та беруть участь у їхній рекультивациі (Algae, 1989).

Встановлено, що ціанобактерії та зелені мікрководорості активно продукують в оточуюче середовище амінокислоти, полісахариди, органічні

кислоти та інші сполуки (Sirenko, Kondratyeva, 1998; Kirpenko, 2013). Це стимулює ріст та розвиток численних гетеротрофних мікроорганізмів: грибів, бактерій, серед яких ідентифіковані амоніфікуючі, денітрифікуючі, олігонітрофільні та олігокарбофільні бактерії, а також стрептоміцети (Andreyuk et al., 1990). Слиз, який виділяють деякі види водоростей в оточуюче середовище, є важливою захисною структурою для супутніх мікроорганізмів, захищаючи їх від висихання та інсоляції (Mazor et al., 1996). Ці особливості, разом зі здатністю утворювати колонії, розмір яких може сягати кількох сантиметрів, дають можливість утворювати складні консорції з іншими мікроорганізмами ґрунту (Saint Martin et al., 1999). Аналіз кореляційних зв'язків між показником альгорізноманіття та вмістом макро- і мікроелементів у ґрунті виявив істотну позитивну кореляцію між вмістом кальцію ($R = 0,598$) та магнію ($R = 0,836$), тоді як концентрація фосфору в ґрунті негативно корелювала з кількістю виявлених видів мікроводоростей ($R = -0,904$).

Слід зауважити, що вибіркове поглинання мінеральних сполук мікроводоростями впливає на перерозподіл рухливих форм хімічних елементів по ґрунтовому профілю. Позитивним фактором хімічного впливу водоростей на ґрунт є покращення його аерації за рахунок кисню, що виділяється при фотосинтезі, а також залуження ґрунтового середовища. Розвиток мікроводоростей впливає на структурну організацію дрібних часток ґрунту, підвищує їхню водостійкість та запобігає виносу з поверхневого шару.

Висновки

Результати проведених порівняльних досліджень ґрунтових екосистем заповідних букових пралісів та їх штучно створеного аналогу на території НБС показав, що останній характеризується більш високим різноманіттям та чисельністю мікроорганізмів всіх еколого-трофічних груп. У ґрунті штучних насаджень бука більш інтенсивно протікають процеси трансформації та мінералізації органічної речовини, вище концентрації мінеральних солей, катіонів магнію, марганцю, заліза, аміачного та нітратного азоту.

Таким чином, ґрунтова екосистема під штучними насадженнями буку європейського більшою мірою проявляє риси лабільності та спроможності адаптуватися до несприятливих змін навколишнього середовища внаслідок антропогенного впливу або кліматичних змін.

Список літератури

- Aleksakhina T.Y., Shtina E.A. 1984. *Soil algae of forest biogeocenoses*. Moscow: Nauka. 150 p.
[Алексахина Т.И., Штина Э.А. 1984. *Почвенные водоросли лесных биогеоценозов*. Москва: Наука. 150 с.].
- Algae: Reference book*. 1989. Ed. S.P. Wasser. Kyiv: Nauk. Dumka. 608 p. [*Водоросли: Справочник*. 1989. Ред. С.П. Вассер. Київ: Наук. думка. 608 с.].
- Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography*. 2006. Eds P.M. Tsarenko, S. Wasser, E. Nevo. Ruggell: A.R.G. Gantner Verlag K.-G. Vol. 1. 713 p.
- Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography*. 2011. Eds P.M. Tsarenko, S. Wasser, E. Nevo. Ruggell: A.R.G. Gantner Verlag K.-G. Vol. 3. 511 p.
- Andreyuk E.I., Kopteva Zh.P., Zanina I.I. 1990. *Сyanobacteria*. Kyiv: Nauk. Dumka. 197 p.
[Андрейук Е.И., Коптева Ж.П., Занина И.И. 1990. *Цианобактерии*. Київ: Наук. думка. 197 с.].
- 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 O.V., Palamar-Mordvintseva H.M., Tsarenko P.M. 2016. *Flora of algae of Ukraine*. Vol. 12. *Charophyta*. Issue 2. *Mesostigmatophyceae, Klebsormidiophyceae, Coleohetophyceae, Charophyceae*. Kyiv. 281 p. [Борисова О.В., Паламар-Мордвинцева Г.М., Царенко П.М. 2016. *Флора водоростей України*. Т. 12. *Харофітові водорості*. Вип. 2. *Класи мезостігматофіцієві, клібсормідієфіцієві, колеохетофіцієві, харофіцієві*. Київ. 281 с.].
- Darinenko T.M. 2000. On the species composition of soil algae of the reserves of the Mountain Crimea (Ukraine). *Algologia*. 10(1): 54–62. [Дарієнко Т.М. 2000. О видовом составе почвенных водорослей заповедников Горного Крыма (Украина). *Альгология*. 10(1): 54–62].
- Demchenko E.N. 1999. New species of algae for the flora of Ukraine from forest soils of Ukrainian Polesie. *Algologia*. 9(2): 40–41. [Демченко Э.Н. 1999. Новые для флоры Украины виды водорослей из лесных почв Украинского Полесья. *Альгология*. 9(2): 40–41].
- Demchenko E.N., Mikhailyuk T.I., Rybchinsky O.V. 1998. Soil algae of the main stages of secondary succession on the right bank massif of the Kaniv Nature Reserve (Ukraine). *Algologia*. 8(4): 400–410. [Демченко Э.Н., Михайлюк Т.И., Рыбчинский О.В. 1998. Почвенные водоросли основных стадий вторичной сукцессии на правобережном массиве Каневского природного заповедника (Украина). *Альгология*. 8(4): 400–410].
- Ettl H., Gärtner G. 2014. *Syllabus der Boden-, Luft- und Flechtenalgen*. 2nd ed. Munich: Spektrum Akad. Verlag. 773 p.
- Hollerbach M.M., Shtyna E.A. 1969. *Soil algae*. Leningrad: Nauka. 228 p. [Голлербах М.М., Штина Э.А. 1969. *Почвенные водоросли*. Ленинград: Наука. 228 с.].
- Kirpenko N.I. 2013. *Allelopathic interactions of freshwater algae*. Kyiv: Nauk. Dumka. 255 p.
[Кирпенко Н.И. 2013. *Алелопатическое взаимодействие пресноводных водорослей*. Киев: Наук. думка. 255 с.].

- Kopiy M., Oliferchuk V., Kopiy L. 2016. Species diversity of soil micromycetes in the territory of the Novorozdilsky Sulfur Quarry. *Sci. Bull. UNFU*. 26(3): 278–287. [Копій М., Оліферчук В., Копій Л. 2016. Видове різноманіття мікроміцетів ґрунту території Новorozдільського сірчаного кар'єру. *Наук. вісн. НЛТУ*. 26(3): 278–287]. <https://doi.org/10.15421/40260346>
- Kostikov I.Yu. 1991. Algae in the soils of broad-leaved forests of the Right Bank Forest-Steppe of Ukraine. *Algologia*. 1(3): 42–50. [Костиков И.Ю. 1991. Водоросли почв широколиственных лесов Правобережной Лесостепи Украины. *Альгология*. 1(3): 42–50].
- Kostikov I.Yu., Darienko T.M. 1996. On the composition of soil algae in the Mountain Crimea (Ukraine). *Algologia*. 6(3): 285–294. [Костиков И.Ю., Дариенко Т.М. 1996. О составе почвенных водорослей Горного Крыма (Украина). *Альгология*. 6(3): 285–294].
- Kostikov I.Yu., Romanenko P.O., Demchenko E.M., Darienko T.M., Mikhailyuk T.I., Rybchinskiy O.V., Solonenko A.M. 2001. *The soil algae from Ukraine (history and methods of investigation, classification system, floristics)*. Kyiv: Phytosociocenter. 300 p. [Костиков И.Ю., Романенко П.О., Демченко Е.М., Дариенко Т. М., Михайлюк Т.И., Рибчинський О.В., Солоненко А.М. 2001. *Водорості ґрунтів України (історія та методи дослідження, система, конспект флори)*. Київ: Фітосоціоцентр. 300 с.].
- Matvienko O.M., Dogadina T.V. 1978. *Yellow-green algae – Xantophyta. Determinant of freshwater algae of the Ukrainian SSR*. X. Kyiv: Nauk. Dumka. 511 p. [Матвієнко О.М., Догадіна Т.В. 1978. *Жовтозелені водорості – Xantophyta. Визначник прісноводних водоростей Української РСР*. X. Київ: Наук. думка. 511 с.].
- Mazor G., Kidron G. J., Vonshak A., Abeliovich A. 1996. The role of cyanobacterial exopolysaccharides in structuring desert microbial crusts. *FEMS Microbiol. Ecol.* 21(2): 121–130.
- Melnyk V.I., Dzyba A.A., Kharchyshyn V.T., Savchuk R.I. 2010. Introduction of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in green belt of Kyiv. *Plant Introduct.* 1: 20–25. [Мельник В.І., Дзиба А.А., Харчишин В.Т., Савчук Р.І. 2010. Інтродукція бука європейського (*Fagus sylvatica* L.) в зелену зону м. Києва. *Інтродукція рослин*. 1: 20–25.]
- Mikhailyuk T.I., Kondratyuk S.Ya., Nyporko S.O., Darienko T.M., Demchenko E.M., Voytsekhovych A.O. 2011. *Lichens, bryophytes and terrestrial algae of granite canyons of Ukraine*. Kyiv: Alterpress. 398 p. [Михайлюк Т.І., Кондратюк С.Я., Нипорко С.О., Дариенко Т.М., Демченко Е.М., Войцехович А.О. 2011. *Лишайники, мохоподібні та наземні водорості гранітних каньйонів України*. Київ: Альтерпрес. 398 с.].
- Mukha V.D. 2004. *Natural-anthropogenic evolution of soils*. Moscow: Kolos. 271 p. [Муха В.Д. 2004. *Естественно-антропогенная эволюция почв*. Москва: Колос. 271 с.].
- Pecheneva S.Ia. 1998. Agrochemical analysis methods. *Havrysh*. 4: 24–26. [Печенева С.Я. 1998. Методы агрохимического анализа. *Гавриш*. 4: 24–26].
- Rinkis G.Ya., 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.].
- Romanenko P.A. 1999. Soil algae of alder slate in the Chernogora mountain range of the Carpathian Biosphere Reserve (Ukrainian Carpathians). *Algologia*. 9(2): 123–124.

- [Романенко П.А. 1999. Почвенные водоросли ольхового сланика Черногорского массива Карпатского биосферного заповедника (Украинские Карпаты). *Альгология*. 9(2): 123–124].
- Saint Martin J.P., Pestrea S., Mansour B., Notonier R. 1999. Diatomees associees aux tapis microbiens: Une cle pour la comprehension des constructions microbiennes anciennes? *Cryptogam. Algologie*. 20(2): 108–109.
- Sakevich O.Y., 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.].
- Shynder O. 2018. Natural plant communities on the territory of M.M. Gryshko National Botanical Garden of the NAS of Ukraine. In: *Landscape architecture in botanical gardens and arboreturns*: Mat. conf. (Kyiv–Uman'). Pp. 337–342. [Шиндер О.І. 2018. Природні угруповання на території Національного ботанічного саду ім. М.М. Гришка НАН України. В кн.: *Ландшафтна архітектура в ботанічних садах і дендропарках*: Мат. конф. (Київ – Умань). С. 337–342.]
- Sirenko L.A., Kondratyeva N.V. 1998. The role of *Cyanophyta* in nature. *Algologia*. 8(2): 117–131. [Сиренко Л.А., Кондратьєва Н.В. 1998. Роль *Cyanophyta* в природі. *Альгология*. 8(2): 117–131].
- Taras U.M. 2014. The use of indicators of the species diversity of soil micromycetes in the assessment of environmental disturbance due to the action of anthropogenic factors. *Sci. Bull. UNFU*. 24(8): 136–139. [Тарас У.М. 2014. Застосування показників видового різноманіття мікроміцетів ґрунту при оцінювання порушення навколишнього середовища внаслідок дії антропогенних факторів. *Наук. вісн. НЛТУ*. 24(8): 136–139].
- Yermeev R. 2020. Ecological problems of modernity. In: *Ecology. Human health. Problems and prospects of humanity*: Mat. conf. Kharkiv. Pp. 59–63. [Єремєєв Р. 2020. Екологічні проблеми сучасності. В кн.: *Екологія. Здоров'я людини. Проблеми та перспективи людства*: Мат. конф. Харків. С. 59–63].

Tsarenko P.M. ^{1†} (<https://orcid.org/0000-0003-0711-8573>)

Zaimenko N.V. ² (<https://orcid.org/0000-0003-2379-1223>)

Demchenko E.M. ¹ (<https://orcid.org/0000-0003-4997-6744>)

Mikhailyuk T.I. ¹ (<https://orcid.org/0000-0002-7769-2848>)

Didyk N.P. ² (<https://orcid.org/0000-0002-8969-2239>)

Ellanska N.E. ² (<https://orcid.org/0000-0002-3634-5313>)

Kharitonova I.P. ² (<https://orcid.org/0000-0001-9540-5278>)

Benderychek T.Yu. ² (<https://orcid.org/0000-0003-2954-0118>)

Melnyk V.I. ² (<https://orcid.org/0000-0001-8315-8468>)

¹ M.G. Kholodny Institute of Botany, NAS of Ukraine,

2 Tereshchenkivska Str., Kyiv 01004, Ukraine

² M.M. Gryshko National Botanical Garden, NAS of Ukraine,

1 Tymiryazevska Str., Kyiv 01014, Ukraine

Comparative analysis of soil ecosystems of protected and artificially created beech forests

Peculiarities of soil ecosystems (algae, microbiocenosis, agrochemical and agrophysical characteristics) of the Uholsko-Shirokoluzhanskyi beech relict forests of the Carpathian Biosphere Reserve, as well as artificial European beech (*Fagus sylvatica* L.) plantations located on the botanical and geographical plots "Ukrainian Carpathians" of the M.M. Gryshko National Botanical Garden of NAS of Ukraine. Soil samples were collected from May to September during 2020–2021. The species composition of soil microalgae, the number of ecological and trophic groups of microorganisms, agrophysical and agrochemical characteristics of soils were analyzed. The predominance of green algae with a significant diversity of green flagellates and the complete absence of cyanobacteria are typical features of forest soils. The small number of detected species (12 in beech relict forests and 15 in artificial beech plantations) indicates shaded forest ecosystems which are typical for beech forests. Despite common features, the species composition of soil algae of both phytocenoses is quite different. The soils under the beech relict forests are characterized by a significant predominance of green algae, among which essential number of *Trebouxiophyceae* representatives with aerophytic ecology were found. It indicates the mountainous nature of the soil algal flora. Soils under artificial beech plantations are characterized by a richer species diversity and predominance of *Chlorophyceae* representatives, which is typical for lowland forests. A characteristic feature of protected and artificially created beech forests was the relative high number of micromycetes. Correlation analysis of research results showed a positive relationship between algal diversity and the abundance of two eco-trophic groups of microorganisms: actinomycetes and ammonifiers. In addition, the growth of algal diversity was positively correlated with the content of Ca and Mg, and negatively with the content of P.

Key words: *Fagus sylvatica*, relic forests, artificial plantations, soil ecosystems, algae, microbiocenosis, biodiversity, mineral nutrition, transformation of organic matter

Citation. Tsarenko P.M.[†], Zaimenko N.V., Demchenko E.M., Mikhailyuk T.I., Didyk N.P., Ellanska N.E., Kharitonova I.P., Benderychek T.Yu., Melnyk V.I. 2023. Comparative analysis of soil ecosystems of protected and artificially created beech forests. *Algologia*. 33(4): 292–308. <https://doi.org/10.15407/alg33.04.292>