https://doi.org/10.15407/frg2026.05.420
УДК 581.1:581.4:582.929.4:631.527(477.4)

БІОЛОГО-МОРФОЛОГІЧНІ ТА ФІЗІОЛОГО-БІОХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ГЕНОТИПІВ *MENTHA* L. ЗА УМОВ ІНТРОДУКЦІЇ В ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

Д.Б. РАХМЕТОВ[1], О.П. БОНДАРЧУК[1], С.М. КОВТУН-ВОДЯНИЦЬКА[1], О.М. ВЕРГУН[1], С.О. РАХМЕТОВА[1], С.В. ЛІТВІНОВ[2], Н.М. РАШИДОВ[2], Н.К. КУЦОКОНЬ[2]

[1]Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка Національної академії наук України
01103 Київ, вул. Садово-Ботанічна, 1
[2]Інститут клітинної біології та генетичної інженерії Національної академії наук України
03143 Київ, вул. Академіка Заболотного, 148
e-mail: rjb2000.16@gmail.com, bondbiolog@gmail.com

Метою дослідження було з'ясування біолого-морфологічних та фізіолого-біохімічних особливостей генотипів *Mentha* L. в умовах інтродукції у Правобережному Лісостепу України, оцінка їх адаптивного потенціалу та встановлення можливості використання співвідношення Amide I/Amide II як маркера адаптаційних процесів. Об'єктами дослідження були п'ять генотипів рослин різного географічного походження: *M. longifolia* var. *asiatica* (Лерикський, MF-1); *M. rotundifolia* (Масалинський, MF-2); *M. rotundifolia* (Ленкоранський, MF-3); *M. spicata* (Талишський, MF-4); *M. spicata* (Глевахівський ДСГВ, MF-5). У фазу цвітіння проведено комплексні морфометричні, мікроморфологічні, фізіолого-біохімічні та спектроскопічні дослідження. Встановлено істотні відмінності за морфологічними та біохімічними показниками залежно від генотипних особливостей рослин. Висота рослин варіювала від 65 до 135 см, довжина суцвіть — від 1,25 до 8,2 см. Найвищий вміст сухої речовини виявлено у генотипів MF-4 (28,84 %) та MF-2 (28,53 %). Генотип MF-4 характеризувався максимальним накопиченням загальних цукрів (3,81 %) і моноцукрів (3,75 %), тоді як найбільший вміст дубильних речовин зафіксовано у MF-2 (6,7 %). Аналіз індукції флуоресценції хлорофілу показав високий функціональний стан фотосинтетичного апарату всіх досліджених генотипів. Найвище значення максимальної індукції флуоресценції (F_{max} = 2416 відн. од.) відзначено у генотипу MF-4. Значення індикаторного показника K_1, розрахованого за методикою флуорометра «Флоратест», варіювали в межах 0,971—0,977, що свідчить про добрий функціональний стан фотосинтетичного апарату досліджених рослин. Спектроскопічний аналіз виявив відмінності за співвідношенням білкових доменів Amide I/Amide II, які відображають особливості структурної організації білкового комплексу та адаптаційних реакцій генотипів. Отримані результати свідчать про високий адаптаційний потенціал досліджених генотипів м'яти в умовах інтродукції.

Цитування: Рахметов Д.Б., Бондарчук О.П., Ковтун-Водяницька С.М., Вергун О.М., Рахметова С.О., Літвінов С.В., Рашидов Н.М., Куцоконь Н.К. Біолого-морфологічні та фізіолого-біохімічні особливості генотипів *Mentha* L. за умов інтродукції в Лісостепу України. *Фізіологія рослин і генетика*. 2026. 58, № 5. С. 420—436. https://doi.org/10.15407/frg2026.05.420

This is open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Найперспективнішим за сукупністю морфологічних, фізіолого-біохімічних і фотосинтетичних показників виявився генотип MF-4 (*Mentha spicata*, Талишський). Співвідношення Amide I/Amide II може бути використане як перспективний біохімічний маркер оцінки адаптаційних процесів та успішності інтродукції представників роду *Mentha.*

Ключові слова: *Mentha* L.*,* генотип, інтродукція, морфологічні ознаки, мікроморфологія, фотосинтетична активність, флуоресценція хлорофілу, біохімічний склад, ІЧ-спектроскопія, адаптаційний потенціал.

Натепер вітчизняна галузь лікарських фітозасобів потерпає від низки проблем, які в останні роки значно загострилися. В Україні площі лікарських рослин загалом та ефіроолійних зокрема зменшилися майже в 6 разів, виробництво ефірних олій — майже втричі. Найбільше шкоди завдано цій сфері через анексію російською федерацією Кримського півострова, а також розгортання військових дій на півдні та сході України — це призвело до скорочення обсягів виробництва ефіроолійних культур майже на 40 % порівняно з 2014 р. [1]. Наразі розміри втрат ще важче оцінити через повномасштабну росіську агресію в окремих регіонах нашої держави.

Щоб компенсувати недостатню кількість лікарської рослинної сировини, вітчизняні підприємства її імпортують (майже 60 %), стимулюють розширення посівних площ у західних та центральних регіонах України, а також здійснюють заготівлю у природних місцях зростання. Такий підхід дає змогу лише частково вирішити цю проблему, адже наявні сорти рослин переважно рекомендовані для умов південних регіонів країни і важко адаптуються до умов зростання у північних регіонах. З огляду на це необхідно розширювати асортимент ефіроолійних культур, здійснювати пошук ефективних механізмів їх адаптації до нових умов зростання з урахуванням глобальних змін клімату, щоб досягати високих показників продуктивності рослин.

Однією із найвідоміших ефіроолійних культур Старого та Нового світу є м'ята. Рід *Mentha* L. налічує нині 25 видів, поширених по всій планеті [2]. Серед них особливий науковий і практичний інтерес становлять рослини видів *Mentha spicata*, *M. rotundifolia* та *M. longifolia*, які широко використовуються як джерела фітосировини з високим вмістом цінних ефірних олій і біологічно активних сполук. Представники роду характеризуються значним вмістом фенольних сполук, флавоноїдів і терпенів [3]. Зокрема, *M. spicata* є однією з найпоширеніших ефіроолійних культур, яка має високий вміст карвону та інших монотерпенів. Дослідження останніх років показують, що рослини цього виду накопичують значну кількість фенольних сполук і флавоноїдів з антиоксидантною активністю, які беруть участь у захисних реакціях рослин [3, 4]. За умов абіотичного стресу у *M. spicata* відбувається перебудова вторинного метаболізму, зокрема посилення синтезу антиоксидантів, що сприяє підвищенню стійкості рослин.

Щодо рослин *M. rotundifolia* варто відзначити значну варіабельність хімічного складу їх ефірної олії та вмісту біологічно активних

сполук. Дослідження показують, що рослини цього виду здатні накопичувати широкий спектр вторинних метаболітів, зокрема фенольні сполуки, які відіграють важливу роль у захисних реакціях [5]. Встановлено, що *M. rotundifolia* проявляє високу чутливість до умов довкілля, що супроводжується змінами метаболічних процесів та може використовуватись як модель для вивчення адаптаційних реакцій рослин.

Вид *M. longifolia* є одним із найпоширеніших і поліморфних представників цього роду, який відзначається широким екологічним ареалом та значною пластичністю до умов зростання. Рослини цього виду характеризуються високим вмістом ефірної олії та різноманітністю її компонентного складу, який залежить від екологічних умов і генотипу. Останні дослідження свідчать, що цей вид є перспективною моделлю для вивчення адаптивних реакцій рослин на абіотичні стреси, зокрема водний та температурний [6, 7].

За даними бази PLUTO, у світі створено понад 200 сортів м'яти [8]. Водночас у Державному реєстрі сортів рослин, придатних для поширення в Україні, станом на 10.04.2026 р. із 22 зареєстрованих сортів видів *Mentha* фактично підтримується лише один — створений у Національному ботанічному саду імені М.М. Гришка НАН України [9].

Біохімічні особливості рослин видів роду *Mentha*, зокрема їхня здатність до синтезу й накопичення азотовмісних сполук, відіграють важливу роль у формуванні адаптивних реакцій рослин на стресові чинники. Амінокислоти та їхні похідні відіграють ключову роль у метаболізмі рослин, забезпечуючи синтез білків і регуляцію азотного обміну [10, 11]. Відомо, що за надлишкового накопичення амонію, який бере участь в їх утворенні, у рослинних тканинах можуть виникати токсичні ефекти. У зв'язку з цим у рослин сформувалися механізми його детоксикації за участю амідів (глютаміну та аспарагіну), які забезпечують зв'язування, транспорт і повторне використання азоту в процесах біосинтезу білків [12]. Співвідношення білків та амідів у клітинах рослин є варіабельним і може відображати інтенсивність метаболічних процесів, зокрема за умов дії стресових чинників. Крім того, відомо, що аміди та їхні попередники — глутамінова й аспарагінова кислоти — беруть участь у процесах переамінування та синтезі інших амінокислот, що визначає їх важливе значення для підтримання метаболічної рівноваги в рослинному організмі [13, 14].

Деякі рослинні аміди відіграють важливу роль у взаємодії рослин з патогенами, а також у формуванні відповіді на біотичні й абіотичні стреси [15, 16]. Встановлено, що зростання їх концентрації може спостерігатися за умов сольового стресу, що пов'язано з осморегуляцією та запобіганням зневодненню клітин [17]. Аміди гідроксикоричної кислоти розглядаються як маркери стресового стану рослин, оскільки їх накопичення у клітинних стінках вегетативних і генеративних органів сприяє захисту від проникнення інфекцій [18]. Зокрема, підвищення вмісту кловаміду асоціюється зі зростанням стійкості рослин до *Phytophthora* spp. [19].

Отже, дослідження вмісту амідів та інших вторинних метаболітів у рослин має важливе значення, оскільки вони можуть бути маркерами стійкості до дії біотичних і абіотичних чинників довкілля.

Відомо, що на співвідношення білкових доменів Amide I/Amide II у рослинній сировині впливає широке коло стресових чинників. Це один із ключових показників, який дає змогу відстежувати реакцію рослини на чинники навколишнього середовища, що виходять за межі фізіологічного оптимуму (солоність ґрунту, важкі метали, спека або посуха). Зміни цього співвідношення свідчать про модифікації фолдингу білків, пропорцію α-спіралей щодо β-листів та можливу денатурацію молекул протеїнів [20]. У цьому контексті співвідношення Amide I/Amide II, яке характеризує конформаційні особливості білків, відображає структурно-функціональний стан білкових молекул і розглядається як чутливий індикатор фізіологічних змін у рослинах за комбінованої дії різноманітних стресорів, зокрема в умовах інтродукції.

Попри наявні дані щодо біолого-морфологічних і біохімічних особливостей представників роду *Mentha* L., питання комплексної оцінки адаптивності різних генотипів за умов інтродукції, а також можливості використання структурно-білкових показників як маркерів інтродукційного стресу та екотипової диференціації залишаються недостатньо вивченими.

З огляду на наведений аналіз вітчизняної та світової літератури, метою дослідження було з'ясування біолого-морфологічних, фізіолого-біохімічних та ІЧ-спектроскопічних особливостей генотипів *Mentha* L. в умовах інтродукції у Правобережному Лісостепу України, оцінка їх адаптивного потенціалу та встановлення можливості використання співвідношення Amide I/Amide II як маркера адаптаційних процесів.

Методика

Дослідження проведено на інтродукційних ділянках відділу культурної флори Національного ботанічного саду імені М.М. Гришка НАН України та в Дослідному сільськогосподарському виробництві Інституту фізіології рослин і генетики НАН України (ДСВ ІФРГ НАН України, сел. Глеваха). Територія досліджень розташована в межах Правобережного Лісостепу України, який характеризується помірно континентальним кліматом із нестійким зволоженням та вираженими сезонними коливаннями температури повітря.

Польові досліди проведено відповідно до існуючих методик для Держсортмережі і науково-дослідних установ у чотириразовому повторенні. Розмір посівних ділянок — 35—40 м^2, їх облікова площа — 25—30 м^2. Розміщення варіантів за повтореннями було рандомізоване.

У дослідження було залучено п'ять генотипів рослин роду *Mentha* L.: *M. longifolia* var. *asiatica* (Лерикський, MF-1); *M. rotundifolia* (Масалинський, MF-2); *M. rotundifolia* (Ленкоранський, MF-3); *M. spicata* (Талишський, MF-4); *M. spicata* (Глевахівський ДСГВ, MF-5). Кожен генотип був представлений понад 100 рослинами залежно від збереженості рослин у польових умовах.

Упродовж періоду активного накопичення фітомаси, зокрема у фазу цвітіння, відбирали рослинні зразки. Для біолого-морфологічних,

морфометричних, мікроморфологічних, фізіолого-біохімічних та спектроскопічних досліджень відбирали по 25 типових рослин кожного генотипу. Зразки відбирали у трьох біологічних повтореннях.

Визначали висоту рослин, кількість міжвузлів, кількість бічних пагонів, довжину суцвіть, довжину та ширину листкової пластинки, а також довжину черешка. Морфологічний опис рослин здійснювали з використанням загальноприйнятої ботанічної термінології та методичних підходів до вивчення морфологічних ознак рослин. Лінійні параметри рослин і окремих органів визначали за допомогою електронного цифрового штангенциркуля «Generic» та вимірювальної стрічки «Xiaomi Duka SD». Отримані результати використовували для порівняльного аналізу морфологічних ознак та оцінки адаптивних особливостей досліджуваних генотипів в умовах інтродукції.

Мікроморфологічні дослідження листків, стебел і суцвіть проводили за допомогою цифрового мікроскопа «SIGETA Expert 5.0 Mpx» при збільшенні ×100. Аналізували характер та інтенсивність опушення, особливості поверхні вегетативних і генеративних органів, а також наявність, розміщення та щільність ефіроолійних залоз.

Вміст сухої речовини визначали після висушування рослинних зразків за температури 105 °C до постійної маси [21], загальний вміст цукрів — фотометричним методом за Бертраном із використанням розчинів Фелінга [22], загальний вміст аскорбінової кислоти — титрометричним методом з 2,6-дихлорфеноліндофенолом згідно з Ahmed et al. [23], вміст вільних органічних кислот — відповідно до методики Boiago et al. [24], вміст дубильних речовин — титруванням розчином індигокарміну [25]. Вміст загального азоту в зразках знаходили методом К'єльдаля з використанням апарата KDN-04D (Kjeldahl Digestion Unit) та парового дистилятора «ATN-100».

Функціональний стан фотосинтетичного апарату оцінювали методом індукції флуоресценції хлорофілу із застосуванням портативного флуорометра «Флоратест» (Україна) відповідно до методичних рекомендацій [26, 27]. Реєстрували основні параметри індукційної кривої: F_0 — початковий рівень індукції флуоресценції; F_{pl} — рівень флуоресценції «плато»; F_{max} — максимальне значення індукції флуоресценції; F_{st} — стаціонарний рівень флуоресценції після світлової адаптації листка. На підставі зазначених параметрів розраховували індексні показники, рекомендовані для аналізу даних «Флоратеста»: K_1 — індикаторний показник впливу екзогенних чинників, який визначали за формулою $(F_{max} - F_0)/F_{max}$; K_2 (Rfd) — індекс життєздатності $((F_{max} - F_0)/F_{st})$; QP — показник фотохімічного гасіння $((F_{max} - F_{st})/(F_{max} - F_0))$. Вимірювання проводили на живих листках середньої частини головного пагона після темнової адаптації тривалістю 5 хв.

Додатково вивчали особливості різних генотипів *Mentha* L., а також вплив стресу за інтродукції рослин в Україні за стресовим маркером відношення вмісту білкових доменів Amide I/Amide II. ІЧ-спектри вимірювали у дрібнодисперсному порошку висушених пагонів на спектрометрі «Nicolet FTIR IS50» (Thermo Fisher Scientific, США) лабораторії епігенетики Державної установи «Інститут геронтології ім. Д.Ф. Чеботарьова НАМН України» у спектральному діапазоні

400—4000 $см^{-1}$. Спектральні піки Amide I та Amide II визначали на підставі літературних даних та візуально у спектральних областях 1620—1650 $см^{-1}$ (Amide I) і 1520—1550 $см^{-1}$ (Amide II).

Аналіз ІЧ-спектрів проводили програмними пакетами Thermo Scientific OMNIC (Thermo Fisher Scientific, USA), Microsoft Office Excel (Microsoft, USA), SPSS 17.0 (IBM, USA). Здійснювали 20 вимірювань кожної проби (варіанта). Спектри отримували усередненням 32 сканувань одного й того самого поля з фільтрацією за фоновим спектром. Спектрограми вирівнювали за базовою лінією та згладжували за допомогою функції Савицького—Голея з метою фільтрації спектрального шуму. Відносну концентрацію амідних доменів оцінювали за площею відповідних піків (центр піку ± 12 $см^{-1}$) на спектрограмі спектра поглинання з урахуванням вирівнювання за базовою лінією. Всі спектри вимірювали з роздільною здатністю 4 $см^{-1}$ [28].

Усі експериментальні дані візуалізували у вигляді графіків із використанням програми Microsoft Office Excel (Microsoft, USA). Статистичну обробку результатів здійснювали з використанням програмного середовища з відкритим кодом R. Результати подано у вигляді середніх значень повторень ± стандартна похибка (SE). Статистичні відмінності між генотипами оцінювали за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (One-Way ANOVA) та непараметричного U-критерію Манна-Уітні за рівня значущості $p < 0,01$.

Результати та обговорення

З'ясовано, що у генеративний період (фаза цвітіння) досліджувані генотипи рослин роду *Mentha* відрізнялися за габітусом. Так, рослини генотипів MF-4 (*M. spicata*, Талишський) та MF-5 (*M. spicata*, Глевахівський ДСГВ) мали прямий габітус, тоді як генотипи MF-1 (*M. longifolia* var. *asiatica*, Лерикський), MF-2 (*M. rotundifolia*, Масалинський) і MF-3 (*M. rotundifolia*, Ленкоранський) характеризувалися розлогим габітусом.

Висота рослин у цей період варіювала від 65,0 до 135,0 см, при цьому найбільші значення зафіксовано у генотипу MF-2. Стебла рослин генотипу MF-4 відзначалися помірною інтенсивністю антоціанового забарвлення, тоді як у решти зразків воно було слабко виражене. Кількість міжвузлів на стеблі варіювала залежно від генотипу в межах 12—19, а кількість бічних пагонів — 3—10. Максимальні значення обох показників відзначено у генотипу MF-5 (рис. 1).

Листки рослин мали зелене забарвлення помірної інтенсивності. Форма краю листкової пластинки у MF-2 зубчаста, у MF-4 та MF-5 — пилчаста, у генотипу MF-3 — великогородчаста. За формою верхівки листкової пластинки зразки різнилися. Гостру форму мали генотипи MF-4 та MF-5, а тупу форму — MF-2 та MF-3.

Довжина листкової пластинки різних генотипів сягала 3,8—7,0 см (найбільша у MF-2), ширина — 2,2—3,4 (максимальна у MF-3), черешок — 0,5—1,2 см (найдовший у MF-1), а у деяких генотипів (MF-2, MF-3 та MF-5) він був відсутній (рис. 2).

Суцвіття досліджуваних рослин відрізнялися залежно від виду та генотипу. У всіх зразків вони мали циліндричну форму, а їхня довжи-

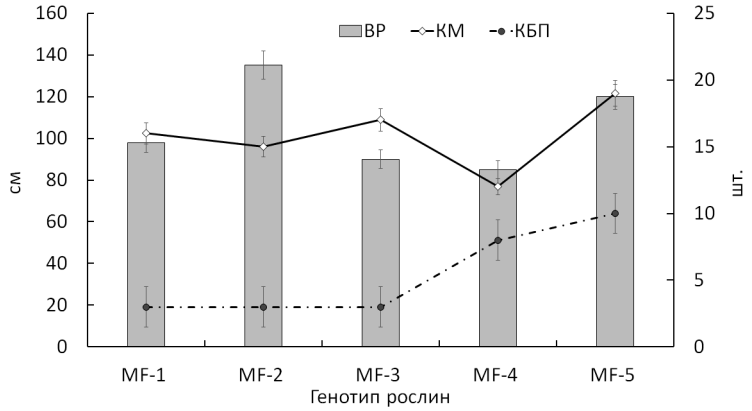


Рис. 1. Біометричні параметри рослин різних видів та генотипів роду *Mentha*: ВР — висота рослин; КМ — кількість міжвузлів; КБП — кількість бічних пагонів

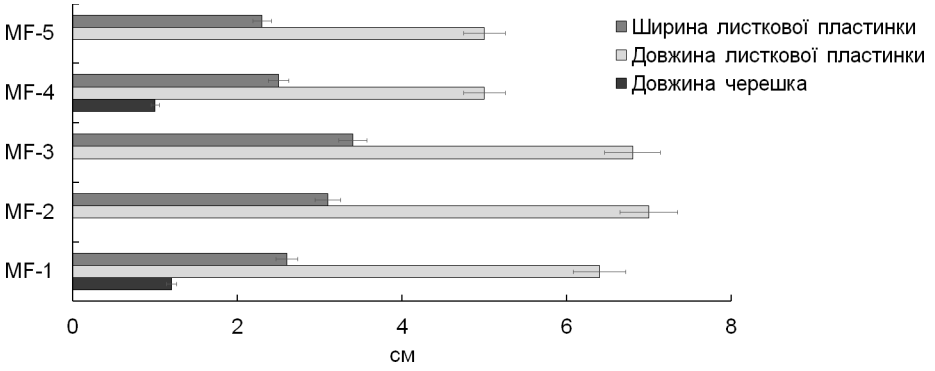


Рис. 2. Розмір листків рослин різних видів та генотипів роду *Mentha* у фазу цвітіння

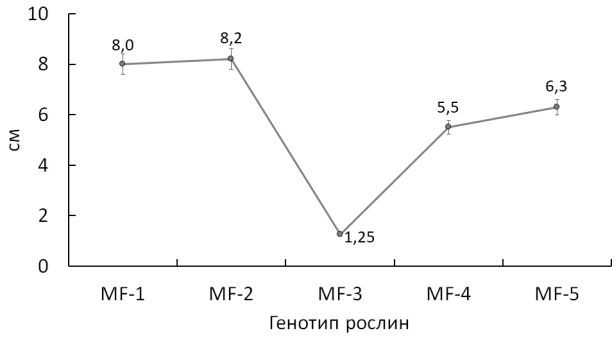


Рис. 3. Довжина суцвіття рослин різних видів та генотипів роду *Mentha* у фазу цвітіння

на варіювала від 1,25 до 8,2 см. Найбільшу довжину суцвіть зафіксовано у генотипу MF-2 (рис. 3).

Виявлені морфологічні відмінності можуть відображати адаптивні реакції рослин на умови інтродукції та бути пов'язаними з особливостями їх метаболізму.

Проведено мікроморфологічний аналіз вегетативних і генеративних органів інтродукованих генотипів. Встановлено, що апікальна

частина листкової пластинки має відмінності в опушенні — у генотипів рослин MF-1 та MF-3 густе волохате опушення, у представників MF-2 опушення краю листкової пластинки рідке, у генотипів MF-4 та MF-5 жорстке опушення із поодинокими конічними волосками (рис. 4).

Адаксіальна поверхня листкової пластинки також має відмінності в опушенні — MF-1, MF-2 та MF-3 мають густе волохате опушення, складене із однокінцевих серпоподібних волосків білого забарвлення, які запобігають швидкому випаровуванню води й проникненню сонячної радіації всередину листка. У рослин MF-4 й MF-5 адаксіальна поверхня рідко опушена ниткоподібними волосками, листкова пластинка значно щільніша на відміну від інших інтродуцентів. В усіх представників чітко виражені залози із янтарним блиском де, очевидно, накопичується ефірна олія (рис. 5).

Абаксіальна поверхня у рослин роду *Mentha* має такий самий тип та щільність опушення, як і адаксіальна. В усіх представників окрім *M. spicata* на жилках листків спостерігається густе опушення зокрема у MF-1, MF-2 та MF-3 воно представлене значно (в 1,5—2,0 рази) довшими ниткоподібними щільно переплетеними між собою волосками, а у MF-4 і MF-5 — конічними. Також варто зазначити, що у MF-4 і MF-5 на абаксіальній поверхні зафіксовано ефіроолійні залози, чого не спостерігали у решти досліджених генотипів (рис. 6).

Досліджувані генотипи, подібно до більшості представників родини Lamiaceae, характеризуються чотиригранними стеблами, що мають квадратний поперечний переріз. Мікроморфологічний аналіз стебла дав змогу також виявити відмінності в опушенні, зокрема *M. longifolia* var. *asiatica* мала густий покрив, утворений однокінцеви-

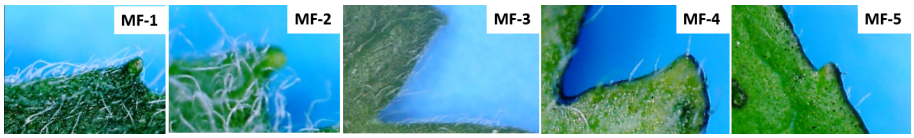


Рис. 4. Апікальна частина листкової поверхні рослин роду *Mentha* різних генотипів

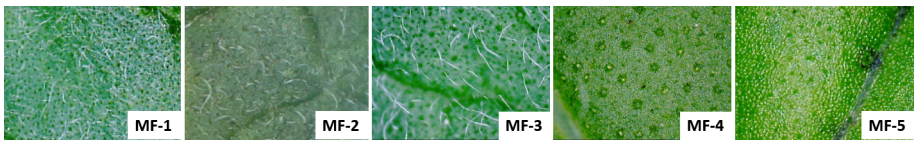


Рис. 5. Адаксіальна поверхня листкової пластинки рослин роду *Mentha* різних генотипів



Рис. 6. Абаксіальна поверхня листкової пластинки рослин роду *Mentha* різних генотипів

ми серпоподібними волосками, у решти представників опушення майже відсутнє, хоча в посушливі роки з'являється у вигляді рідко розміщених однокінцевих конічних волосків (рис. 7).

У більшості досліджуваних генотипів квітки фіолетові, зібрані в густі, колосоподібні суцвіття 5,4—8,2 см завдовжки, до 1 см завширшки. У рослин генотипу MF-3 суцвіття дуже коротке — 1,0—1,5 см, білого забарвлення. Чашечка 1,5—2,0 мм завдовжки, яйцеподібна, залозиста, густоопушена (рис. 8).

Отже, детальні мікроморфологічні дослідження вегетативних і генеративних органів рослин уможливили встановлення низки відмінностей у представників роду *Mentha*. Примітно, що наявність опушення (зокрема його густість) у рослин є певною мірою проявом реакції організму на умови довкілля. У спекотні роки з низьким рівнем опадів воно дає змогу вберегти організм рослини від надмірної втрати вологи та оптимізувати фізіологічні потреби для синтезу усіх необхідних біологічно активних сполук, утворити життєздатне насіння тощо. Результати даних досліджень можуть бути використані у подальшій селекційній роботі для створення високопродуктивних сортів із підвищеним рівнем стійкості до дії біотичних та абіотичних чинників навколишнього середовища.

Біохімічний аналіз рослин виявив, що у фазу цвітіння різні види та генотипи роду *Mentha* характеризувалися досить високим вмістом сухої речовини у надземній масі (рис. 9). Найвищий показник зафіксований у генотипів MF-2 — 28,53 та MF-4 — 28,84 %. Найменший вміст сухої речовини був у генотипу MF-3. Окремі представники роду *Mentha* здатні накопичувати у надземній масі близько 26 % сухої речовини, як показано у роботі Kannan et al. [29].

За вмістом загальних і моноцукрів генотип MF-4 мало не вдвічі переважав інші інтродуценти — 3,81 %. У решти представників вміст

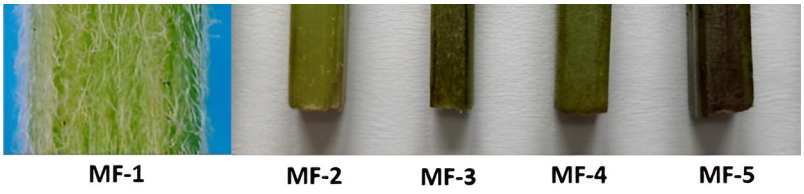


Рис. 7. Морфологічні особливості стебла рослин роду *Mentha* різних генотипів



Рис. 8. Морфологічні особливості суцвіття рослин роду *Mentha* різних генотипів

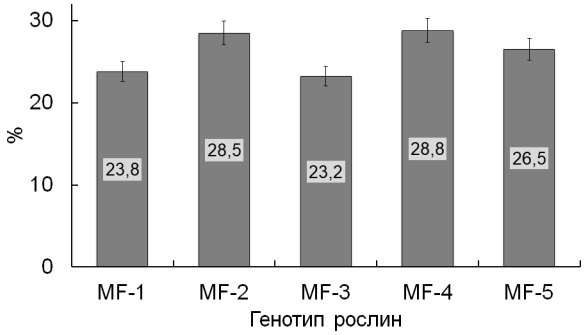


Рис. 9. Вміст сухої речовини у рослин різних видів і генотипів роду *Mentha* у фазу цвітіння

вуглеводів був майже однаковий, але найменші показники спостерігалися у рослин MF-1 — 1,95 та 1,90 %, відповідно. За вмістом аскорбінової кислоти також спостерігали схожість у більшості інтродукованих генотипів, але генотип MF-4 демонстрував максимальний вміст — 856,3 мг%, найменшим цей показник був у генотипу MF-1 — 588,9 мг% (рис. 10). Як вказують у своїй праці Hutsol et al. [30] вміст цукрів у зеленій масі рослин може коливатися в межах 5 %. Також вони зазначають, що вміст вітаміну С у фітомасі може коливатися в діапазоні 450—550 мг% і залежить від видових особливостей та умов зростання.

За титрованою кислотністю найвищим показником характеризувалися генотипи MF-2 та MF-1 — 1,30—1,35 %, найнижчим — рослини генотипу MF-5 — 0,71 % (рис. 11). Слід зазначити, що у літературних джерелах титрованій кислотності рослинної сировини представників роду *Mentha* не приділено уваги.

Вміст дубильних речовин у зразках різнився — найбільше їх акумулювали рослини генотипу MF-2 — 6,83 %, найменше — MF-3 — 2,2 % (рис. 12). Цей показник у досліджених нами інтродуцентів досить близький до зазначеного у роботі Maier et al. [31], очевидно це є генетично зумовлена особливість рослин.

Вміст загального азоту в усіх інтродукованих генотипів був майже на однаковому рівні (1,0—1,4 %), найвищим виявився у рослин MF-2 — 1,43 %, найменшим — у MF-3 — 1,04 % (рис. 13). Примітно,

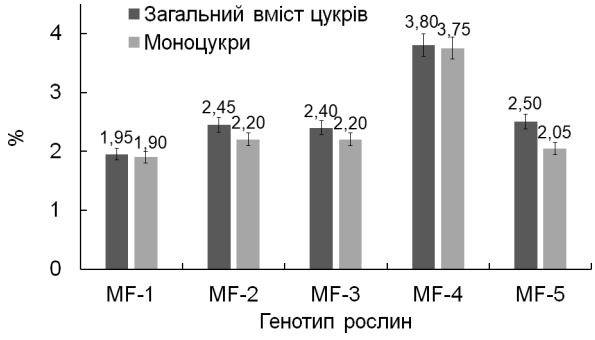


Рис. 10. Загальний вміст цукрів та моноцукрів у рослин різних видів і генотипів роду *Mentha* у фазу цвітіння

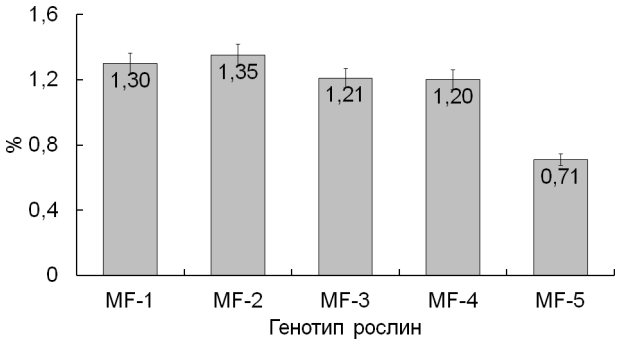


Рис. 11. Титрована кислотність у рослин різних видів і генотипів роду *Mentha* у фазу цвітіння

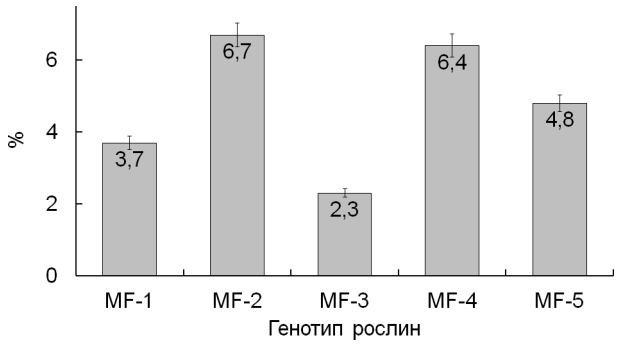


Рис. 12. Вміст дубильних речовин у рослин різних видів і генотипів роду *Mentha* у фазу цвітіння

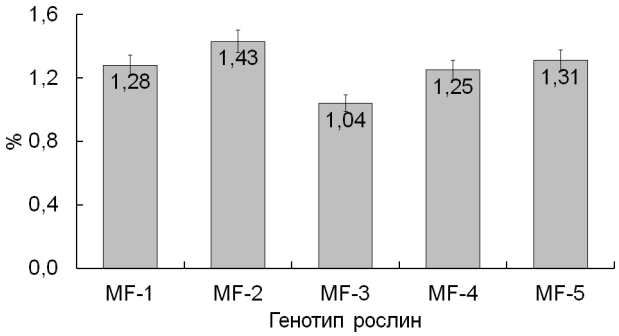


Рис. 13. Вміст загального азоту у рослин різних видів і генотипів роду Mentha у фазу цвітіння

що вміст загального азоту у рослин видів роду *Mentha* встановлено також вперше, адже серед літературних джерел відповідних результатів досліджень не виявлено.

Оскільки біохімічні показники тісно пов'язані з функціональним станом фотосинтетичного апарату, було проаналізовано параметри індукції флуоресценції хлорофілу. За інтенсивністю флуоресценції найбільшими показниками (близько 2400 відн. од.) вирізнялися генотипи MF-4 та MF-3. Найменшу інтенсивність (до 1800 відн. од.) зафіксовано у рослин MF-2 (рис. 14). Варто зазначити, що цей показ-

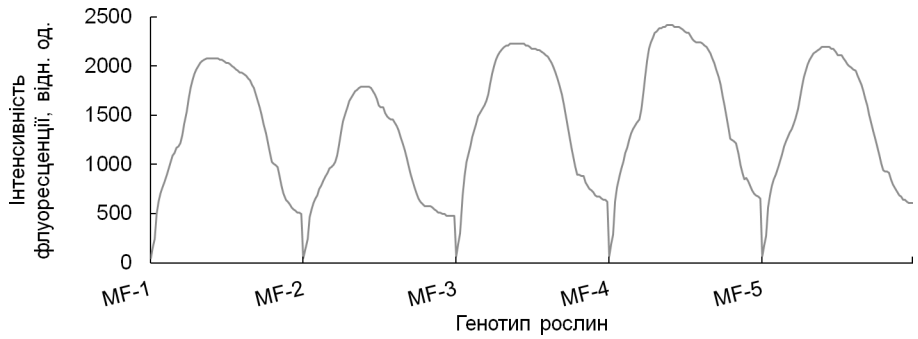


Рис. 14. Індукційні криві флуоресценції хлорофілу листків рослин різних видів і генотипів роду *Mentha* у фазу цвітіння

ник у період цвітіння рослин в усіх генотипів був на досить високому рівні, що свідчить про добру узгодженість всіх фізіологічних процесів у рослин.

Аналіз параметрів індукції флуоресценції хлорофілу показав наявність залежності генотипних особливостей функціонування фотосинтетичного апарату рослин *Mentha*. Найвищі значення максимальної флуоресценції (F_{max}) були характерні для генотипу MF-4 і становили 2416 відн. од. Найнижчі значення цього показника відзначено у генотипу MF-2 — 1792 відн. од.

Значення індикаторного показника K_1 варіювали в межах 0,971—0,977, що свідчить про високий функціональний стан фотосинтетичного апарату досліджених рослин (таблиця). Попри відмінності за абсолютними показниками індукції флуоресценції, значення індексу K_1 були стабільно високими в усіх досліджених генотипів.

Отримані результати узгоджуються з даними щодо вмісту сухої речовини та вуглеводів. Зокрема, рослини генотипу MF-4 характеризувалися не лише найвищими показниками фотосинтетичної активності, а й максимальним накопиченням сухої речовини (28,84 %) та загальним вмістом цукрів (3,81 %), що може свідчити про ефективніше використання продуктів фотосинтезу та вищий адаптаційний потенціал рослин в умовах інтродукції.

Для глибшого розуміння структурно-функціональних змін білкового комплексу та їх зв'язку з адаптивними процесами було проаналізовано співвідношення білкових доменів Amide I та Amide II (рис. 15). Щодо генотипів м'яти, то досліджені зразки рослин за наявністю статистично вірогідних відмінностей за індексом Amide I/Amide II

Параметри індукції флуоресценції хлорофілу рослин роду Mentha різних генотипів

Генотип	F_0	F_{max}	K_1	K_2 (Rfd)	QP
MF-1	48	2080	0,977	4,10	0,779
MF-2	48	1792	0,973	3,89	0,770
MF-3	64	2224	0,971	3,55	0,748
MF-4	64	2416	0,974	4,20	0,790
MF-5	64	2192	0,971	3,59	0,752

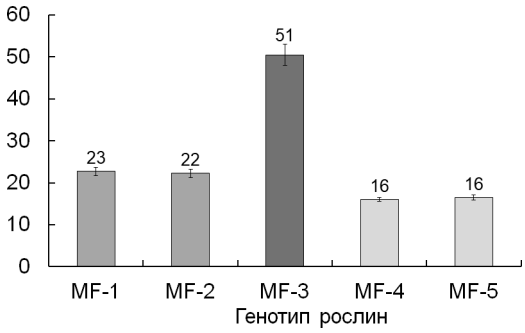


Рис. 15. Співвідношення вмісту білкових доменів Amide I/Amide II у дрібнодисперсному порошку висушених пагонів рослин різних видів і генотипів роду *Mentha* у фазу цвітіння (різними кольорами марковані генотипи, між якими наявні статистично вірогідні відмінності (U-критерій Манна-Уітні, $p < 0{,}01$))

можна поділити на три групи: 1) з досить високим значенням індексу (MF-3); 2) з середніми значеннями індексу (MF-1, MF-2); 3) з відносно низькими значенням індексу (MF-4, MF-5).

Відношення Amide I/Amide II використовується як один з надійних маркерів стресових реакцій на протеомному рівні. Воно свідчить про глобальні зміни конформації протеому, зокрема, зростання цього співвідношення пов'язане з потенційним накопиченням амілоїдоподібних білків [33, 34]. Як зазначалось, генотип MF-3 істотно відрізняється від інших досліджених генотипів за морфологією суцвіття, вмістом сухих речовин у надземній масі, вмістом дубильних речовин, вмістом азоту, так само як і за FTIR-маркером Amide I/Amide II. Показники рослин даного генотипу характерні для змін, пов'язаних із стресовою відповіддю.

Додатково індекс Amide I/Amide II може слугувати складовою характерної FTIR-сигнатури генотипів та екотипів м'яти. У досліджених нами зразків рослин цей стресовий маркер вказує на більшу успішність інтродукції в Україні азербайджанських генотипів MF-4 та MF-5, що, на нашу думку, пов'язано з кліматичними особливостями регіонів їх походження.

Таким чином, у результаті комплексного дослідження біолого-морфологічних, мікроморфологічних та фізіолого-біохімічних особливостей п'яти генотипів рослин роду *Mentha* в умовах інтродукції у Правобережному Лісостепу України встановлено їх високу адаптивну здатність до нових ґрунтово-кліматичних умов. Виявлено істотні міжгенотипні відмінності за морфометричними показниками, характером опушення вегетативних органів, наявністю ефіроолійних залоз, а також за основними біохімічними характеристиками, що свідчить про значну внутрішньовидову та міжвидову відмінність досліджених рослин.

Показано, що генотипи рослин *M. spicata* (MF-4 і MF-5) характеризуються більшою щільністю листкової пластинки, наявністю ефіроолійних залоз на абаксіальній поверхні листків та високою фотосинтетичною активністю. Найкращі результати за сукупністю структурно-функціональних та продуктивних ознак продемонстрував

генотип MF-4 (*M. spicata*, Талишський), який відзначався максимальним вмістом сухої речовини (28,84 %), загальних цукрів (3,81 %), а також найвищими показниками максимальної флуоресценції хлорофілу (2416 відн. од.), що свідчить про ефективне функціонування фотосинтетичного апарату та високий адаптаційний потенціал.

Усі досліджені генотипи характеризувалися високими значеннями індикаторного показника K_1 (0,971—0,977), що свідчить про добрий функціональний стан фотосинтетичного апарату в умовах інтродукції. Встановлений взаємозв'язок між показниками індукції флуоресценції, накопиченням сухої речовини та вуглеводів свідчить про перспективність використання цих показників для комплексної оцінки фізіологічного стану й продуктивності інтродуцентів.

Спектроскопічний аналіз показав, що співвідношення Amide I/ Amide II відображає особливості структурної організації білкового комплексу та рівень адаптаційних реакцій рослин. Отримані результати дають змогу розглядати цей показник як перспективний біохімічний маркер оцінки успішності інтродукції, адаптаційного стану та диференціації екотипів рослин у межах роду *Mentha*.

Отже, досліджені генотипи м'яти є перспективними для вирощування в умовах Лісостепу України як джерело лікарської та ефіроолійної сировини, а найбільший практичний інтерес для подальших селекційних програм і впровадження у виробництво становить генотип MF-4 (*M. spicata*, Талишський).

Автори вдячні співробітникам лабораторії епігенетики Державної установи «Інститут геронтології ім. Д.Ф. Чеботарьова НАМН України» під керівництвом зав. лабораторії канд. біол.наук Дмитра Красненкова за надання технічної бази та методичні консультації щодо проведення ІЧ-спектроскопічних досліджень.

Дослідження проведені за підтримки НФДУ, проєкт 2020.02/0316 «Вплив стресових чинників на синтез білків з пріонними властивостями у рослин» за конкурсом «Підтримка досліджень провідних та молодих учених» (2020—2021, 2023).

Внесок авторів: *концепція та дизайн дослідження* — Д.Б. Рахметов; *отримання даних* — Д.Б. Рахметов, О.П. Бондарчук, С.М. Ковтун-Водяницька, О.М. Вергун, С.О. Рахметова, С.В. Літвінов, Н.М. Рашидов, Н.К. Куцоконь; *аналіз та інтерпретація результатів* — Д.Б. Рахметов, О.П. Бондарчук, С.М. Ковтун-Водяницька, О.М. Вергун, С.О. Рахметова, С.В. Літвінов, Н.М. Рашидов, Н.К. Куцоконь; *підготовка рукопису — написання первинного тексту статті* — Д.Б. Рахметов, О.П. Бондарчук, С.М. Ковтун-Водяницька, С.В. Літвінов, Н.М. Рашидов, Н.К. Куцоконь.; *підготовка рукопису — перегляд і редагування* — Д.Б. Рахметов, О.П. Бондарчук.

Всі автори переглянули і схвалили остаточну версію рукопису.

Конфлікт інтересів: автори декларують відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. Mirzoieva, T.V. (2018). Features of export and import of medicinal plant products under current conditions. Biznes Inform, 7(488), pp. 32-37 [in Ukrainian].
2. Wani, S.A., Naik, H.R., Wagay, J.A., Ganie, N.A., Mulla, M.Z. & Dar, B.N. (2022). Mentha: A review on its bioactive compounds and potential health benefits. Quality Assurance Safety Crops Foods, 14(4), pp. 154-168. https://doi.org/10.15586/qas.v14i4.1129

3. El Machrafi, S., Elkouali, M., Sadia, T., Iskandar, S., Rahhal, R., Bouhadi, M., El Jemli, M. & El Hajjouji, H. (2025). Phytochemical composition and antioxidant activities of Mentha spicata L. and Melissa officinalis L. from the Settat region of Morocco: A comparative study of extraction methods. J. Ecol. Engineer., 26(12), pp. 164-177. https://doi.org/10.12911/22998993/208642
4. Araniti, F., Prinsi, B., Cocetta, G., Negrini, N., Nocito, F.F. & Espen, L. (2024). Impact of cyclic-mild-drought stress on the metabolism of Mentha spicata L.: A strategy to improve quality traits. Industrial Crops Prod., 210, 118129. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118129
5. Araghi, A.M., Nemati, S.H., Shoor, M., Arani, M.A. ... & Moshtagi, N. (2018). Influence of Water Stress on Agro-Morfological Traits and Essential Oil Content Among Iranian Genotypes of Mentha longifolia. Proc. Natl. Academ. Sci., India, Sect. B Biol. Sci., 89(4), pp. 1-12. https://doi.org/10.1007/s40011-018-1042-5
6. Fezzeh M., Shahnaz F., Shahla S. & Abolfaz A. (2023). Phytochemicals, antioxidant activity and essential oil components of Mentha longifolia genotypes, 18 p. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3076933/v1
7. International Union for the Protection of New Varieties of Plants. (n.d.). PLUTO database. https://pluto.upov.int/login1
8. Ministry of Economy of Ukraine. (n.d.). Official website. https://me.gov.ua/view/3069962a-789b-4271-bdd2-533b339c2000
9. Rodrigues-Corrêa, K.C.D.S. & Fett-Neto, A.G. (2019). Abiotic stresses and non-protein amino acids in plants. Crit. Rev. Plant Sci., 38(5-6), pp. 411-430. https://doi.org/10.1080/07352689.2019.1707944
10. Köhler, R., Kariuki, L., Lambert, C. & Biesalski, H.K. (2019). Protein, amino acid and mineral composition of some edible insects from Thailand. J. Asia-Pacific Entomol., 22(1), pp. 372-378. https://doi.org/10.1016/j.aspen.2019.02.002
11. Lopez, M.J. & Mohiuddin, S.S. (2022). Biochemistry, Essential Amino Acids. In: StatPearls. StatPearls Publishing, Treasure Island (FL); PMID: 32496725.
12. Yoneyama, T. & Suzuki, A. (2019). Exploration of nitrate-to-glutamate assimilation in non-photosynthetic roots of higher plants by studies of 15N-tracing, enzymes involved, reductant supply, and nitrate signaling: a review and synthesis. Plant Physiol. Biochemi., 136, pp. 245-254. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.12.011
13. González-Moro, M.B., González-Moro, I., De la Peña, M., Estavillo, J.M., Aparicio-Tejo, P.M., Marino, D. ... & Vega-Mas, I. (2021). A multi-species analysis defines anaplerotic enzymes and amides as metabolic markers for ammonium nutrition. Front. Plant Sci., 11, 632285. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.632285
14. Macoy, D.M., Kim, W.Y., Lee, S.Y. & Kim, M.G. (2015). Biotic stress related functions of hydroxycinnamic acid amide in plants. J. Plant Biol., 58, pp. 156-163. https://doi.org/10.1007/s12374-015-0104-y
15. Liu, S., Jiang, J., Ma, Z., Xiao, M., Yang, L., Tian, B. ... & Yang, Y. (2022). The role of hydroxycinnamic acid amide pathway in plant immunity. Front. Plant Sci., 13, 922119. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.922119
16. Bhattarai, S., Liu, N., Karunakaran, C., Tanino, K.K., Fu, Y.B., Coulman, B. ... & Biligetu, B. (2021). Tissue specific changes in elements and organic compounds of alfalfa (Medicago sativa L.) cultivars differing in salt tolerance under salt stress. J. Plant Physiol., 264, 153485.
17. Macoy, D.M.J., Uddin, S., Ahn, G., Peseth, S., Ryu, G.R., Cha, J.Y. ... & Kim, M.G. (2022). Effect of hydroxycinnamic acid amides, coumaroyl tyramine and coumaroyl tryptamine on biotic stress response in Arabidopsis. J. Plant Biol., 65(2), pp. 145-155. https://doi.org/10.1007/s12374-021-09341-2
18. Knollenberg, B.J., Li, G.X., Lambert, J.D., Maximova, S.N. & Guiltinan, M.J. (2020). Clovamide, a hydroxycinnamic acid amide, is a resistance factor against Phytophthora spp. in Theobroma cacao. Front. Plant Sci., 11, 617520. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.617520
19. Ismael, A., Guevara-Oquendo, V.H., Refat, B. & Yu, P. (2019). Interactive association between processing induced molecular structure changes and nutrient delivery on a molecular basis, revealed by cutting-edge vibrational biomolecular spectroscopy. J. Animal Sci. Biotechnol., 10, pp. 1-16.

20. Yun S.-M., Kim C.-S., Lee J.-J., Chung J.-S. (2024). Application of ATR-FTIR Spectroscopy for Analysis of Salt Stress in Brussels Sprouts. Metabolites, 14(9), 470. https://doi.org/10.3390/metabo14090470
21. da Silva, M.E.A., da Silva, D.P.S., Macedo, T.D.F., Behling Neto, A., Pereira, D. & Tardin, F. (2021). Methodologies for measuring the dry matter content in samples of different purpose sorghum silages. https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1137260
22. Chandraju, S, Kumar Chidan, C.S. & Venkatesh, R (2014). Estimation of reducing sugar by acid hydrolysis of black grape (Vitis vinifera L.) peels by standard method. J. Chem. Pharmaceut. Res., 6(5), pp. 862-866.
23. Ahmed, Sh. & Beigh, S.H. (2009). Ascorbic acid, carotenoids, total phenolic content and antioxidant activity of various genotypes of Brassica oleraceae encephala. J. Med. Biol. Sci. 3(1), pp. 1-8.
24. Boiago, N..P, Coelho, S.R.M., Paz, C.H.O. & Christ, D (2020). Chemical change during storage of crambe cultivated with application of plant growth regulators. Biosci. J., 36(1), pp. 87-101. https://doi.org/10.14393/BJ-v36n1a202042274
25. Khasnabis, J., Rai, Ch. & Roy, A (2015). Determination of tannin content by titrimetric method from different types of tea. J. Chem. Pharmaceut. Res., 7(6), pp. 238-241.
26. Romanov, V.O., Artemenko, D.M., Braiko, Y.O., et al. (2011). Family of portable devices 'Floratest': preparation for serial production. Computer tools, networks and systems, 10, pp. 85-93.
27. Portable fluorometer «Florotest»: instructions for use (2013). Kyiv: V.M. Hlushkov Institute of Cybernetics National Academy of Sciences of Ukraine, 24 p.
28. Makhnii, T., Ilchenko, O., Reynt, A., Pilgun, Y., Kutsyk, A., Krasnenkov, D. & Kukharskyy, V. (2019). Age-Related Changes in FTIR and Raman Spectra of Human Blood. Ukr. J. Physics, 61(10), 853. https://doi.org/10.15407/ujpe61.10.0853
29. Kannan, V.S., Arjunan, T.V. & Vijayan, S. (2021). Drying characteristics of mint leaves (Mentha arvensis) dried in a solid desiccant dehumidifier system. J. Food Sci. Technol., 58(2), pp. 777-786. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04595-z
30. Hutsol, T., Priss, O., Kiurcheva, L. ... & Kukharets, M. (2023). Mint Plants (Mentha) as a Promising Source of Biologically Active Substances to Combat Hidden Hunger. Sustainability, 15(15), 11648. https://doi.org/10.3390/su151511648
31. Maier, M., Oelbermann, A.L., Renner, M. & Weidner, E. (2017). Screening of European medicinal herbs on their tannin content—New potential tanning agents for the leather industry. Industr. Crops Prod., 99, pp. 19-26. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.033
32. Scheres, H.W. (2026) The amyloid packing difference: a pairwise comparison metric for amyloid structures. Structure, 34, pp. 1-11. https://doi.org/10.64898/2026.02.18.706523
33. Kryvokhyzha, M., Litvinov, S., Danchenko, M., Khudolieieva, L., Kutsokon, N., Baráth, P. & Rashydov, N. (2024). How does ionizing radiation affect amyloidogenesis in plants? Int. J. Radiat. Biol., 100(6), pp. 922-933. https://doi.org/10.1080/09553002.2024.2331126

Отримано 06.07.2026. Схвалено до друку 23.07.2026. Опубліковано 30.09.2026

BIOLOGICAL-MORPHOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL-BIOCHEMICAL FEATURES OF *MENTHA* L. GENOTYPES UNDER THE CONDITIONS OF INTRODUCTION INTO THE FOREST-STEPPE OF UKRAINE

D.B. Rakhmetov[1], O.P. Bondarchuk[1], S.M. Kovtun-Vodyanytska[1], O.M Vergun[1], S.O. Rakhmetova[1], S.V. Litvinov[2], N.M. Rashydov[2], N.K. Kutsokon[2]

[1]M.M. Gryshko National Botanical Garden, National Academy of Sciences of Ukraine
1 Sadovo-Botanichna St., Kyiv 01103, Ukraine
[2]Institute of Cell Biology and Genetic Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine
148 Zabolotnogo St., Kyiv 03143, Ukraine

The aim of the study was to determine the biological-morphological and physiological-biochemical features of *Mentha* L. genotypes under conditions of introduction in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine, to assess their adaptive potential and to establish the possibility of using the Amide I / Amide II ratio as a marker of adaptive processes. The objects of the study were five plant genotypes of different geographical origin: *M. longifolia* var. *asiatica* (Leriksky, MF-1); *M. rotundifolia* (Masallinsky, MF-2); *M. rotundifolia* (Lenkoransky, MF-3); *M. spicata* (Talyshsky, MF-4); *M. spicata* (Glevakhivsky DSGV, MF-5). At the flowering stage, complex morphometric, micromorphological, physiological-biochemical and spectroscopic studies were carried out. Significant differences in morphological and biochemical indices were established depending on the genotypic features of the plants. The height of the plants varied from 65 to 135 cm, the length of the inflorescences — from 5.4 to 8.2 cm. The highest dry matter content was found in the genotypes MF-4 (28.84 %) and MF-2 (28.53 %). The genotype MF-4 was characterized by the maximum accumulation of total sugars (3.81 %) and monosugars (3.75 %), while the highest content of tannins was recorded in MF-2 (6.7 %). The analysis of chlorophyll fluorescence induction showed a high functional state of the photosynthetic apparatus of all the studied genotypes. The highest value of the maximum fluorescence induction (F_{max} = 2416 rel. un.) was noted in the genotype MF-4. The values of the indicator index K_1, calculated using the method of the fluorometer «Floratest», varied within 0.971—0.977, which indicates a good functional state of the photosynthetic apparatus of the studied plants. Spectroscopic analysis revealed differences in the ratio of protein domains Amide I / Amide II, which reflect the features of the structural organization of the protein complex and the adaptive reactions of the genotypes. The results obtained indicate a high adaptive potential of the studied mint genotypes under the conditions of introduction. The most promising genotype in terms of morphological, physiological, biochemical and photosynthetic indices was the MF-4 (*Mentha spicata*, Talyshsky). The ratio Amide I / Amide II can be used as a promising biochemical marker for assessing adaptation processes and the success of the introduction of representatives of the genus *Mentha*.

Key words: Mentha L., genotype, plant introduction, morphological traits, micromorphology, photosynthetic activity, chlorophyll fluorescence, biochemical composition, FTIR spectroscopy, adaptive potential.

ORCID

Д.Б. РАХМЕТОВ — D. Rakhmetov https://orcid.org/0000-0001-7260-3263

О.П. БОНДАРЧУК — O. Bondarchuk https://orcid.org/0000-0001-6367-9063

С.М. КОВТУН-ВОДЯНИЦЬКА — S. Kovtun-Vodyanytska https://orcid.org/0000-0002-2367-461X

О.М. ВЕРГУН — O. Vergun https://orcid.org/0000-0003-2924-1580

С.О. РАХМЕТОВА — S. Rakhmetova https://orcid.org/0000-0002-0357-2106

С.В. ЛІТВІНОВ — S. Litvinov https://orcid.org/0000-0002-9185-4807

Н.М. РАШИДОВ — N. Rashydov https://orcid.org/0000-0001-5387-4877

Н.К. КУЦОКОНЬ — N. Kutsokon https://orcid.org/0000-0002-2339-0633